На правах рукописи

Коплярова Надежда Владимировна

Непараметрические модели и алгоритмы управления нелинейными системами класса Винера и Гаммерштейна

Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (космические и информационные технологии)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Сибирский федеральный университет», г. Красноярск.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Медведев Александр Васильевич

Официальные оппоненты: **Перепелкин Евгений Александрович**
доктор технических наук, профессор
Алтайский государственный технический университет, г. Барнаул
профессор кафедры прикладной математики

Гендрина Ирина Юрьевна
кандидат физико-математических наук, доцент
Национальный исследовательский Томский государственный университет
доцент кафедры исследования операций

Ведущая организация: Новосибирский государственный технический университет

Защита состоится «2» марта 2017 года в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.249.05, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный аэрокосмический университет имени академика М.Ф. Решетнева» по адресу: 660037, г. Красноярск, просп. им. газ. «Красноярский рабочий», 31.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева и на сайте университета: http://www.sibsau.ru

Автореферат разослан «__» ________ 2017 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета Илья Александрович Панфилов

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Системы управления технологическими процессами и производством являются сложными техническими объектами. Для эффективного управления промышленными объектами необходимо создание математических моделей и алгоритмов управления, ориентированных на применение современных средств вычислительной техники. Поэтому актуальность задач, связанных с разработкой методов идентификации нелинейных динамических систем при различной априорной информации, возрастает. Центральной проблемой теории управления является оптимальное использование всех ресурсов системы для достижения целей на каждом этапе ее функционирования. Поэтому при построении моделей процесса необходимо рассмотрение всей имеющейся априорной информации, что достигается за счет применения современных методов параметрической и непараметрической идентификации.

Современная теория идентификации в основном базируется на параметрическом подходе — Я.З. Цыпкин, Н.С. Райбман, П. Эйкхофф, Л. Льюнг. и др. Однако во многих практических задачах выбор параметрической структуры модели представляет определенные трудности, так как часто исследователь располагает разнотипной информацией о некоторых каналах исследуемого процесса. Идентификацией нелинейных систем, в том числе и класса Винера и Гаммерштейна занимаются многие исследователи, среди которых могут быть отмечены работы Пащенко А.Ф., Кунцевич В.М. Попков Ю.С., Каминскаса В.А., Кацюбы О.А., Греблицкого В. и других. При этом большинство методов идентификации предполагает применение параметризации (то есть для их реализации требуется наличие сведений о порядке дифференциального уравнения и возможность проведения множества экспериментов для оценивания его параметров). Диссертационная работа посвящена разработке и исследованию непараметрических алгоритмов идентификации и управления нелинейными динамическими системами класса Винера и Гаммерштейна в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности.

Цель работы состоит в повышении эффективности управления и прогнозирования поведения нелинейных динамических объектов классов Винера и Гаммерштейна в условиях разнотипной априорной информации с применением непараметрических моделей и алгоритмов управления.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих основных задач:

1) выполнить обзор существующих методов решения задачи идентификации нелинейных динамических систем, в том числе систем класса Винера и Гаммерштейна.

2) разработать и исследовать непараметрические алгоритмы моделирования нелинейных динамических систем класса Винера и Гаммерштейна при различной априорной информации о типе нелинейности;

3) разработать модифицированный непараметрический алгоритм определения вида нелинейного элемента моделей Винера и Гаммерштейна;

4) разработать непараметрические алгоритмы управления для систем, описываемых моделями Винера и Гаммерштейна;

5) реализовать алгоритмы решения исследуемых задач в виде программных систем, исследовать системы на тестовых задачах;

6) подтвердить эффективность разработанных разработанных непараметрических алгоритмов моделирования и управления для нелинейных дискретно-непрерывных процессов класса Винера и Гаммерштейна путем их проверки на численных исследованиях;

7) подтвердить практическую значимость и эффективность разработанных моделей и алгоритмов управления путем моделирования процесса сжигания угля в котлоагрегате ОАО «Красноярская ТЭЦ-2» и реализации эксперимента по управлению.

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

1) Разработан новый метод решения задачи идентификации нелинейных динамических систем классов Винера и Гаммерштейна, отличающийся от известных возможностью применения в условиях отсутствия информации о порядке и параметрах дифференциального уравнения, описывающего линейный блок, по зашумленным измерениям выхода системы.

2) Разработаны алгоритмы оценивания параметров нелинейного элемента моделей класса Винера и Гаммерштейна в условиях частичной неопределеноности, когда его структура задана в общем виде (квадратор, звено с насыщением), отличающийся упрощением методики экспериментов.

3) Разработан модифицированный непараметрический алгоритм оценивания нелинейного блока моделей классов Винера и Гаммерштейна, отличающийся от известных алгоритмов его применимостью к решению задачи идентификации в условиях неопределенности, когда параметрическая структура нелинейного блока неизвестна.

4) Впервые предложены алгоритмы управления динамическими процессами класса Винера и Гаммерштейна, отличающиеся возможностью применения для эффективного управления процессом в условиях недостатка априорной информации о порядке и параметрах линейного динамического блока.

Теоретическая значимость результатов диссертационной работы состоит в том, что были разработаны, исследованы и апробированы новые непараметрические алгоритмы, каждый из которых был усовершенствован для класса задач идентификации и управления нелинейными динамическими системами классов Винера и Гаммерштейна. Постановка задач исследования систем, находящихся в условиях частичной неопределенности, и разработка алгоритмов их решения являются существенным вкладом в развитие методов идентификации и управления для динамических систем класса Винера и Гаммерштейна, а также их возможных обобщений.

Практическая ценность результатов диссертационной работы состоит в том, что они могут быть применены в компьютерных системах моделирования и управления различными технологическими объектами класса Винера или Гаммерштейна. Процессы данного типа достаточно распространены в различных областях промышленности, например, в теплоэнергетике (ТЭЦ), в стройиндустрии, металлургии, нефтепереработке и др. Роль нелинейного элемента в подобных системах часто выполняют исполнительные механизмы, установленные как на входе, так и на выходе технологических аппаратов. Проведенные исследования процесса сжигания угля в котлоагрегате ТЭЦ показали, что управление по некоторым показателям ведется недостаточно качественно, хотя и в соответствии с технологическим регламентом. Применение полученных моделей и алгоритмов управления позволит повысить качество ведения процесса.

Методы исследования. При выполнении данной работы были использованы положения и методы системного анализа, математического анализа, дифференциального и интегрального исчисления, методы теории идентификации, математической статистики, статистического моделирования, теории автоматического управления, теории оптимизации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1) Разработанный метод решения задачи идентификации нелинейных динамических систем классов Винера и Гаммерштейна позволяет получить точный прогноз поведения систем в условиях недостатка априорной информации без определения параметров и структуры линейного дифференциального уравнения.

2) Модифицированные алгоритмы оценивания параметров нелинейного блока моделей класса Винера и Гаммерштейна успешно справляется с построением модели нелинейного блока систем (эффективно применим) в условиях частичной неопределенoсти, когда структура нелинейного блока задана в общем виде (квадратор, звено с насыщением).

3) Модифицированный непараметрический алгоритм оценивания нелинейного блока моделей классов Винера и Гаммерштейна эффективно применим к решению задачи идентификации в условиях неопределенности, когда параметрическая структура линейного динамического и нелинейного безынерционного блоков неизвестна.

4) Предложенные адаптивные алгоритмы управления динамическими процессами класса Винера и Гаммерштейна обеспечивают большую эффективность решения задачи управления в условиях недостатка априорной информации о параметрической структуре управляемого объекта, чем классические схемы управления, основанные на принципе обратной связи.

Реализация результатов работы. Результаты диссертационной работы используются при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами на следующих предприятиях:

1) Красноярская ТЭЦ-1 ООО «Сибирская генерирующая компания (СГК)». Результаты диссертационного исследования используются при создании автоматизированной системы управления процессом пылеприготовления и сжигания угля в котлоагрегате (БКЗ-320-140) Красноярской ТЭЦ. Ситуации типа «пережог», «недожог» в значительной степени будут сокращены. Процесс горения угля в котлоагрегате будет вестись более рационально, что скажется на снижении температуры уходящих газов и, как итог, уменьшении расхода топлива на выработку тепла и улучшение экологической обстановки в регионе.

2) ОАО «ЕВРАЗ Западно-Сибирский металлургический комбинат». Результаты диссертационной работы используются при создании автоматизированной системы управления для кислородно-конвертерного цеха №2 в подсистеме оперативного планирования выплавки стали (в соответствии с ГОСТ 9045-80). Разработанные модели и алгоритмы используются для оптимизации графика работы основных технологических агрегатов, оптимизации баланса времени работы конвертеров, что позволит получить реальный экономический эффект за счет уменьшения времени простоев технологического оборудования, задолженности при обороте сталеразливочных и промежуточных ковшей, экономии

огнеупоров и электрической энергии при обработке металла на установке «ковш-печь».

Степень достоверности работы подтверждается тем, что теория построена на использовании известного математического аппарата теории идентификации и управления. В работе использовано сравнение экспериментальных и рассчитанных по моделям данных, а также сравнение результатов управления с применением предлагаемого алгоритма и классических схем управления. Кроме того, были использованы современные методики обработки исходной информации, представительные выборочные совокупности; установлено качественное и количественное совпадение результатов моделирования со значениями измерений реальных показателей процесса сжигания угля в котлоагрегате ТЭЦ.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная конференция «Решетневские чтения» (г. Красноярск, 2011 г., 2013 г.); Международная научно-техническая конференция «Кибернетика и высокие технологии XXI века» (г. Воронеж, 2012 г., 2013 г.); Всероссийская молодежная научно-практическая конференция «Малые Винеровские чтения» (г. Иркутск, 2013 г., 2014 г.); Международная научно-техническая конференция «Компьютерное моделирование 2013» (г. Санкт-Петербург, 2013 г.); пятая Международная конференция САИТ 2013 (г. Красноярск, 2013г.); The international workshop Applied methods of statistical analysis (г. Новосибирск, 2013г., 2015); The tenth international conference «Computer data analysis and modeling. Theoretical and applied stochastics» (г. Минск, 2013г.); IX Всероссийская научно-практическая конференция «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве (AS`2013)» (г. Новокузнецк, 2013г.); XVI Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (г. Самара, 2014 г., 2015г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 26 печатных работ, включая 7 статей в журналах, рекомендуемых ВАК, 2 статьи и 17 публикаций тезисов и докладов в трудах всероссийских и международных конференций, симпозиумов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 174 наименований и приложения. Общий объем работы – 159 страниц основного текста, включая 134 рисунка и 13 таблиц.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность работы, определены цели и задачи исследования, научная новизна и практическая ценность диссертационной работы.

Первая глава посвящена комплексу вопросов, связанных с идентификацией. Часто нелинейные системы можно представить в виде контура с последовательным включением нелинейного элемента (НЭ) и линейной части (ЛЭ). Исследуемые в работе процессы классов Винера и Гаммерштейна относятся к классу нелинейных динамических, для которых не выполняется принцип суперпозиции.

Выбор конкретного метода идентификации зависит от уровня априорной информации об исследуемой системе, то есть от совокупности заранее известных сведений о характеристиках объекта, случайных помехах, действующих на объект и в каналах связи, ограничениях, условиях работы. В главе дается краткая характеристика основных уровней априорной информации. Рассматривается постановка и общая схема решения задачи идентификации в условиях параметрической и непараметрической неопределенности.

Рассматривается вопрос проверки гипотезы о линейности исследуемого объекта. Приводятся критерии, на основании оценки которых может быть сделан вывод о принадлежности динамической системы к классу линейных.

Нелинейная динамическая система в общем виде может быть представлена в дискретном времени следующим образом:

$$x_t = f(x_{t-1}, x_{t-2}, .., x_{t-n}, u_t, u_{t-2}, .., u_{t-m}, \alpha), \qquad (1)$$

где u – входное (управляющее) воздействие, x – выход, f – некоторый функционал, структура которого неизвестна или известна не полностью, m, n – «глубина» памяти соответственно входной и выходной переменных, которая может быть определена на основании исследований на объекте, a – вектор неизвестных параметров. В этом случае задача идентификации рассматривается в условиях частичной неопределенности. Наиболее распространенные методы идентификации нелинейных динамических систем могут быть условно разделены на группы:

- представление системы в виде суммы рядов Вольтерра;
- линеаризация характеристик системы;
- представление системы в виде различных сочетаний последовательно соединенных линейного динамического и нелинейного безынерционного блоков (системы класса Винера и Гаммерштейна).

Во второй главе рассматривается задача идентификации динамических систем классов Винера (ЛЭ - НЭ) и Гаммерштейна (НЭ - ЛЭ):

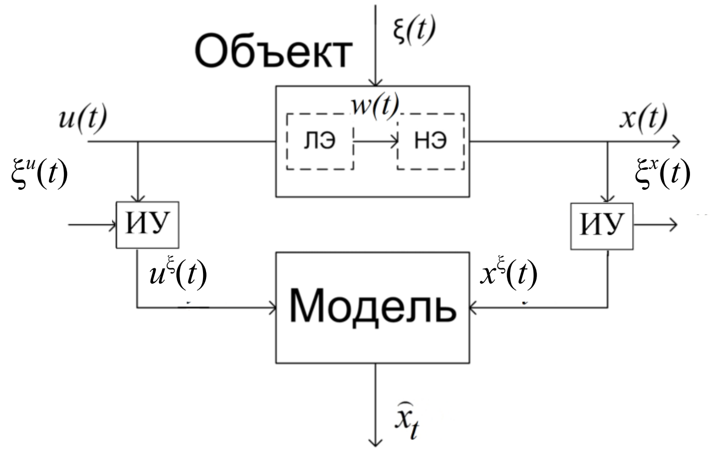

Рисунок 1 – Схема задачи идентификации системы класса Винера, $u(t)$ и $x(t)$ – соответственно входная и выходная переменные, u_t^ξ, x_t^ξ – наблюдения переменных процесса в моменты времени t, $\xi(t)$ – случайное воздействие, $\xi^u(t), \xi^x(t)$ – случайные факторы в каналах измерения переменных, такие что $\hat{M}(\xi) = 0, \hat{D}(\xi) <$ �, $\overset{\sqcup}{x}(t)$ – выход модели, ИУ – измерительное устройство

На рисунке 1 приведена общая схема решения задачи идентификации, где в качестве объекта рассматривается система, состоящая из последовательно соединенных линейной динамической (ЛЭ) и нелинейной статической (НЭ) частей. Исходные данные о состоянии исследуемого объекта представляют собой выборку измерений реакции объекта на входное воздействие $u(t)$: $\{u_i, x_i, i = \overline{1, s}\}$. Параметры и порядок дифференциального уравнения, которым может быть описана линейная динамическая часть системы, неизвестны. Пусть нелинейность в объекте описывается функцией, вид которой предполагается известным с точностью до набора параметров. Исследователю доступно проведение эксперимента, соответственно значение входного воздействия $u(t)$ может быть известно или вычисляемо в любой точке.

Требуется по наблюдаемым «входным – выходным» переменным процесса построить математическую модель объекта.

Непараметрическая модель систем класса Винера. Пусть исследуемый процесс в общем виде имеет структуру класса Винера (рисунок 2):

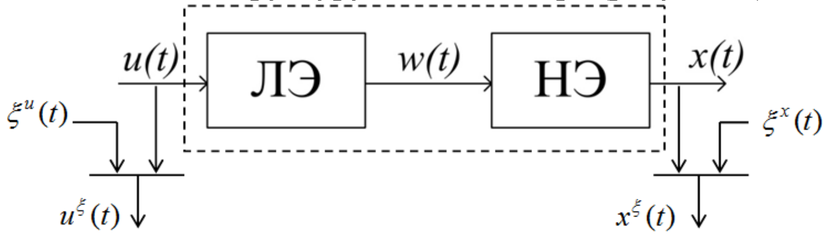

Рисунок 2 – Система класса Винера, $w(t)$ – выход линейной части объекта (не измеряемый)

Во многих случаях из-за недостатка априорной информации об объекте, параметризовать линейный элемент не представляется возможным, при этом структура нелинейного элемента может быть известна с точностью до параметров, то есть задача идентификации формулируется в условиях как параметрической, так и непараметрической неопределенности.

В диссертационной работе предлагается метод построения моделей систем класса Винера, основная идея которого заключается в использовании непараметрических оценок для описания связей системы, информация о которых по каким-то причинам неизвестна (в данном случае – значения выхода ЛЭ системы), а также параметрическом оценивании функции нелинейного блока.

Поскольку линейный динамический объект может быть описан интегралом свертки, то значение выхода ЛЭ системы при ненулевых начальных условиях имеет вид:

$$w(t) = u(0)h(t) + \int_0^t h'(t-\tau)u(\tau)d\tau\,, \tag{2}$$

где $h(t\text{-}\tau)$ - переходная функция линейной части системы.

Далее для простоты рассмотрим задачу при нулевых начальных условиях (либо при ненулевых условиях система находится в установившемся состоянии). Если структура нелинейного элемента $f\{w(t),a\}$ задана с точностью до набора неизвестных параметров $\boldsymbol{a}$, предлагается строить модель объекта в виде:

$$\hat{x}(t) = \hat{f}\left(\int_0^t h'(t-\tau)u(\tau)d\tau, \hat{a}\right). \tag{3}$$

В модели (3) неизвестными остаются значение переходной функции $\hat{h}(t)$ и параметров $\boldsymbol{a}$ функции $f(w(t),a)$, вместо которых необходимо использовать их оценки. Для оценивания данных параметров требуется выборка, содержащая измерения выхода ЛЭ системы $\{u_i, w_i\}, i=\overline{1,s}$, которая отсутствует. В связи с чем в работе предлагается метод оценивания неизвестных параметров модели (3).

Необходимо при тех же условиях эксперимента (значениях входного воздействия, шага дискретизации и величины помехи), в которых были получены измерения «входных-выходных» величин $\{u_i, x_i\}, i = \overline{1, s}$, сформировать выборку $\{u_i, w_i\}, i = \overline{1, s}$, где w_i – оценка выхода ЛЭ системы. Значения $\hat{w}_i$ предлагается вычислять по результатам дополнительных экспериментов с системой.

Если подать на вход объекта воздействие $u(t)=1(t)$, возможно измерить только выход (обозначенный $x^1(t)$), вычисляемый как $x^1(t)=f(h(t),a)$. Если выражение $f(w(t),a)$ может быть разрешено относительно $w(t)$, тогда значения переходной функции ЛЭ системы в моменты времени t_i могут быть оценены:

$$h_i = w_i^1 = \hat{f}^{-1}(x_i^1 q,\ ). \tag{4}$$

Алгоритмы оценивания параметров неизвестной функции $\hat{f}^{-1}(x, a)$ зависят от типа нелинейности. Весовая характеристика ЛЭ системы может быть оценена с применением непараметрической статистики:

$$\hat{k}(t) = \hat{h}'(t) = \frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} h_i H'\left(\frac{t - t_i}{c_s}\right), \tag{5}$$

где $H'(\cdot)$ – производная колокообразной функции, c_s – параметр размытости.

Непараметрическая модель объекта класса Винера примет вид:

$$\hat{x}(t) = \hat{f}\left(\frac{1}{sc_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} \hat{h}_i H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau, \hat{a}\right), \tag{6}$$

где $\hat{f}(w(t), a)$ – оценка нелинейной функции. В работе предложены алгоритмы идентификации для систем, нелинейный элемент которых представляет собой квадратор и звено с насыщением.

Рассмотрим объект, имеющий структуру модели Винера, нелинейный элемент которой – квадратор, описываемый функцией $f(w) = aw^2$, $a = const$. Выход исследуемого объекта $x(t) = f(w, a) = aw^2$.

Обозначим переходную характеристику ЛЭ $h(t)$. Выход системы равен $x^1(t) = ah^2(t)$, то есть оценку $h(t)$ можно выразить как:

$$h(t) = \sqrt{x^1(t)/a}. \tag{7}$$

С учетом рассчитанного значения переходной функции (7), оценка выхода линейного элемента (2) примет вид:

$$\hat{w}(t) = \frac{1}{sc_s} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta t} \sqrt{\frac{x^1(t_i)}{a}} \cdot H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau, \tag{8}$$

где a – неизвестный параметр квадратора.

Непараметрическая модель нелинейного объекта $x(t)$ тогда примет вид:

$$\begin{aligned} \hat{x}(t) &= \left[\frac{1}{sc_s} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta t} \sqrt{a \cdot \hat{h}^2(t_i)} \cdot H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau\right]^2 = \\ &= \left[\frac{1}{sc_s} \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta t} \sqrt{x^1(t_i)} \cdot H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) u(\tau_j)\Delta\tau\right]^2, \end{aligned} \tag{9}$$

где $x^{1}(t_i)$ – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие.

Пример. Рассмотрим систему класса Винера, поведение линейного блока которой имитируется численным аналогом дифференциального уравнения: $x_i = 1,923x_{i-1} - 0,94x_{i-2} + 0,005u(t_i)$. При построении модели системы, описывающие ее уравнения неизвестны, они используются только для получения выборки измерений входных и выходных переменных. Нелинейный элемент описывается функцией вида квадратор с неизвестными параметрами. В результате имеем равномерную выборку измерений «входных и выходных» переменных, на основе которой и строится модель объекта.

На рисунке 3 показан результат моделирования такой системы.

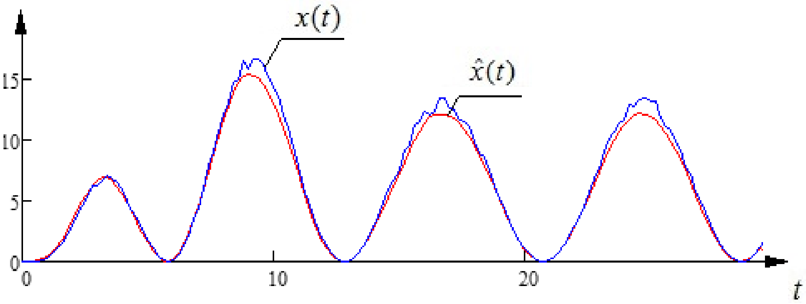

Рисунок 3 – Результат моделирования системы класса Винера, объем выборки s=200, шаг дискретизации Δt=0,15, помеха 5%, входное воздействие: $u(t)$=2cos(0,4t), относительная средняя ошибка моделирования 2,5%

На рисунках 3-5: $x(t)$ – выход объекта, $\hat{x}(t)$ – выход модели объекта.

Далее рассмотрим задачу построения модели систем класса Винера с насыщением, для решения которой в работе предложен следующий алгоритм:

1. Проводится серия из m экспериментов, в ходе которых на вход системы подаются воздействия $u_j = r_j, r_j = const$. Выбираются границы значений $u_{\min} \le u(t) < u_{\max}$, определяется шаг дискретизации Δu, тогда $u_j = u_{\min} + j \cdot \Delta u$. В результате получим выборку $\{u_j, x_{y,j}\}, j = 1,\bar{m}.$,

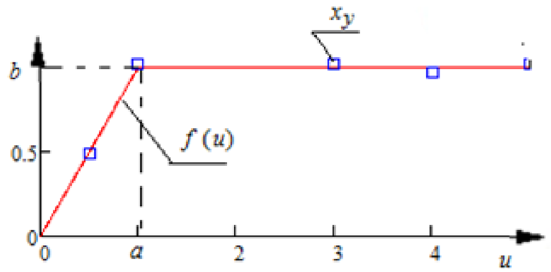

Рисунок 4 – Элементы обучающей выборки, x_y – оценка установившегося значения выхода системы

2. По данной выборке может быть получена оценка параметров нелинейного элемента вида звено с насыщением.

Обозначим описанную в пунктах 1-2 схему алгоритма (*).

Тогда оценка нелинейного элемента системы примет вид:

$$\hat{f}(w) = \begin{cases} \frac{\hat{b}}{\hat{a}} w, & w \le \hat{a} \\ \left|\hat{b}\right|, & w > \hat{a} \end{cases}. \tag{10}$$

3. Модель объекта строится в виде системы:

$$\begin{cases} x_s(t) = \hat{f}(w(t)), \\ w_s(t) = \int\limits_0^t \hat{h}'(t-\tau)u(\tau)d\tau, \end{cases} \tag{11}$$

где $\hat{f}(\cdot)$ – оценка функции (10), описывающей нелинейность системы.

Пример. На рисунке 5 показан результат моделирования нелинейного динамического процесса класса Винера с насыщением.

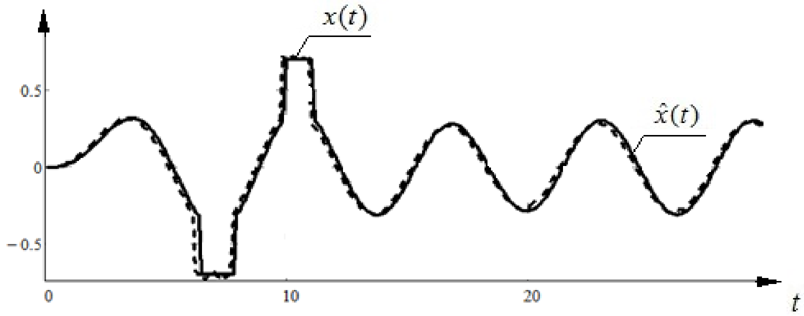

Рисунок 5 – Результаты оценки выхода x(t), s=200, Δt=0,15, помеха 5%, $u(t)$=0,35$sin(t)$, средняя ошибка моделирования 2%

Из рисунков 3 и 5 видно, что предлагаемые алгоритмы позволяют достаточно точно оценивать значения выхода нелинейной системы класса Винера с квадратором и звеном с насыщением.

Непараметрическая модель нелинейных систем класса Гаммерштейна. Рассматривается задача идентификации нелинейной системы класса Гаммерштейна, общая схема которой приведена на рисунке 6.

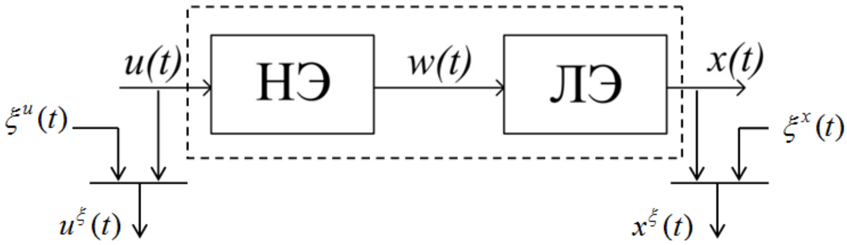

Рисунок 6 – Схема нелинейной системы

Связь между входной $u(t)$ и выходной $x(t)$ переменными объекта при нулевых начальных условиях может быть описана уравнением:

$$x(t) = \int\limits_0^t h'(t-\tau) f(\alpha, u(\tau)) d\tau, \tag{12}$$

где $f(u, \overline{a})$ – нелинейная функция, заданная с точностью до параметров $\overline{a}$.

Пусть $x^1(t)$ – реакция объекта на входной сигнал $u(t) = 1(t)$, $x(t)$ – реакция объекта на произвольный сигнал $u(t)$. Измерения $x^1(t)$ и $x(t)$ в дискретные моменты времени образуют выборки наблюдений соответственно $\{u_i, x^1{}_i, t_i\}$ и $\{u_i, x_i, t_i\}_i, i = \overline{1,s}$. Сигнал $u(t) = 1(t)$, после прохождения нелинейного элемента, сохраняет ступенчатую форму, но меняет значение, т.е. $w^1(t) = f(1(t), a) = \beta$, где β – некоторая константа. Обозначим $h_\beta(t) = \beta \cdot h(t)$. Выход системы (12) при

$u(t)=1(t)$ запишется в виде: $x^1(t)=\int_0^t h'_\beta(t-\tau)1(\tau)d\tau=\int_0^t h'_\beta(t-\tau)1(\tau)d\tau.$ Тогда $x^1(t)$ можно рассматривать как модель некоторой линейной системы с переходной функцией $h_\beta(t)$. Модель исследуемой системы (12) примет вид:

$$\hat{x}(t)=\int_0^t \hat{h}'_\beta(t-\tau)w(\tau)d\tau=\int_0^t \hat{h}'_\beta(t-\tau)f(u(\tau),a)d\tau. \qquad (13)$$

Оценки параметров $\bar{a}$ находятся на основе выборки $\{u_i,x_i\}, i=\overline{1,s}$.

Рассмотрим систему класса Гаммерштейна с квадратором, для которой выход НЭ вычисляется как: $w(t)=f(u,a)=au^2$. Модель исследуемого объекта:

$$x^1(t)=\int_0^t h'(t-\tau)w(\tau)d\tau=a\int_0^t h'(t-\tau)u^2(\tau)d\tau=a\int_0^t h'(t-\tau)d\tau. \qquad (14)$$

Оценка переходной функции будет иметь вид:

$$\hat{h}(t)=x^1(t)/a. \qquad (15)$$

Тогда непараметрическая модель нелинейного объекта, представленного в виде модели Гаммерштейна с квадратором:

$$\hat{x}(t)=\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta\tau}\hat{x}_i^1 H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u^2(\tau_j)\Delta\tau, \qquad (16)$$

где $x^1(t)$ – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие.

Пример. Модель системы Гаммерштейна, состоящей из квадратора и разностного аналога дифференциального уравнения (имитирующего объект): $x_i=1{,}965x_{i-1}-0.969x_{i-2}+0.004u(t_i)$, представлена на рисунке 7.

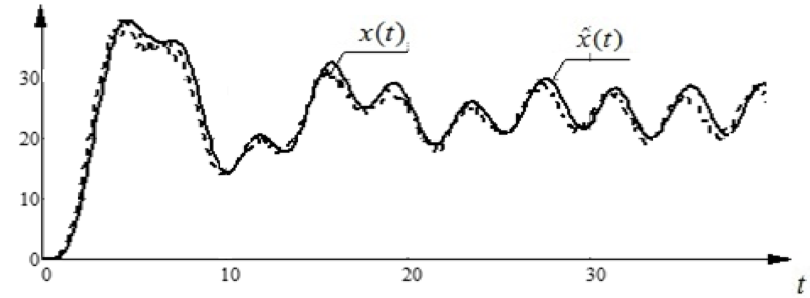

Рисунок 7 – Результат моделирования системы класса Гаммерштейна с квадратором, s=300, $u(t)=4sin(0{,}8t)$, Δt=0,117, помеха 5%, ошибка модели 3,2%

Далее рассмотрим задачу построения модели систем класса Гаммерштейна с насыщением, для которой НЭ описывается функцией вида звено с насыщением:

$$f(u)=\begin{cases} u, если & |u|\le b, \\ a\cdot sign(u), если & |u|>b, \end{cases} \qquad (17)$$

где a, b – некоторые неизвестные параметры.

Подадим на вход объекта воздействие $u(t)=1(t)$. Тогда выход нелинейной системы ($x^1(t)$) будет равен величине $x^1(t)=a\int_0^t \hat{h}'(t-\tau)d\tau$. Учитывая, что $x^1(t)=a\cdot\hat{h}(t)$ оценку переходной функции ЛЭ: $\hat{h}(t)=x^1(t)/\grave{a}$. Для оценивания параметров НЭ проводится серия экспериментов по схеме (*), в результате получим обучающую выборку: $\{u(t)_j, x(t)_j = x_y\}, j = 1,\overline{m}$. Модель нелинейного элемента примет вид (17), где a и b заменены их оценками. Тогда модель системы класса Гаммерштейна с насыщением:

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta\tau} \hat{h}_i H' \left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s} \right) \hat{f}(u(\tau_j))\Delta\tau. \qquad (18)$$

Пример. На рисунке 8 приведена модель системы класса Гаммерштейна, состоящей из звена с насыщением и разностного аналога дифференциального уравнения: $x_i = 1,804 x_{i-1} - 0,874 x_{i-2} + 0,035u(t_i)$.

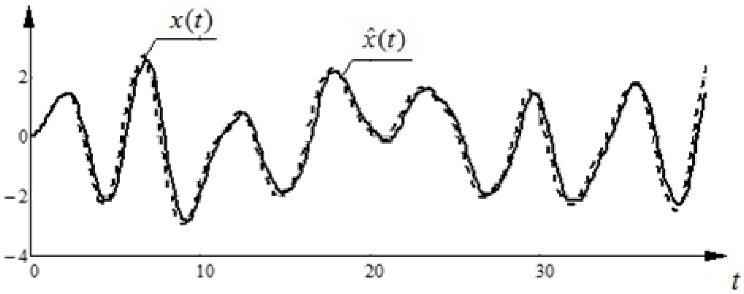

Рисунок 8 – Результат моделирования системы класса Гаммерштейна с насыщением, $x(t)$ – выход системы, s=200, помеха 5%, $u(t)=5cos(0,7t)\cos(0,4t-0,2)$

Как видно из результатов вычислительных экспериментов, предлагаемые алгоритмы моделирования достаточно точно описывают системы класса Винера и Гаммерштейна при различных значениях параметров нелинейной части объекта, в условиях зашумленности каналов связи, при различном объеме выборки и входных воздействиях.

Оценивание вида нелинейности моделей Винера и Гаммерштейна. Предлагается обобщение непараметрического метода идентификации для динамических систем, информация о структуре и параметрах НЭ которых отсутствует. Основная идея алгоритма в получении обучающей выборки, по которой строится модель нелинейной части системы. Для этого проводится серия из m экспериментов (*), в результате чего получим обучающую выборку

$$\{U,Q\}: U=\{u_1,u_2,..,u_m\},\ Q=\{q_1, q_2,..,q_m\}, \qquad (19)$$

где q_i – установившееся значение выхода системы $x(t)$ при входном воздействии $u(t)=u_i$. Причем $q_i=f(u_i)$.

На основании выборки (19) предлагается строить оценку функции нелинейного звена объекта в виде $q = \hat{f}(u)$, а также зависимость $u = g(q) = \hat{f}^{-1}(q)$, где $g(q)$ – оценка функции, обратной к $f(u)$.

Для построения математической модели НЭ $f(u)$ в работе предлагается применять формулу непараметрической оценки регрессии по данным наблюдений из обучающей выборки (19).

$$\hat{f}(u) = \sum_{i=1}^{m} q_i \Phi\left(\frac{u-u_i}{c_m}\right) \Bigg/ \sum_{i=1}^{m} \Phi\left(\frac{u-u_i}{c_m}\right) \qquad (20)$$

Обратную функцию $u = \hat{f}^{-1}(u)$ получаем в виде:

$$\hat{g}(q)=\hat{f}^{-1}(q)=\sum_{i=1}^{m}u_i\Phi\left(\frac{q-q_i}{c_m}\right)\Big/\sum_{i=1}^{m}u_i\Phi\left(\frac{q-q_i}{c_m}\right). \qquad (21)$$

Можно считать, что вид нелинейности системы определен с помощью оценок (20), (21). Выход исследуемого нелинейного объекта (например, системы класса Винера) определяется как:

$$\hat{x}(t)=\hat{f}\left[\frac{1}{sc_s}\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta t}\hat{g}(x_i^1)\cdot H'\left(\frac{t-\tau_j-t_i}{c_s}\right)u(\tau_j)\Delta\tau\right], \qquad (22)$$

где x_i^1 – реакция нелинейной системы на единичное входное воздействие.

Предложенный алгоритм позволяет во многих случаях оценить вид нелинейности динамической системы класса Винера или Гаммерштейна в условиях непараметрической неопределенности, а также построить ее модель, за исключением систем с неоднозначной нелинейностью.

В третьей главе диссертационной работы исследуются задача управления процессами класса Винера и Гаммерштейна в условиях частичной неопределенности, когда параметрическая модель объекта неизвестна.

При управлении процессами на промышленных предприятиях в основном применяют законы регулирования, основанные на принципе обратной связи (П, ПИ, ПИД регуляторы). Они эффективно используются при управлении техническими объектами, например, турбинами, котлоагрегатами ТЭЦ, плавильными печами и др. Качество управления зависит от настроек параметров регуляторов, и может оказаться недостаточно эффективными (например, при наличии помех в каналах измерения объекта, или если задающее воздействие представляет собой сложную функцию). Кроме того, данный вид регуляторов не является обучающимся (адаптивным) и при переходе из одного состояния в другое, регулятор не накапливает информацию о предыдущих состояниях объекта.

Для адаптивного управления нелинейными процессами классов Винера и Гаммерштейна в работе предлагаются методы создания регуляторов, основная особенность которых в том, что управляющее воздействие формируется на основании значений модели объекта, в связи с чем может подстраиваться под некоторые изменения объекта (его параметров, режима функционирования). Предлагается схема управления, представленная на рисунке 9.

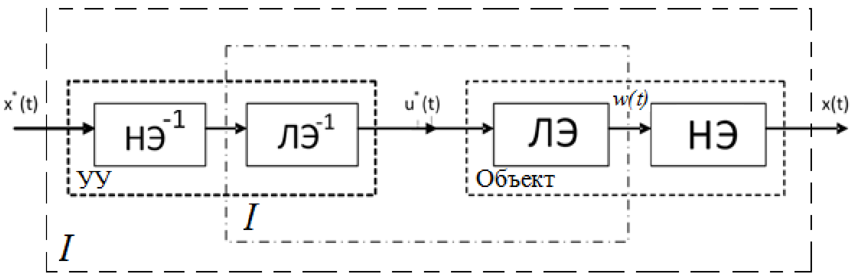

Рисунок 9 – Схема функционирования непараметрического регулятора для системы класса Винера, I – единичный оператор, ЛЭ$^{-1}$ – оператор, обратный к ЛЭ системы, НЭ$^{-1}$ – оператор, обратный к НЭ

Преобразование входных сигналов ЛЭ объекта $u(t)\in\Omega(u)$ в выходные $\omega(t)\in\Omega(\omega)$ можно рассматривать как некоторый линейный оператор A, переводящий $\Omega(u)$ в $\Omega(w)$. НЭ системы может быть представлен оператором B, преобразующим множества выходных сигналов ЛЭ $\omega(t) \in \Omega(w)$ в значения выхода объекта $x(t) \in \Omega(x)$. Получим описание системы в виде операторов:

$$w(t) = A\{u(t)\}, \tag{23}$$

$$x(t) = B\{w(t)\} = B\{A\{u(t)\}\}. \tag{24}$$

Пусть существуют обратные к A и B операторы, для которых: $AA^{-1} = I$, $BB^{-1} = I$, где I – единичный оператор. Тогда, зная желаемое значение выхода системы $x^*(t)$, можно сформировать управляющее воздействие:

$$u^*(t) = A^{-1}\{B^{-1}\{x^*(t)\}\}. \tag{25}$$

Если найти обратные операторы A^{-1} и B^{-1} для системы и «включить» на входе системы в обратном порядке, то выражение (25) может считаться регулятором для нелинейной системы класса Винера в условиях частичной неопределенности. Задавая траекторию $x^*(t)$, можно найти значение $u^*(t)$.

Пусть линейный элемент системы класса Винера описывается дифференциальным уравнением неизвестного порядка. Выход системы $x(t)$ описывается (6). Оператор A^{-1}, обратный к A (описывающему линейную динамическую часть системы) может быть описан интегралом свертки:

$$u(t) = A^{-1}w(t) = \int_0^t v'(\tau)\,\mathrm{w}(t-\tau)\,d\tau, \tag{26}$$

где $v(t)$ – переходная функция «обратного» процесса (в направлении «выход-вход»). Оператор B описывает функцию $f(\omega)$, причем пусть существует $B^{-1} = f^{-1}(x)$. Управляющее воздействие, соответствующее (26):

$$\begin{cases} u(t) = \int_0^t v'(t-\tau)w(\tau)d\tau \\ w(t) = f^{-1}(x^*(t)), \end{cases}, \tag{27}$$

Оценки характеристик $f^{-1}(x)$ и $v(t)$ могут быть получены на модели объекта. Задача управления нелинейными динамическими системами сводится к нахождению обратных операторов к функциям, описывающим линейную и нелинейную части системы. В качестве исходной информации используются переходные характеристики управляемого процесса. Далее строится непараметрическая модель объекта, которая в дальнейшем применяется для оценки значений переходных характеристик в направлении «выход-вход». Основная проблема здесь состоит в отыскании обратных операторов, что является достаточно сложной задачей в связи с тем, что точное описание исследуемого процесса чаще всего отсутствует, что и ограничивает возможности применения метода обратных операторов.

При построении модели системы в виде (4) получена оценка функции, описывающей нелинейный элемент – оператор B^{-1}. Обратной переходной функцией называется значение переменной $u(t)$, при котором выход ЛЭ $w(t)=1$, то есть необходимо решить уравнение:

$$\hat{w}(t) = \frac{1}{s \cdot c_s} \cdot \sum_{i=1}^{s} \sum_{j=1}^{t/\Delta t} \hat{h}_i \cdot H'\left(\frac{t - \tau_j - t_i}{c_s}\right) \cdot u(\tau_j)\Delta\tau = 1 \tag{28}$$

относительно $u(t)$. Здесь значения величин $h(t)$ и $w(t)$ – физически не измеряемые. Однако имеются их оценки в результате построения модели исследуемого объекта. Полученное значение $u(t)$ считается «обратной» переходной функцией и обозначается $u(t_i)=v(t)$:

$$\hat{v}(t)=\frac{1-\frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t-1}\hat{h}_i\cdot H'\left(\frac{t_j-t_i}{c_s}\right)\cdot f(u(t_j))\Delta t}{\frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}\hat{h}_i\cdot H'\left(\frac{t-t_j-t_i}{c_s}\right)\cdot\Delta t}, \tag{29}$$

где $\hat{h}_i=f^{-1}(x_i^1)$ – оценка переходной характеристики ЛЭ системы, $x^1(t)$ – выход нелинейной системы при единичном входном воздействии.

Управляющее воздействие находится в виде:

$$u^*(t)=\frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta\tau}\hat{v}_i\cdot H'\left(\frac{t-t_i-\tau_j}{c_{su}}\right)\cdot\hat{f}^{-1}(x^*(\tau_j))\Delta\tau, \tag{30}$$

где $x^*(t)$ – задающее воздействие.

Пример. Рассмотрим нелинейную динамическую систему класса Винера. Задающее воздействие принято в виде ступенчатой функции. На рисунке 10 приведен результат управления с применением алгоритма (30).

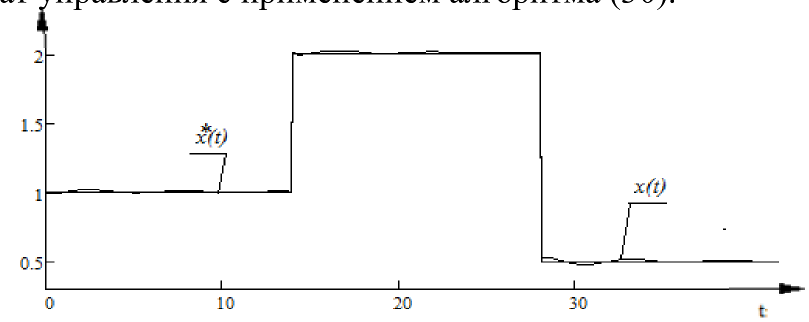

Рисунок 10 – Процесс управления объектом. $x(t)$ – выход управляемого объекта, $x^*(t)$ – желаемое значение выхода, помеха 5%, среднеквадратическая ошибка управления 0,003

Рисунок 10 иллюстрирует достаточно хорошее качество управления динамическим объектом в условиях непараметрической неопределенности.

Непараметрический алгоритм управления системой класса Гаммерштейна. В данном случае схема управления имеет следующий вид:

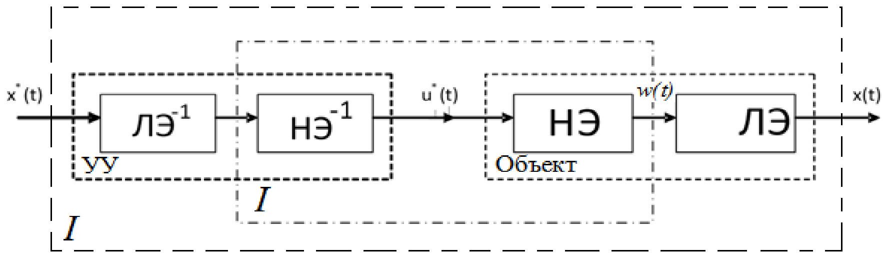

Рисунок 11 – Схема функционирования непараметрического регулятора для системы класса Гаммерштейна

При построении модели системы класса Гаммерштейна получена оценка функции, описывающей НЭ системы – следовательно, можно найти оператор B^{-1}.

Оператор A^{-1} , обратный к линейному A, может быть описан интегралом свертки. Управляющее воздействие:

$$u^*(t) = f^{-1}\left(\frac{1}{sc_s}\cdot\sum_{i=1}^{s}\sum_{j=1}^{t/\Delta\tau}\hat{v}_i\cdot H'\left(\frac{t-t_i-\tau_j}{c_{su}}\right)\cdot x^*(\tau_j)\Delta\tau\right). \qquad (31)$$

Предложенное управляющее устройство позволяет улучшить качество регулирования объектом. Вычислительные эксперименты, результаты которых представлены в данной главе, показали хорошую работоспособность предложенных алгоритмов.

Так как исследуются объекты, находятся в условиях помех, возможны неточности регулирования, вызванные погрешностью непараметрического оценивания обратного оператора, которые можно устранить, добавив дополнительный регулятор, включенный в схему управления динамической системой. В этом случае предлагается использовать замкнутую дуальную схему управления, представленную на рисунке 12.

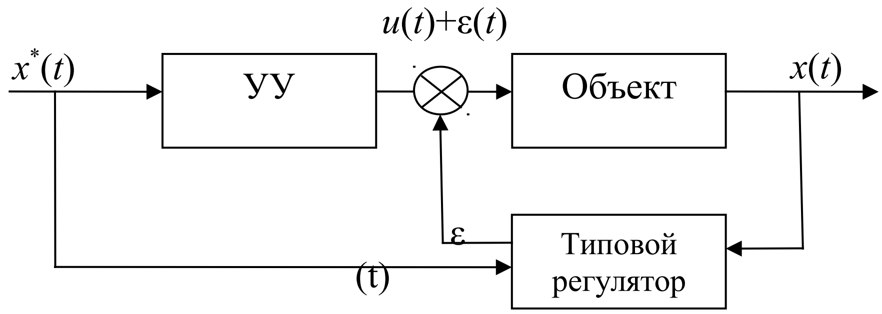

Рисунок 12 – Замкнутая схема системы управления, где объект – система класса Винера или Гаммерштейна, УУ – непараметрическое устройство управления (30), (31), *Типовой регулятор* – регулятор типа ПИ, ПИД, $\varepsilon(t)$ – сигнал, вырабатываемый в цепи обратной связи, x – выходная величина, x^* – задающее воздействие, поступающее на управляющее устройство

При реализации замкнутой схемы управляющее воздействие включает две составляющие:

$$\tilde{u}(t) = u^*(t) + \varepsilon(x^*(t), x(t)), \qquad (32)$$

где первое слагаемое на основании знаний об объекте управления формирует задающее воздействие вида (30), (31) для достижения желаемого отклика объекта, второе – корректирует отклонение управляемой величины, компенсирует влияние случайных помех. Такая схема формирования управляющего воздействия основана на принципе дуального управления.

Дуализм предложенного алгоритма заключается в том, что в схему, кроме непараметрического регулятора, добавлен компонент, формирующий управление по отклонению выхода от желаемого значения (например, пропорциональная схема регулятора). Добавленный компонент выполняет роль «изучающей» добавки, тогда как основной формирует управление на основе знаний об объекте (выраженных в его модели).

В четвертой главе диссертационной работы исследуется процесс сжигания угля на примере работы котлоагрегата №6 ОАО «Красноярская ТЭЦ-2». Данные для исследования представляли собой выборку переменных процесса за ноябрь 2014 года.

Входные переменные процесса можно разделить на управляемые по ходу процесса и неуправляемые. Применительно к процессу получения перегретого пара в котлоагрегате контролируемыми управляемыми переменными являются: u_1 – Температура пылеугольной смеси, ^{0}С, u_2 – Давление пылеугольной смеси, кгс/м^2, u_4 – Расход питательной воды, т/ч, u_7 – Давление воздуха, кгс/м^2, u_9 – Расход воздуха, м^3/ч. В качестве контролируемых неуправляемых по ходу процесса переменных $\mu(t)$ выступают: μ_1 – Содержание кислорода в пылеугольной смеси,%, μ_2 – Температура питательной воды, ^{0}С, μ_3 – Давление питательной воды, кгс/м^2, μ_4 – Температура воздуха, С°. К помехам $\xi(t)$, относят различные трудно формализуемые факторы, например, состояние датчиков измерения и регуляторов (в том числе временный выход из строя некоторых из них), действия операторов и др.. Выходные переменные $x(t)$: x_1 – Температура пара в паросборной камере, x_2 – Давление пара в паросборной камере, x_3 – Расход перегретого пара, т/ч, x_4 – Температура уходящих газов, x_5 – Содержание кислорода в дымовых газах,%.

В условиях установившегося режима функционирования, процесс сжигания угля в котлоагрегате управляется автоматически с использованием установленной АСУТП. Однако часто при необходимости смены режима или значений некоторых параметров (например, качество угля) в процесс управления вмешивается оператор, который руководствуется опытом, технологической картой и показаниями значений различных переменных (по которым ведется управление). В этом случае управление процессом значительно зависит от человеческого фактора и в результате часто получается недостаточно эффективным, в связи с чем настоящее исследование процесса сжигания угля в котлоагрегате ТЭЦ представляется актуальным.

В ходе исследований были построены непараметрические модели для прогнозирования значений основных выходных переменных в зависимости от значений входных переменных. На рисунке приведен график оценки значений температуры перегретого пара.

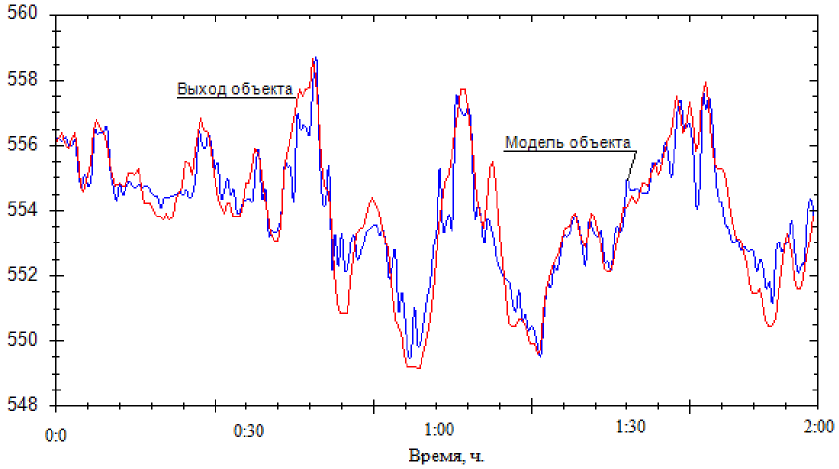

Рисунок 13 – Оценка зависимости температуры перегретого пара от входных переменных, относительная ошибка модели w=0,34, среднеквадратическое отклонение 2,31

Имеющиеся данные и результаты моделирования позволили провести эксперимент, связанный с управлением. В предлагаемую схему введен непараметрический регулятор, представляющий собой оценку обратного оператора процесса. Данный блок сохраняет информацию о значениях «входных-выходных» переменных процесса (μ, *x*, *u*). Предлагается замкнутая схема управления, в которой реализованы непараметрические модель и алгоритм управления, также сохранена схема управления по обратной связи.

Далее приведен прогноз результата управления значением температуры перегретого пара в зависимости от температуры пылеугольной смеси, содержания кислорода в пылеугольной смеси, температуры питательной воды к котлу и давления воздуха.

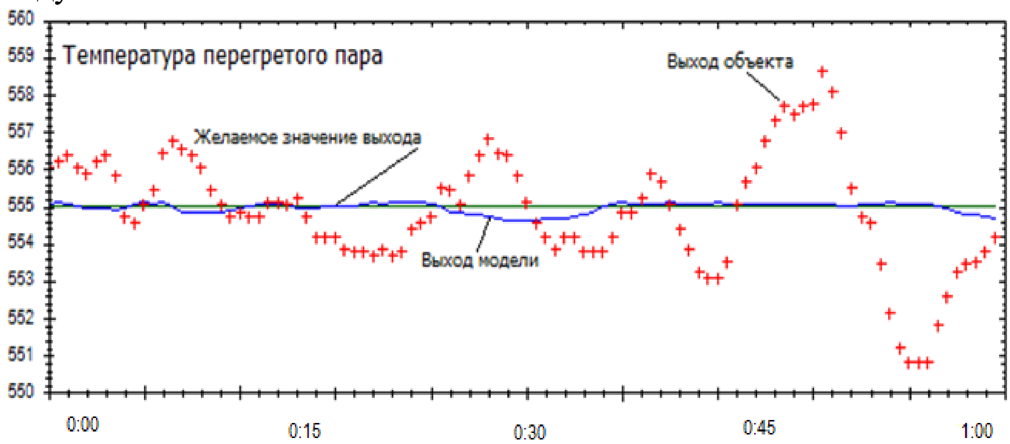

Рисунок 14 – Оценка результата управления значением температуры перегретого пара, выход объекта – значение температуры перегретого пара по имеющимся данным, выход модели – значение температуры пара в результате управления, объем выборки s=100, относительная ошибка управления 2,45

При этом сравнение подобных ситуаций по реальным данным, позволяет судить о том, что качество управления стало несколько выше. То есть управление процессом с применением непараметрического регулятора предположительно позволит вести процесс сжигания угля в достаточно малой окрестности от заданных значений выхода. Это позволяет существенно уменьшить ситуации, когда выход объекта значительно отличается от задания.

В ходе работы был предложен и реализован на данных ТЭЦ алгоритм оценивания эффективности регулятора в отсутствии возможности проведения реального эксперимента на объекте. Суть предложенного алгоритма заключается в том, что в качестве желаемого задаются значения выходных переменных из экзаменующей выборки. При этом рассчитанные значения управляющих воздействий возможно сравнить с истинными значениями этих переменных, которые взяты из экзаменующей выборки. В результате проведения эксперимента может быть сделан вывод об эффективности управления с применением непараметрического дуального алгоритма.

Полученные в ходе исследовании результаты показали, что управление процессом сжигания угля в котлоагрегате ведется в рамках технологического регламента, который является достаточно широким. Полученные непараметрические модели динамических систем дают хорошую основу для настройки используемых регуляторов в энергоблоке. В интерактивном режиме оператор, работая с системой «модель-регулятор», сможет подобрать желаемые параметры настройки действующих на предприятии ПИ, ПИД-регуляторов.

Заключение. В заключении приведены основные результаты диссертационной работы. В диссертационной работе рассмотрены задачи идентификации и управления нелинейными динамическими процессами класса Винера и Гаммерштейна в условиях частичной неопределенности. Подчеркивается важность построения моделей и алгоритмов управления в условиях недостатка информации, поскольку они во многих случаях являются более адекватными задачам практики. При создании автоматизированных систем управления многими технологическими объектами роль нелинейных элементов играют исполнительные механизмы, устанавливаемые на входе или выходе технологических аппаратов.

Основные выводы и результаты работы:

1) В ходе работы выполнен обзор существующих методов решения задачи идентификации нелинейных динамических систем, в том числе систем класса Винера и Гаммерштейна. Отмечены условия применения и основные особенности каждого из описанных подходов, в результате чего была поставлена задача повышения эффективности идентификации и управления системами рассматриваемого класса в условиях неполноты априорной информации путем разработки соответствующих методов.

2) Разработаны и исследованы непараметрические алгоритмы моделирования нелинейных динамических систем класса Винера и Гаммерштейна при различной априорной информации о типе нелинейного блока. Разработанный метод решения задачи идентификации нелинейных динамических систем предполагает оценивание параметров нелинейного элемента моделей класса Винера и Гаммерштейна в условиях частичной неопределеноности, когда его структура задана в общем виде (квадратор, звено с насыщением). Основное отличие предлагаемых алгоритмов идентификации от известных заключается в возможности применения в условиях отсутствия информации о порядке и параметрах дифференциального уравнения.

3) Разработан модифицированный непараметрический алгоритм оценивания вида нелинейного элемента моделей классов Винера и Гаммерштейна, применимый к решению задачи идентификации в условиях неопределенности, когда параметрическая структура линейного динамического и нелинейного безынерционного блоков неизвестна. Данный алгоритм основан на непараметрическом оценивании линейной и нелинейной частей системы.

4) Впервые предложены и разработаны адаптивные алгоритмы управления динамическими процессами класса Винера и Гаммерштейна, отличающиеся возможностью применения для эффективного управления процессом в условиях недостатка априорной информации о порядке и параметрах линейного динамического блока. Задача управления системами класса Винера и Гаммерштейна рассматривается в условиях частичной неопределенности. Предлагается класс алгоритмов непараметрического управления, который конструируется на основании снятых переходных характеристик объекта.

5) Алгоритмы решения исследуемых задач были реализованы в виде программ для проведения численных исследований на тестовых задачах. Программные решения были реализованы как приложения под Windows, написанные на языке программирования C#. Некоторые программы были зарегистрированы.

6) В результате проведения численных исследований была подтверждена эффективность предложенных непараметрических алгоритмов моделирования и управления для нелинейных дискретно-непрерывных процессов класса Винера и

Гаммерштейна в условиях помех, а также для управления при задающих воздействиях различного вида.

7) Практическая значимость и эффективность разработанных моделей и алгоритмов управления была подтверждена путем моделирования процесса сжигания угля в котлоагрегате ОАО «Красноярская ТЭЦ-2» и реализации эксперимента по управлению. Были построены непараметрические модели по выборочным данным для важнейших выходных переменных процесса. Вычислительные эксперименты показали, что управление процессом ведется в соответствии с технологическим регламентом, однако регулируемые величины отклоняются от требуемого значения в достаточно большом диапазоне. Предлагаемая схема управления позволит более рационально вести технологический процесс. Источниками экономического эффекта при автомиатизации энергоблока является уменьшение количества сжигаемого угля и экономия электроэнергии, а также существенное сокращение пережогов и недожогов. Непараметрические модели и алгоритмы управления также используются при разработке автоматизированной системы управления при кислородно-конвертерной плавке стали.

Основные публикации по теме диссертации

В изданиях, рекомендованных ВАК:

1 Коплярова Н.В. О непараметрических алгоритмах идентификации нелинейных динамических систем / Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева // Вестник СибГАУ. – Вып. 5 (45). – 2012. – С. 39-44.

2 Коплярова Н.В. Непараметрические алгоритмы идентификации систем класса Винера и Гаммерштейна / Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева // Системы управления и информационные технологии. – Вып. 2.1 (52). – 2013. – С. 133 - 137.

3 Коплярова Н.В. Непараметрическая идентификация систем класса Винера / Н.В. Коплярова // Современные проблемы науки и образования. – Вып.2. – 2014. – URL: http://www.science-education.ru/116-12309 (дата обращения: 07.03.2014).

4 Коплярова Н.В. Непараметрические модели динамических объектов класса Гаммершейна / Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева // Вестник СибГАУ. – Вып. 3 (55). – 2014. – С. 93-100.

5 Коплярова Н.В. Алгоритм идентификации систем класса Винера / Н.В. Коплярова // СибГАУ. – Вып. 5 (57). – 2014. – С. 67 - 77.

6 Коплярова Н.В. Непараметрические алгоритмы управления системами класса Гаммерштейна / Н.В. Коплярова, А.В. Медведев // Вестник СибГАУ. – Том 16 Вып. 1. – 2015. – С. 62 - 71.

7 Коплярова Н.В. О непараметрических моделях в задаче диагностики электрорадиоизделий / Коплярова Н.В., Орлов В.И., Сергеева Н.А., Федосов В.В.// Журнал Заводская лаборатория. Диагностика материалов №7. – 2014г. – с 73 - 77.

В других изданиях:

1 Коплярова Н.В. Nonparametric modeling of multimensional linear dynamical higher-order processes / Н.В. Коплярова, О.В. Шестернева, Л.А. Аешина // Труды X Всероссийской научной студенческой конференции с международным участием на

иностранном языке «Молодежь. Общество. Современная наука, техника и инновации», г. Красноярск, 2011. – С. 204.

2 Коплярова Н.В. О задаче моделирования нелинейных динамических процессов в условиях малой априорной информации / Н.В. Коплярова // Труды XV Международной научной конференции, посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева, г. Красноярск, 2011. – С. 456-457.

3 Коплярова Н.В. О непараметрическом алгоритме моделирования нелинейных динамических систем / Н.В. Коплярова // Молодой ученый. – Вып. 7(42). – 2012. – С. 23-28.

4 Коплярова Н.В. О непараметрических алгоритмах идентификации нелинейных динамических систем / Коплярова Н.В., Н.А. Сергеева // Информационные технологии моделирования и управления. – Вып.1 (79). – 2013. – С. 31-39.

5 Коплярова Н.В. О непараметрической идентификации нелинейных динамических систем / Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева // Труды Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Малые Винеровские чтения», г. Иркутск, 2013. – С. 115-120.

6 Коплярова Н.В. Непараметрическое моделирование нелинейных динамических систем / Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева // Труды XV Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», г. Самара, 2013. – С. 136-141.

7 Коплярова Н.В. О непараметрической идентификации нелинейных динамических процессов / Н.В. Коплярова, А.В. Медведев // Труды международной научно-технической конференции «Компьютерное моделирование 2013», г. Санкт-Петербург. – 2013. – С. 24-29.

8 Коплярова Н.В. О непараметрической идентификации нелинейных динамических систем / Н.В. Коплярова // Труды пятой международной конференции САИТ 2013, г. Красноярск. – Том 1. – 2013. – С. 105-111.

9 Коплярова Н.В. Идентификация нелинейных динамических систем в условиях непараметрической неопределенности / Н.В. Коплярова, Н.А. Сергеева // Кибернетика и высокие технологии XXI века: труды XIII международной научно-технической конференции, г. Воронеж. – 2013. – С. 66-74.

10 Koplyarova N.V. Nonparametric algorithm of Nonlinear dynamical system identification / N.V. Koplyarova, N.A. Sergeeva // Proceedings of the international workshop Applied methods of statistical analysis, Novosibirsk. – 2013. – P. 107-115.

11 Koplyarova N.V. Identification of nonlinear dynamical systems under conditions of little a priory information / N.V. Koplyarova, N.A. Sergeeva // Proceedings of the tenth international conference «Computer data analysis and modeling. Theoretical and applied stochastics», Minsk. – Volume 2. – 2013. – P. 64-67.

12 Коплярова Н.В. О задаче моделирования нелинейных динамических систем класса Винера / Н.В. Коплярова // Труды XVII Международной научной конференции «Решетневские чтения» (12-14 сентября 2013г.), г. Красноярск, 2013. – С. 30-32.

13 Коплярова Н.В. О непараметрической идентификации стохастических объектов класса Винера / Н.В. Коплярова // Труды IX Всероссийской научно-практической конференции «Системы автоматизации в образовании, науке и производстве (AS`2013)», г. Новокузнецк. – 2013. – С. 445-451.

14 Коплярова Н.В. О непараметрической идентификации нелинейных динамических систем в условиях недостатка априорной информации / Н.В. Коплярова // Труды Всероссийской молодёжной научно-практической конференции «Малые Винеровские чтения», г. Иркутск. – 2014. – С. 43-51.

15 Коплярова Н.В. О непараметрической идентификации нелинейной динамики при разнотипной априорной информации / Н.В. Коплярова, А.В. Медведев // Труды XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», г. Самара, 2014. – С. 30-32.

16 Коплярова Н.В. О задаче моделирования нелинейных динамических систем класса Винера/Н.В. Коплярова// Труды XVIII Международной научной конференции «Решетневские чтения», г. Красноярск, 2014. – С. 66-67.

17 Коплярова Н.В. Алгоритм управления системами класса Гаммерштейна в условиях непараметрической неопределенности / Н.В. Коплярова // Труды всероссийской научно-практической конференции «Винеровские чтения», г. Иркутск, 2015.

18 Коплярова Н.В. / Н.В. Коплярова // Труды XVI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», г. Самара, 2015. – С. 30-32.

19 Koplyarova, N.V. Research of Wiener type system nonparametric models / N.V. Koplyarova, A.V. Medvedev // Proceedings of the international workshop Applied methods of statistical analysis, Novosibirsk. – 2015. – P. 424-431 .(Scopus)

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

20 Коплярова Н.В., Сергеева Н.А. Непараметрическая модель процессов Гаммерштейна с Квадратором. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2014613306 от 24.03.2014.

21 Коплярова Н.В. Непараметрическая модель процессов Винера с квадратором. РОСПАТЕНТ. Свидетельство №2014612475 от 26.02.2014.

Коплярова Надежда Владимировна

Непараметрические модели и алгоритмы управления
нелинейными системами класса Винера и Гаммерштейна

Автореферат

Подписано к печати
Формат 60x84/16. Бумага писчая. Печ. л. 1.0
Тираж 100 экз. Заказ № ______
Отпечатано в отделе копировальной и множительной техники СибГАУ
660014 г. Красноярск, пр. им. газеты «Красноярский рабочий», 31