

ISSN 0002-3388

Номер 5

Сентябрь - Октябрь 2006

*ИЗВЕСТИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК*

# ТЕОРИЯ И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ



<http://www.naukaran.ru>  
<http://www.maik.ru>



“НАУКА”

## ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ

УДК 658.012.011.56

# ПОСТРОЕНИЕ РОБАСТНЫХ БАЗ ЗНАНИЙ НЕЧЁТКИХ РЕГУЛЯТОРОВ ДЛЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ СУЩЕСТВЕННО-НЕЛИНЕЙНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ. II. ОПТИМИЗАТОР БАЗ ЗНАНИЙ НА МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ И РОБАСТНОСТЬ ИСУ

© 2006 г. Л. В. Литвинцева, С. В. Ульянов, С. С. Ульянов  
Москва, ООО "МКГ КВАНТ"

Поступила в редакцию 19.01.06 г., после доработки 13.03.06 г.

Проведен структурный анализ интеллектуальных систем управления (ИСУ), описаны взаимосвязи с традиционными задачами теории и практики применения систем управления. Анализ результатов моделирования типовых структур ИСУ позволил установить следующий факт: применение (представленной в ч. I) технологии проектирования, основанной на использовании пачеткой нейронной сети (ННС) в общем случае не гарантирует достижения требуемой точности аппроксимации обучающего сигнала (ОС). В результате при существенном изменении внешних условий повышается уровень чувствительности объекта управления (ОУ), что приводит в целом к снижению робастности ИСУ и, как следствие, к потере надежности (точности) достижения поставленной цели управления. Для устранения отмеченного недостатка ННС применяется оптимизатор баз знаний (ОБЗ), использующий технологию мягких вычислений и позволяющий устранить отмеченные недостатки, что способствует повышению уровня робастности структуры ИСУ. Рассматривается структура ОБЗ, содержащая как частный случай требуемую конфигурацию оптимальной ННС. Описаны основные особенности функциональной работы ОБЗ и этапы процесса технологии проектирования робастных баз знаний (БЗ) нечетких регуляторов (НР). Обсуждается методология объединенного стохастического и нечеткого моделирования САУ на базе разработанного инструментария ОБЗ с целью проверки робастности и оценки предельных структурных возможностей ИСУ. Эффективность процессов управления с ОБЗ демонстрируется на конкретных типовых примерах ("Benchmarks") моделей динамических ОУ в условиях неполноты информации о параметрах структуры ОУ и при наличии непредвиденных (внештатных) ситуаций управления. Приведены примеры промышленного применения робастных ИСУ в реальных ОУ, спроектированных на основе ОБЗ. Даны практические рекомендации повышения уровня робастности ИСУ за счет использования новых видов вычислений и имитационного моделирования.

**Введение.** Инженерные методы теории управления и технологии проектирования систем автоматического управления (САУ) сформированы в прошлом столетии. Были заложены, в частности, основы стохастического и адаптивного управления сложными динамическими системами (в общем случае с переменной структурой) в условиях информационной неопределенности.

Следующим шагом в этом направлении явилась разработка принципов моделирования и проектирования нечетких САУ в условиях неопределенности, учитывающая индивидуальные особенности поведения выборочных траекторий движения ОУ [1]. За основу данной методологии проектирования принята теория лингвистической аппроксимации и нечеткого вывода (Л. Заде и др.) для создания робастных БЗ интеллектуальных НР [2, 3]. В рамках указанной методологии проектирования законов управления на основе физических методов (информационно-термоди-

намические и квантово-релятивистские методы описания ОУ и процессов управления [4]) в середине 70-х годов прошлого столетия были заложены основы технологии проектирования интеллектуальных САУ (ИСУ) [5–8].

*Примечание 1.* Одним из важных элементов наукоемкой информационной технологии проектирования ИСУ является разработка методологии и соответствующей программно-аппаратной поддержки процессов проверки и оценки уровней робастности спроектированной структуры ИСУ (как меры чувствительности к различным внешним и внутренним случайным возмущениям, действующим как на ОУ, так и в каналах измерений или контурах управления). Актуальность решения данной проблемы диктовалась практически теми задачами управления, рассматриваемыми многими исследователями [2, 3, 9–12].

Увеличение сложности структур ОУ и трудности прогнозирования непредвиденных (внештат-

ных) ситуаций управления только усиливают внимание к поиску ее решения. Такого рода задачи относятся к так называемой проблеме “System of Systems Engineering”, изучающей в общем виде сложные структуры САУ с различными уровнями и шкалами интеграции и/или приоритетным обменом информации между подсистемами с целью установления глобальных (необходимых и достаточных) условий надежного автономного функционирования ОУ во внешней среде.

*Примечание 2.* В практике построения САУ в ряде случаев применяются линеаризованные модели ОУ. Однако при таком подходе часто теряется адекватность между физическими параметрами ОУ и параметрами его линеаризованной математической модели. В работе при оптимизации структуры и параметров ИСУ рассматриваются нелинейные модели ОУ. При этом влияние нелинейностей на динамику и управляемость ОУ учитывается в законах управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД (PID)-регулятора. Таким образом, методами технологии мягких вычислений влияние нелинейностей в ОУ компенсируется за счет динамического изменения коэффициентов пропорциональности в классическом ПИД-регуляторе с глобальной отрицательной обратной связью (ГООС).

На практике ОУ находятся в условиях неопределенности, связанной с влиянием как внешних, так и внутренних случайных факторов. Способность САУ адекватно реагировать на те или иные изменения параметров окружающей среды, изначально не заданные при проектировании САУ, характеризует уровень и способность к обучению, адаптации и робастности процессов управления. Методы теории робастного управления часто не в состоянии решать общие задачи управления при наличии неопределенности, описываемой в виде некоторого случайного процесса с определенными (в общем случае неизвестными) статистическими характеристиками (функциями распределения вероятностей). Ряд подходов к решению данной задачи на основе итеративных рандомизированных алгоритмов разработан в [10, 11].

В статье оценка чувствительности и повышение уровня робастности достигается, в частности, за счет применения алгоритмов нелинейных формирующих фильтров для воспроизведения реализаций (информативно представительных выборочных траекторий) стохастических воздействий с заданными характеристиками (см. Приложение). В процессе оптимизации параметров САУ данный подход стохастического моделирования используется совместно с методом нечеткого моделирования с целью достижения требуемого качества управления вне зависимости от конкретной реализации возмущающего стохастического воздействия. Рассматривается методология объ-

единенного стохастического и нечеткого моделирования САУ на основе разработанного инструментария ОБЗ с целью проверки робастности и оценки предельных, структурных возможностей ИСУ. Эффективность процессов управления с применением ОБЗ демонстрируется на конкретных типовых примерах моделей динамических ОУ в условиях неполноты информации о параметрах структуры ОУ и при наличии непредвиденных (внештатных) ситуаций управления.

Таким образом, в связи с тем, что в рамках классического подхода к построению САУ не удается добиться существенного улучшения качества управления и уровня робастности получаемых законов управления, актуальной проблемой остается разработка методов математического моделирования алгоритмов интеллектуального управления нелинейными динамическими системами на основе мягких вычислений и программных средств их поддержки. Решению именно этих проблем посвящена работа.

Поскольку основным звеном в технологии проектирования ИСУ является этап формирования соответствующей БЗ [1, 3], то проектирование БЗ с необходимым уровнем робастности при наличии непредвиденных ситуаций управления позволяет в общем виде установить соответствие между условиями функционирования ОУ и требуемым уровнем робастности ИСУ.

Основное внимание в статье сконцентрировано на описании конкретных результатов проектирования БЗ и моделирования ИСУ сложными, существенно-нелинейными ОУ со случайно изменяющейся структурой и задающими сигналами (целями управления). Цель работы в этом случае – определение уровней робастности процессов управления, обеспечивающих требуемые показатели надежности и точности в условиях неопределенности информации, используемой для принятия решений. Рассмотрим, прежде всего, эволюцию типовых структур ИСУ, их особенности, достоинства и недостатки с точки зрения технологии проектирования и применения ИСУ.

**1. Особенности технологии проектирования структур робастных ИСУ.** Одна из основных задач проектирования ИСУ заключается в том, чтобы разработанная (выбранная) структура обладала требуемыми уровнями качества управления и робастности (поддерживала необходимые показатели надежности и точности управления в условиях неопределенности информации). При этом одной из приоритетных и трудно решаемых задач проектирования ИСУ остается построение робастных БЗ, поддерживающих функционирование ИСУ в условиях неопределенности информации. Ядро технологии проектирования робастных БЗ ИСУ составляют новые типы вычислений и процессов моделирования [3, 7, 9].

Использование структур ИСУ, основанных на новых типах вычислений (таких, как мягкие, квантовые и т.п.), в последние годы привлекают все большее внимание специалистов [1–9, 11–13]. Проведенные многочисленные исследования показывают, что они обладают следующими достоинствами:

сохраняют главные преимущества традиционных САУ (по таким показателям, как устойчивость, управляемость, наблюдаемость и т.п.);

имеют оптимальную (с точки зрения заданного критерия качества управления) БЗ, а также возможность ее коррекции и адаптации к изменяющейся ситуации управления;

гарантируют достижение требуемого качества управления на основе спроектированной БЗ;

являются открытыми системами, т.е. позволяют вводить дополнительные критерии качества управления и ограничения на характеристики процесса управления.

Одной из ведущих задач современной теории управления является разработка и проектирование САУ, отвечающих трем основным требованиям: устойчивость, управляемость и робастность [2, 3, 9–11]. Перечисленные критерии качества управления обеспечивают необходимую точность управления и надежность работы ОУ в условиях неполной информации о внешних возмущениях и помехах в каналах измерения и управления, неопределенности структуры или параметров ОУ или ограниченной возможности формализованного описания цели управления.

Решение данной задачи осуществляется в три этапа:

1) определяются характеристики устойчивости ОУ при фиксированных условиях его работы во внешней среде;

2) формируется закон управления, обеспечивающий устойчивость работы ОУ при заданной точности управления (по заданному критерию оптимального управления);

3) проверяется чувствительность и робастность динамического поведения ОУ для разных классов случайных возмущений и помех.

Данные этапы проектирования рассматриваются современной теорией управления как относительно независимые. Основная проблема проектирования САУ – определение оптимального взаимоотношения между этими тремя показателями качества управления.

Для робастных структур САУ может быть доказан физический принцип управления, позволяющий установить в аналитическом виде соответствие между требуемыми уровнями устойчивости, управляемости и робастности управления [1–3, 8, 12]. А значит, определить необходимый уровень

интеллектуальности САУ в зависимости от сложности конкретной проблемы управления.

Пример 1. Кратко рассмотрим основные физические принципы процессов управления, позволяющие устанавливать взаимосвязь между качественными динамическими характеристиками ОУ и исполнительного устройства САУ: устойчивостью, управляемостью и робастностью управления. Для этой цели привлечем информационный и термодинамический подходы, объединяющие однородным условием критерии динамической устойчивости (функция Ляпунова), управляемости и робастности [2]. Рассмотрим динамический ОУ, задаваемый (в общем виде) уравнением

$$\frac{dq}{dt} = \varphi(q, S(t), tu), \quad (1.1)$$

где  $q$  – вектор обобщенных координат, описывающий динамику ОУ,  $S(t)$  – обобщенная энтропия динамической системы (1.1);  $u$  – управляющая сила (выход исполнительного устройства САУ),  $t$  – время. Необходимые и достаточные условия асимптотической устойчивости динамической системы (1.1) определяются физическими ограничениями на вид функции Ляпунова, которая имеет два важных свойства, представленных следующими условиями:

1) строго положительная функция от обобщенных координат, т.е.,  $V > 0$ ;

2) полная производная по времени от функции Ляпунова является неположительной функцией  $\frac{dV}{dt} \leq 0$ .

Согласно условиям 1) и 2) в качестве обобщенной функции Ляпунова выберем функцию [12]

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i^2 + \frac{1}{2} S^2, \quad (1.2)$$

где  $S = S_p - S_c$  – производство энтропии в открытой системе “ОУ + регулятор”;  $S_p = \Psi(q, \dot{q}, t)$  – производство энтропии в ОУ, а  $S_c = Y(\dot{e}, t)$  – в регуляторе (в исполнительном устройстве САУ). Введение энтропийных характеристик в уравнения (1.1) и (1.2) возможно в силу скалярного свойства энтропии как функции времени,  $\dot{S}(t)$  [2].

*Примечание 3.* Следует отметить, что наличие в (1.1) производства энтропии как параметра отражает динамику поведения ОУ и приводит к новому классу существенно-нелинейных динамических САУ. Выбор в качестве функции пригодности в генетическом алгоритме (ГА) минимума производства энтропии как в ОУ, так и в нечетком ПИД-регуляторе позволяет получать физически реализуемые робастные законы управления коэффициентами усиления в нечетком ПИД-

регуляторе [8]. Производство энтропии динамической системы характеризуется однозначно параметрами нелинейной динамической САУ, что приводит в задачах оптимизации к определению оптимальной выборочной траектории из множества возможных траекторий [2, 3, 12].

Первое условие реализуется автоматически.

Потребуем выполнения второго условия  $\frac{dV}{dt} \leq 0$ .

В этом случае полная производная от функции Ляпунова, (1.2) описывается уравнением

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{1}{2} \sum 2\dot{q}_i \dot{q}_i + \frac{1}{2} 2S\dot{S} = \sum_{i=1}^n \dot{q}_i \dot{q}_i + S\dot{S} = \\ &= \sum_{i=1}^n q_i \Phi(q, S, t, u) + (S_p - S_c)(\dot{S}_p - \dot{S}_c). \end{aligned}$$

Таким образом, учитывая (1.1) и введенные ранее обозначения, имеем

$$\begin{aligned} \underbrace{\frac{dV}{dt}}_{\text{устойчивость}} &= \\ &= \underbrace{\sum_{i=1}^n q_i \Phi(q, (\Psi - \Upsilon), t, u)}_{\text{управляемость}} + \underbrace{(\Psi - \Upsilon)(\dot{\Psi} - \dot{\Upsilon})}_{\text{робастность}} \leq 0. \end{aligned} \quad (1.3)$$

Соотношение (1.3) – обобщение результатов [1, 8, 12] и связывает свойства устойчивости, управляемости и робастности.

*Примечание 4.* Принципиальным отличием соотношения (1.3) от ранее рассматриваемого в [1–3, 8, 12] является наличие производства энтропии в уравнении движения ОУ. Практическое применение закона управления (1.3) к традиционным задачам, таким как оценки точности (грубости) линеаризации моделей ОУ, наблюдаемости параметров процессов управления и др., рассмотрено в [2, 3, 12]. Здесь отметим, что член  $\sum_i q_i \dot{q}_i$

характеризует дополнительную возможность работы с физической моделью ОУ без применения математической модели, используя непосредственно измерение показателей динамики функционирования ОУ. В этом случае имеем обобщение модели ОУ в виде “черного ящика”. Другие подходы энтропийного анализа динамических систем описаны в [14–17].

Уравнение (1.3) объединяет в аналитической форме различные меры качества управления: *устойчивость, управляемость и робастность*, поддерживающие его требуемую надежность и точность. Следовательно, взаимосвязь между устойчивостью по Ляпунову и робастностью, описанной уравнением (1.3), является основным физическим законом для проектирования САУ. Этот закон служит основой прикладной технологии проектирования БЗ робастных ИСУ (с раз-

личными уровнями интеллектуальности [2, 3]) с использованием аппарата мягких вычислений. В заключение данного раздела приведем следующие выводы.

1. Введенный физический закон интеллектуального управления (1.3) определяет основу проектирования робастных БЗ ИСУ (с различными уровнями интеллектуальности), использующих технологии мягких вычислений.

2. Мягкие вычисления делают возможной разработку универсального аппроксиматора в виде нечеткой САУ, который извлекает информацию из данных моделирования динамики поведения ОУ и исполнительного устройства в самой САУ.

3. Применение технологии мягких вычислений гарантирует целенаправленное достижение соответствующего уровня робастности за счет оптимального проектирования общего количества производных правил и типов функций принадлежности в БЗ [3, 18].

На рис. 1 и 2 показаны типовые критерии качества управления, их взаимоотношение с различными видами вычислений и типами моделирования, а также иерархия уровней качества управления в зависимости от требуемого уровня интеллектуальности САУ.

На рис. 3 представлены основные компоненты и их взаимосвязи в информационной технологии проектирования (ИТП), основанной на новых видах вычислений (мягких и квантовых). Ключевой пункт данной ИТП – использование метода извлечения объективного знания о процессе управления независимо от субъективного опыта экспертов и проектирование объективных БЗ ИР [3, 18], являющихся главной составной частью робастной ИСУ. Выходным результатом применения данной ИТП служит робастная БЗ ИР, позволяющая ИСУ функционировать при различных видах и типах информационной неопределенности.

**2. Эволюция процессов оптимизации и структурный анализ ИСУ.** Задачи оптимального управления существенно нелинейными и глобально неустойчивыми ОУ исследовались при наличии различных типов стохастических возмущений (в качестве ОУ рассматривалось множество типовых существенно нелинейных осцилляторов). С помощью разработанной системы стохастического моделирования определялись предельные возможности классических САУ, основанных на использовании исполнительного устройства в виде традиционного ПИД-регулятора (см. табл. 1, позиция 1). В результате проведенного исследования был установлен следующий факт: классические САУ, содержащие ПИД-регулятор с постоянными коэффициентами усиления, часто не справляются с задачей управления в случае глобально неустойчивых и существенно нелинейных ОУ, находящихся под воздействием

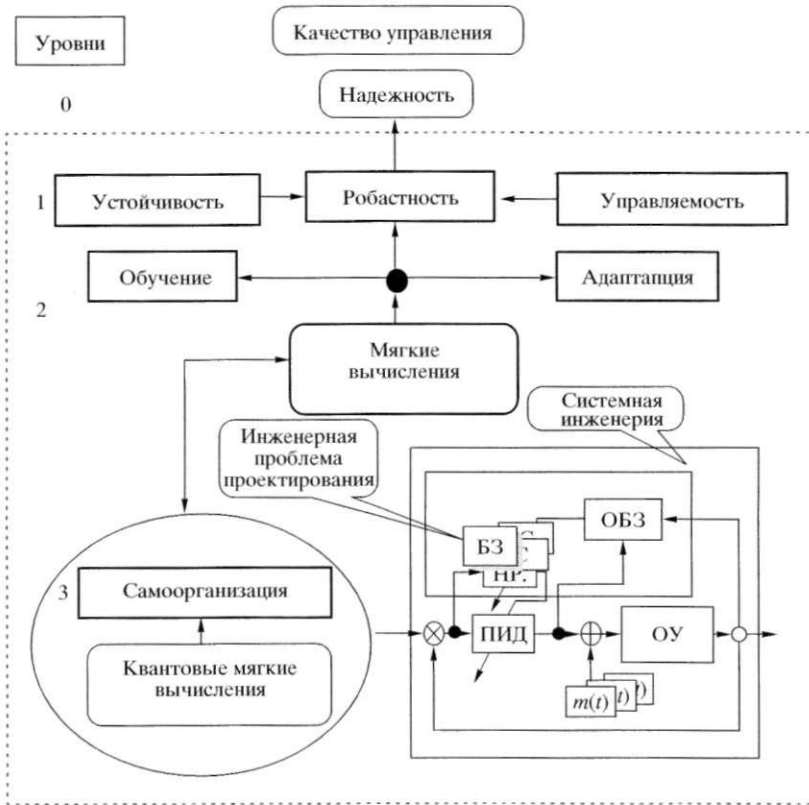


Рис. 1. Взаимоотношение между типами и иерархическими уровнями критериев качества управления.



Рис. 2. Взаимоотношение между критериями качества управления, видами интеллектуальных вычислений и моделирования в технологии проектирования робастных БЗ НР.



Рис. 3. Процесс разработки и создания информационной технологии проектирования интегрированной интеллектуальной системы управления.

негауссовского (например, рэлеевского) стохастического шума, а также в условиях наличия временных задержек в каналах измерения и управления.

Этот факт объясняется следующими обстоятельствами. Классические САУ базируются на принципе ГООС и методе компенсации ошибки управления. Однако в сложных ОУ (упомянутых выше) недостаточно учитывать результат оптимизации только по одному критерию качества управления, типа минимума ошибки управления. Поэтому в практике проектирования ИСУ сложными ОУ возникает следующая проблема: как ввести в систему управления другие, дополнительные критерии качества управления? К таким критериям относятся, например, упомянутые выше критерии минимума производства энтропии в ОУ и/или в самой САУ (учитывающие тепловые потери, потери полезной работы в объекте и системе управления), а также другие более сложные векторные критерии качества управления.

Разрешить этот вопрос с помощью процесса проектирования стандартного ПИД-регулятора с постоянными коэффициентами усиления практически невозможно. Ограниченные возможности по реализации сложных критериев качества управления в классических САУ, особенно в указанных выше случаях управления, послужили стимулом к развитию ИСУ, основанных на использовании стратегий управления, формируемых человеком-экспертом (в сложных непредвиденных ситуациях

управления и принятия решений). В работе критерии качества управления рассматриваются в этом случае как компоненты векторной функции пригодности соответствующего ГА в ОБЗ.

2.1. Поколения и эволюция типовых структур ИСУ. В табл. 1 приведена обобщенная эволюция развития и формирования структур ИСУ, их особенности, достоинства и недостатки, а также уровни качества управления, содержащиеся в этих структурах.

Для моделирования “человеко-машинных” стратегий управления на первом этапе стали использоваться так называемые мягкие вычисления, в основе которых лежит теория нечетких множеств и нечеткого вывода [1–3]. Так, например, представленная в табл. 1, позиция 1 структура преобразуется в экспертную систему (ЭС) управления последовательным наращиванием составляющих блоков в классическом варианте САУ (в данном случае введением блока нечеткого вывода), (табл. 1, позиция 2) [2] и является примером первого поколения ИСУ.

Таким образом, первое поколение ИСУ рассматривались как ЭС с различными по глубине представлениями знаний. Основную роль в этих ЭС играло качество БЗ, которое зависит от опыта и субъективных знаний человека-эксперта. Однако в случае управления глобально неустойчивыми и существенно нелинейными ОУ, находящимися под воздействием сложных стохастиче-



Таблица 1. Эволюция процесса проектирования структур робастных ИСУ, основанных на знаниях, и взаимосвязь с классической теорией управления


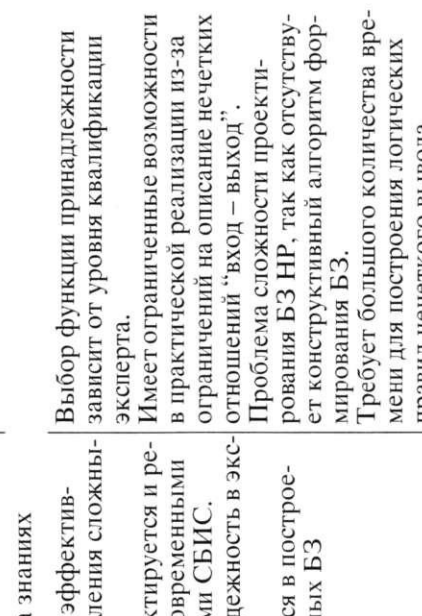
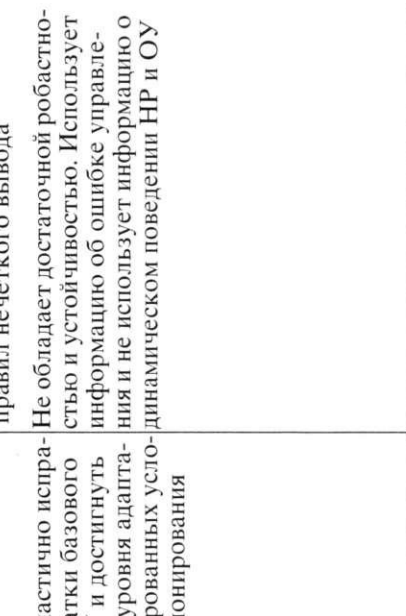
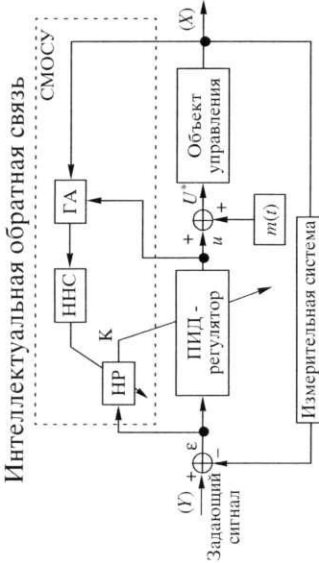
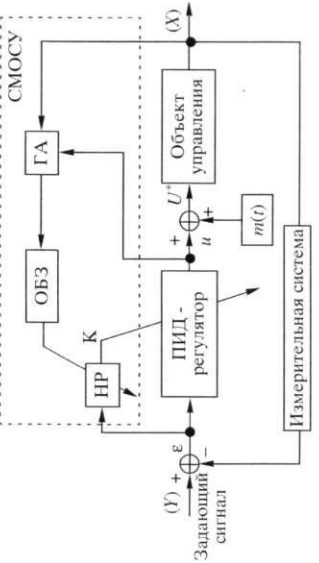
Структуры систем управления и эволюция развития	Уровни качества управления	Преимущества	Предельные возможности
<p>Позиция 1</p>  <p>Базовый элемент САУ</p>	<p>Устойчивость. Управляемость. Точность управления</p>	<p>Простота моделирования и физической реализации (min сложность). Простота при НВ реализации.</p> <p>При минимальной сложности ОУ минимально обеспечивает устойчивость и управляемость. Гарантирует необходимые условия качества управления, но недостаточные</p>	<p>При изменении внешних условий или сложности ОУ не обеспечивается достаточные условия. Устойчивости и управляемости (отсутствие требуемого уровня робастности). Жесткая (неадаптивная) структура. Не обладает способностью к обучению и самоорганизации</p>
<p>Позиция 2</p>  <p>Интеллектуальные системы управления, основанные на знаниях</p> <p>Базовый элемент ИСУ</p>	<p>Устойчивость. Управляемость. Точность управления. Частичная адаптация</p>	<p>Простота и эффективность управления сложными ОУ. Легко проектируется и анализуется современными технологиями СБИС. Высокая надежность в эксплуатации. Используется в построении робастных БЗ</p>	<p>Выбор функции принадлежности зависит от уровня квалификации эксперта. Имеет ограниченные возможности в практической реализации из-за ограничений на описание нечетких отношений "вход – выход". Проблема сложности проектирования БЗ НР, так как отсутствует конструктивный алгоритм формирования БЗ. Требуется большое количество правил нечеткого вывода</p>
<p>Позиция 3</p>  <p>Блок извлечения знаний и формирования БЗ</p>	<p>Устойчивость. Управляемость. Точность управления. Адаптация</p>	<p>Позволяет частично исправить недостатки базового уровня ИСУ и достигнуть требуемого уровня адаптации в фиксированных условиях функционирования ОУ</p>	<p>Не обладает достаточной робастностью и устойчивостью. Использует информацию об ошибке управления и не использует информацию о динамическом поведении НР и ОУ</p>



Таблица 1. Окончание

	Структуры систем управления и эволюция развития	Уровни качества управления	Преимущества	Пределные возможности
<p>Позиция 4</p>	<p>Интеллектуальная обратная связь</p> 	<p>Устойчивость. Управляемость. Точность управления. Адаптация. Обучение. Частичная самоорганизация</p>	<p>Обратная интеллектуальная связь позволяет извлекать объективные знания и построить БЗ НК. Позволяет охватить новый уровень качества управления (частичная самоорганизация)</p>	<p>ННС не гарантирует требуемую точность аппроксимации обучающего сигнала с выхода ГА. При резком изменении внешних условий повышает чувствительность ОУ (снижает робастность)</p>
<p>Позиция 5</p>	<p>Оптимизатор БЗ на мягких вычислениях</p> 	<p>Устойчивость. Управляемость. Точность управления. Адаптация. Обучение. Самоорганизация заданного уровня</p>	<p>Сохраняет преимущества предыдущих уровней ИСУ и составляет основу для технологии проектирования ИСУ. Позволяет осуществить оптимизацию БЗ. Гарантирует достижимость требуемого качества управления на основе спроектированной БЗ. Является открытой системой, которая позволяет вводить дополнительные критерии качества управления. Позволяет создавать БД для последующего этапа технологии проектирования, основанной на квантовых вычислениях</p>	<p>В силу предельных возможностей поискового алгоритма, как ГА, может гарантировать качество управления только на фиксированном пространстве поиска решений. Процесс проектирования БЗ осуществляется методом комбинаторного поиска на дереве решений</p>

ских шумов, даже опытному человеку-эксперту трудно подобрать оптимальную (с точки зрения качества управления) БЗ НР. Эта проблема – узкое место всех первых (и их последующих модификаций) ИСУ [2, 3]. Поэтому использование ЭС в качестве инструмента извлечения знаний и формирования БЗ (как основы технологии проектирования ИСУ) не привело к ожидаемому существенному успеху (хотя существует много примеров промышленного внедрения [5, 19]) в силу сложности ОУ и субъективности информации, вносимой экспертом.

С точки зрения технологии проектирования основной проблемой внедрения ИСУ первого поколения являлась их слабая адаптивность к изменениям параметров ОУ (вызванных, например, старением структуры ОУ или резким изменением внешней среды), а также низкая робастность полученных законов управления. Для решения подобных проблем были разработаны ИСУ второго поколения с глубинным представлением знаний, используя технологии так называемых мягких вычислений, объединяющие в единую цепочку ГА, ННС и НР. Это позволило исключить субъективное мнение эксперта на этапе формирования структуры и параметров БЗ НР. В свою очередь развитие ИСУ, основанных на мягких вычислениях, породило несколько подходов к представлению структур БЗ. Первоначально планировалось формировать некоторый достаточно огрубленный обучающий сигнал (ОС) от ГА и извлекать БЗ путем аппроксимации полученного ОС на ННС. Структура ИСУ второго поколения сформирована путем введения в структуру ИСУ первого поколения блока, включающего в себя ГА и ННС (табл. 1, позиция 3).

В дальнейшем второе поколение ИСУ стало использовать новый вид обратной связи, называемой глобальной интеллектуальной обратной связью (ГИОС) [1, 3, 8, 12, 18], представленной в табл. 1, позиция 4. Это дает возможность извлекать объективные знания непосредственно из самого динамического процесса поведения ОУ и исполнительного устройства САУ. Контур ГИОС включает ГА для получения информации об оптимальном сигнале управления (исходя из динамического и термодинамического поведения ОУ и ПИД-регулятора) и ННС, аппроксимирующей данный оптимальный сигнал управления с помощью заданной структуры нейронной сети. Такой подход рассмотрен в [1].

Основным блоком в структуре ИСУ (табл. 1, позиция 5) выступает система моделирования оптимального сигнала управления (СМОСУ) с помощью ГА и критерия качества управления, представленного в виде одной из составляющих вектор-функции пригодности ГА. Выходом СМОСУ служит ОС оптимального управления в

виде следующих входных/выходных данных:  $\{E(t_i), K(t_i)\}$ ,  $i = 1, \dots, n$ , где  $E(t_i) = \{e(t_i), \dot{e}(t_i), \int e(t_i) dt_i\}$  – вектор, компонентами которого являются ошибка управления, ее производная и интеграл ошибки соответственно;  $K(t_i) = \{k_p(t_i), k_d(t_i), k_i(t_i)\}$  – оптимальные (с точки зрения заданной функции пригодности ГА) параметры ПИД-регулятора;  $t_i$  – момент времени.

Используя ОС и механизм супервизорного обучения ННС, основанный на методе обратного распространения ошибки, можно построить БЗ НР, представленного данной ННС. Этот этап обозначен как шаг 1 на рис. 3 и подробно описан в [1].

Основное преимущество ИСУ второго поколения с ГИОС состоит в возможности достижения требуемого уровня робастности на заданном классе как параметрических, так и внешних случайных возмущений различной вероятностной природы (с различными функциями плотности распределения вероятностей). Моделируя поведение ОУ на множестве выбранных типовых существенно-нелинейных осцилляторов, было проведено исследование предельных возможностей ИСУ. В результате установлено, что в случае неустойчивых и существенно-нелинейных ОУ, а также при воздействии на них рэлеевского стохастического шума обеспечивается определенный уровень робастности для частных классов случайных возмущений. Однако не удастся построить робастную БЗ, используя только шаг 1 технологии построения БЗ ИСУ (рис. 3) [3, 18].

Анализ результатов моделирования САУ на базе первого этапа разработанной технологии проектирования БЗ показал, что основной недостаток – неоптимальный выбор структуры ННС, аппроксимирующей ОС. Как правило, в системах проектирования БЗ ИСУ такого типа построение соответствующей структуры ННС возложено на опытного человека-эксперта. В этом случае ОС разделен на входные и выходные составляющие, каждая из которых в свою очередь состоит из одного и более сигналов. В общем виде каждый из исследуемых сигналов описывается выборочной (представительной) траекторией некоторого случайного процесса. При этом подразумевается, что в каждый момент времени существует зависимость между входными и выходными сигналами. Например, в случае аппроксимации управляющего сигнала входными компонентами могут быть ошибка управления и ее производная (скорость ошибки управления), а выходным – требуемое значение управляющего воздействия либо некоторые настраиваемые параметры САУ (например, коэффициенты усиления ПИД-регулятора). Задача эксперта при определении структуры ННС сводится к выбору модели нечеткого вывода и главным образом к лингвистическому описанию

заданного ОС. Каждой из компонент ОС отвечает лингвистическая переменная, описывающая сигнал с помощью терм-множества, соответствующего этой лингвистической переменной. Мощность терм-множества и характеристики составляющих его элементов (класс и параметры функции принадлежности) неизвестны. Полноту лингвистического описания сигнала можно задать на уровне взаимосвязи терм-множеств, входящих в лингвистические переменные. Эту задачу в системах проектирования ИСУ, основанных на традиционных мягких вычислениях (второе поколение ИСУ), также решает человек-эксперт. Однако, как указывалось выше, в сложных ситуациях управления даже опытному эксперту трудно решить данную задачу вручную (т.е. подобрать оптимальную структуру ННС для заданного ОС).

Другой важной проблемой остается определение требуемого соотношения между точностью описания (аппроксимации) ОС и необходимым уровнем робастности всей структуры ННС. Обе указанные проблемы решаются на втором этапе технологии построения БЗ ИСУ с помощью программных средств инструментария, названного ОБЗ (см. ниже разд. 3) [3, 18, 20, 21].

**2.2. Структурный анализ ИСУ с использованием ОБЗ.** С помощью случайного поиска и методологии естественного отбора (на основе структуры ГА, разработанной авторами) были промоделированы различные варианты робастных БЗ. Сформированные робастные БЗ позволяют осуществлять управление сложными ОУ в условиях неопределенности информации о внешних возмущениях, воздействующих на ОУ, и изменениях задающих сигналов (целей управления). Робастность законов управления достигается за счет введения векторных функций пригодности ГА, содержащих в качестве одной из компонент физический принцип минимума производства обобщенной энтропии как в ОУ, так и в интеллектуальном регуляторе [3, 8]. Такой подход позволяет:

осуществить принцип проектирования оптимальной ИСУ с максимальным уровнем надежности и управляемости сложным ОУ в условиях неопределенности исходной информации;

сократить до требуемого минимума необходимое количество датчиков сбора и передачи информации, как в контуре управления, так и в измерительной системе без потери точности и качества управления [22].

Робастность ИСУ, полученная на основе такого подхода, требует минимума исходной информации, как о поведении ОУ, так и о внешних возмущениях [20, 21]. Система моделирования и проектирования структур ИСУ разработана на основе ОБЗ типа "ГА – ОБЗ – нечеткий ПИД-регулятор" (табл. 1, позиция 5).

Анализ структур существующих САУ позволил выбрать в качестве базовой традиционную САУ в виде ПИД-регулятора. Такая минимально сложная структура объединяет в себе максимальное количество критериев качества управления, т.е. устойчивость, точность управления и управляемость, гарантируя определенный (минимальный) уровень робастности. Используя физический закон управления, связывающий эти критерии, можно разрабатывать ИСУ, удовлетворяющие требованиям качества управления с достаточным уровнем робастности.

Таким образом, за счет введения и взаимодействия ГООС и ГИОС реализован принцип не разрыва нижнего уровня управления в соответствии с иерархией (приоритетом) уровней качества управления (рис. 1). Тем самым было определено узкое место в структуре ИСУ, которым является процесс формирования и проектирования БЗ НР. Для решения данной задачи разработана технология проектирования БЗ (шаг 2) под единую обобщенную структуру ИСУ (рис. 3) [3, 20, 21].

Как следует из табл. 1, позиция 5, достоинства данного структурного уровня ИСУ заключаются в том, что ГИОС позволяет осуществить построение БЗ НР на основе объективного извлечения знаний из анализа динамики поведения ОУ и самого НР. При этом за счет использования соответствующей функции пригодности ГА (типа скорости производства энтропии как физического критерия оптимизации и т.п.) появляется возможность оптимизировать структуру самой БЗ. ГИОС помогает одновременно охватить новые уровни качества управления и элементы самоорганизации. Введение такого уровня качества управления, как обучение, позволяет повысить робастность управления, его устойчивость и совместно с адаптацией снизить требования к количеству исходной информации о внешних условиях функционирования ОУ. Кроме того, в результате применения процессов обучения возможно снизить требования к необходимым энергетическим затратам (выделенной полезной работе) как в ОУ, так и в структуре традиционного ПИД-регулятора.

Введение ГИОС позволяет извлечь ценную информацию из открытой системы "ОУ + традиционный регулятор". Для того чтобы повысить уровень робастности необходимо разработать соответствующий инструментарий, поддерживающий формирование БЗ НР, для увеличения количественных мер и частных критериев качества управления. Рассмотрим структуру ОБЗ для формирования и проектирования робастных структур ИСУ.

**3. Структура оптимизатора БЗ.** ОБЗ является новым эффективным программным инструментарием построения БЗ робастных ИСУ на основе мягких вычислений с использованием новых кри-

Таблица 2. Типы и роль функции пригодности ГА в ОБЗ

Тип ГА	Критерии	Функция пригодности (ФП)	Роль ФП
ГА <sub>1</sub> : оптимизация лингвистических переменных	Максимум совместной информационной энтропии и минимум информации о сигналах в отдельности	$H_{X_i}^j = -p_{X_i}^j \log(p_{X_i}^j) = -p(x_i x_i = \mu_{X_i}^j) \log[p(x_i x_i = \mu_{X_i}^j)] =$ $= -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mu_{X_i}^j(x_i(t)) \log[\mu_{X_i}^j(x_i(t))]$ $H_{X_i X_k}^{(j,l)} = H(x_j x_i = \mu_{X_i}^j, x_k = \mu_{X_k}^l) = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [\mu_{X_i}^j(x_i(t)) * \mu_{X_k}^l(x_k(t))],$ $\log[\mu_{X_i}^j(x_i(t)) * \mu_{X_k}^l(x_k(t))],$ <p>где * – выбранная операция нечеткого И</p>	Устранение избыточности ОС. Выбор оптимальной мощности термножеств лингвистических переменных компонент ОС
ГА <sub>2</sub> : оптимизация базы правил	Минимум ошибки аппроксимации	$E = \sum_p E^p,$ <p>где <math>E^p = 1/2(F(x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p) - d^p)^2</math></p>	Выбор оптимальных параметров правых частей правил
ГА <sub>3</sub> : настройка БЗ	Минимум ошибки аппроксимации или максимум совместной информационной энтропии	$E = \sum_p E^p$ $H_{X_i}^j$	Тонкая настройка параметров функций принадлежности

терисов оптимизации (в виде новых типов функций пригодности ГА). В качестве таковых выступают термодинамические и информационно-энтропийные критерии [2], представленные в табл. 2. Структура ОБЗ [18, 21] для проектирования робастных ИСУ приведена на рис. 4. ОБЗ состоит из взаимосвязанных генетических алгоритмов (ГА<sub>1</sub>, ГА<sub>2</sub>, ГА<sub>3</sub>), оптимизирующих отдельные компоненты БЗ.

Входом ОБЗ является ОС, который может быть получен либо на этапе стохастического моделирования поведения ОУ (с использованием его математической модели) либо экспериментально, т.е. непосредственно путем измерений динамических параметров физической модели ОУ. Последовательность реализации этапов построения ОБЗ также рассмотрена на рис. 4. Специфицируем шаги алгоритма оптимизации.

**Шаг 1.** Выбор модели нечеткого вывода. Пользователь конкретизирует тип нечеткой модели вывода (Сугено, Мамдани и т.д.) и число входных и выходных переменных.

**Шаг 2.** Создание лингвистических переменных. С помощью ГА<sub>1</sub> определяется оптимальное число функций принадлежности для каждой входной лингвистической переменной, а также выбирается оптимальная форма представления ее

функций принадлежности (треугольная, Гауссовская и т.д.).

**Шаг 3.** Создание базы правил. На данном этапе используется специальный алгоритм отбора наиболее “робастных правил” в соответствии со следующими двумя критериями:

1) “суммарный” критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют следующим условиям:

$$R_{total\_fs}^l \geq TL,$$

где  $TL$  (*threshold level*) – заданный (вручную или выбранный автоматически) уровень активации правила, и

$$R_{total\_fs}^l = \sum_{k=1}^N R_{fs}^l(t_k),$$

$R_{fs}^l(t_k) = \Pi[\mu_{j_1}^l((x_1(t_k))), \mu_{j_2}^l(x_1(t_k)), \dots, \mu_{j_n}^l(x_n(t_k))]$ ,  
где  $t_k$  – моменты времени,  $k = 1, \dots, N$ , а  $N$  равно числу точек в управляющем сигнале:  $\mu_{jk}^l(x_k)$ ,  $k = 1, \dots, n$  – функции принадлежности входных переменных.  $l$  – индекс правила в БЗ; символ “ $\Pi$ ” обозначает операцию нечеткой конъюнкции (в частности, может интерпретироваться как произведение);

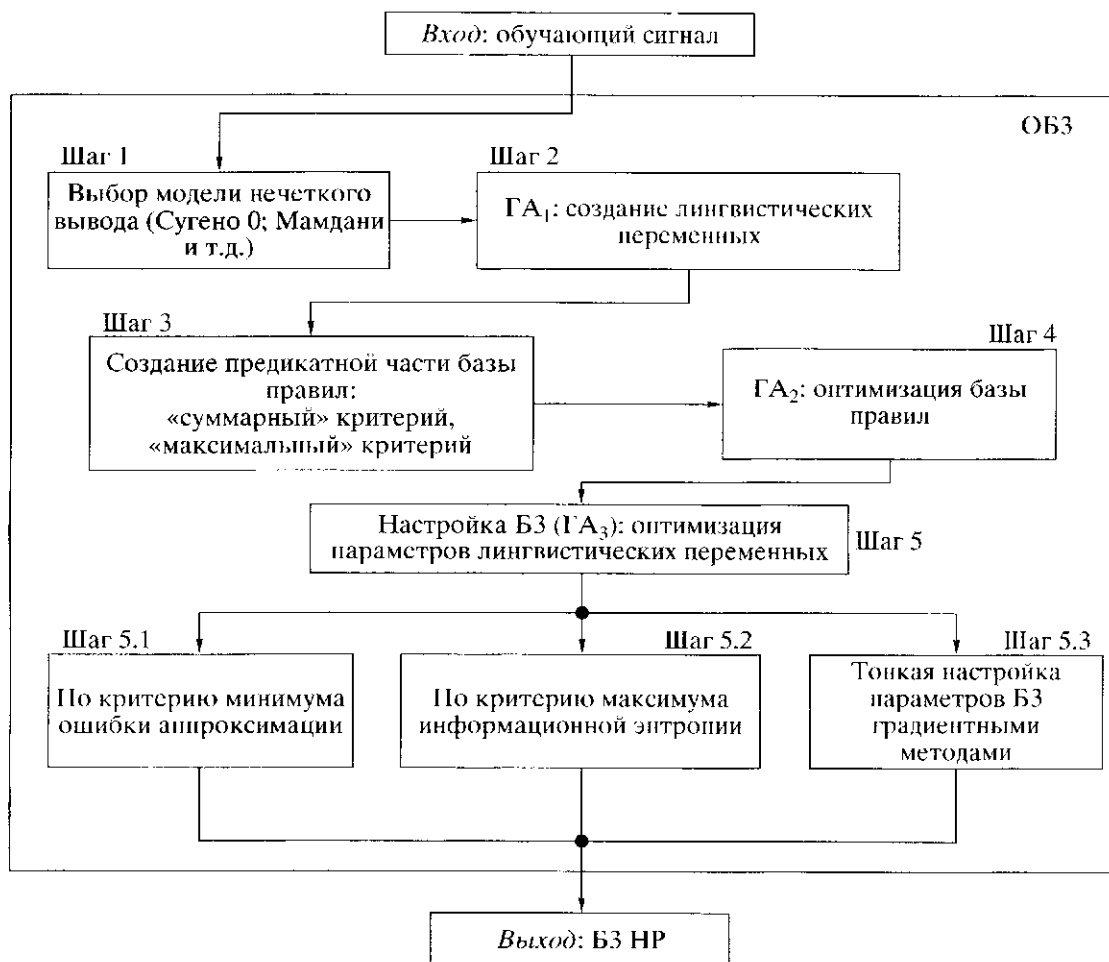


Рис. 4. Алгоритм взаимодействия операций в оптимизаторе БЗ, основанном на мягких вычислениях.

2) “максимальный” критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют условию

$$\max_t R_{fs}^l(t) \geq TL.$$

**Шаг 4. Оптимизация базы правил.** С помощью  $GA_2$  оптимизируются правые части правил БЗ, определенной на шаге 3. На данном этапе находится решение, близкое к глобальному оптимуму (минимум ошибки аппроксимации ОС). С помощью следующего шага это решение может быть локально улучшено.

**Шаг 5. Настройка базы правил.** С помощью  $GA_3$  оптимизируются левые и правые части правил БЗ, т.е. подбираются оптимальные параметры функций принадлежности входных/выходных переменных (с точки зрения заданной функции пригодности ГА). В данном процессе оптимизации используются различные функции пригодности, выбранные пользователем (шаги 5.1, 5.2 на рис. 4). Кроме того, имеется возможность настройки БЗ с

помощью традиционного метода обратного распространения ошибки (шаг 5.3 на рис. 4).

*Верификация (тестирование) построенной БЗ.* Построенные на этапах 4, 5.1, 5.2 и 5.3 БЗ ИСУ тестируются с точки зрения робастности и качества управления. В дальнейшем выбирается функционально наилучшая БЗ, которая апробируется в режиме функционирования в реальном времени.

Примеры моделирования БЗ на основе эффективного применения ОБЗ рассмотрены ниже в разд. 5.

**4. Программная реализация оптимизатора БЗ.** ОБЗ реализован в виде программной системы [3, 18, 21]. В качестве языка программирования был выбран C++ (Microsoft Visual Studio.net). Алгоритмическая часть, отвечающая за реализацию основных этапов алгоритмов оптимизации, была выполнена платформно независимо. Графический интерфейс, представленный на рис. 5, разработан для операционных систем семейства Win32 и был протестирован на ПК с различными уста-

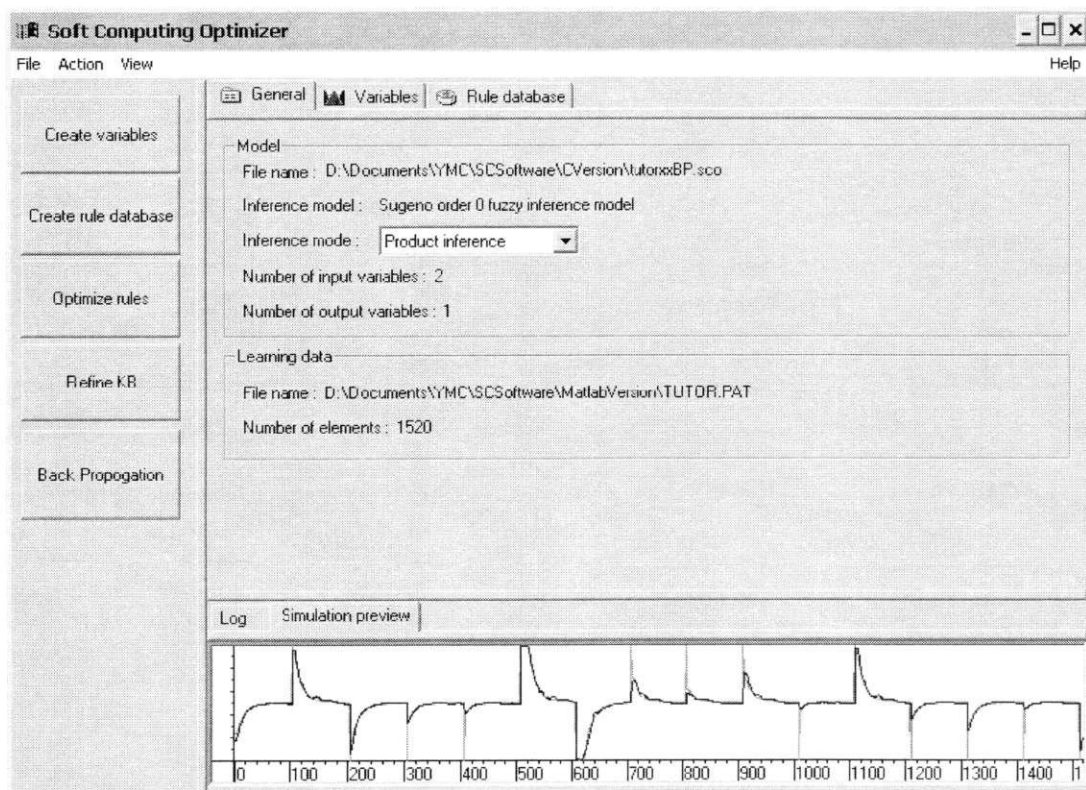


Рис. 5. Основное меню оптимизатора БЗ.

новленными версиями операционной системы Windows.

Главное меню оптимизатора разделено на несколько секций (рис. 5), отвечающих за выполнение основных функций и визуализацию результатов работы алгоритмов.

В левой секции основного меню расположена группа кнопок, запускающих различные оптимизирующие компоненты, такие, как:

создание лингвистических переменных (Create variables) с помощью ГА<sub>1</sub>;

алгоритм генерации предикатной части нечетких правил (Create rule base);

ГА<sub>2</sub> для оптимизации следственной части нечетких правил (Optimize rules);

ГА<sub>3</sub>, представляющий алгоритм перенастройки параметров лингвистических переменных для более точной аппроксимации ОС полученными правилами (Refine KB). Включен также алгоритм обратного распространения ошибки (Back propagation), гарантирующий заданную точность аппроксимации ОС, создаваемой БЗ.

В центральной секции главного меню оптимизатора располагается основная информация о создаваемой нечеткой системе, такая, как: тип, адрес основного файла БЗ, число входных

и выходных переменных, а также общая информация об ОС. Здесь же приведены редактор лингвистических переменных и редактор правил.

Редактор лингвистических переменных представлен на рис. 6. Функции принадлежности нечетких переменных могут быть отредактированы вручную как 'перетаскиванием' соответствующих значений, так и с помощью ручного ввода параметров.

Редактор базы нечетких правил изображен на рис. 7. Нечеткие правила структурно выражены в виде ННС. Число нейронов первого слоя соответствует числу входных сигналов, а второго слоя суммарному количеству функций принадлежности, входящих в лингвистические переменные, описывающие соответствующие входные сигналы. Число нейронов третьего слоя задается множеством нечетких правил, задействованных в БЗ. Для извлечения конкретного правила необходимо выбрать определенный нейрон третьего слоя. В дальнейшем правило можно изменить и дополнить.

В нижней части главного меню оптимизатора располагается окно вывода системных сообщений, в котором дублируются параметры алгоритмов и все совершенные пользова-



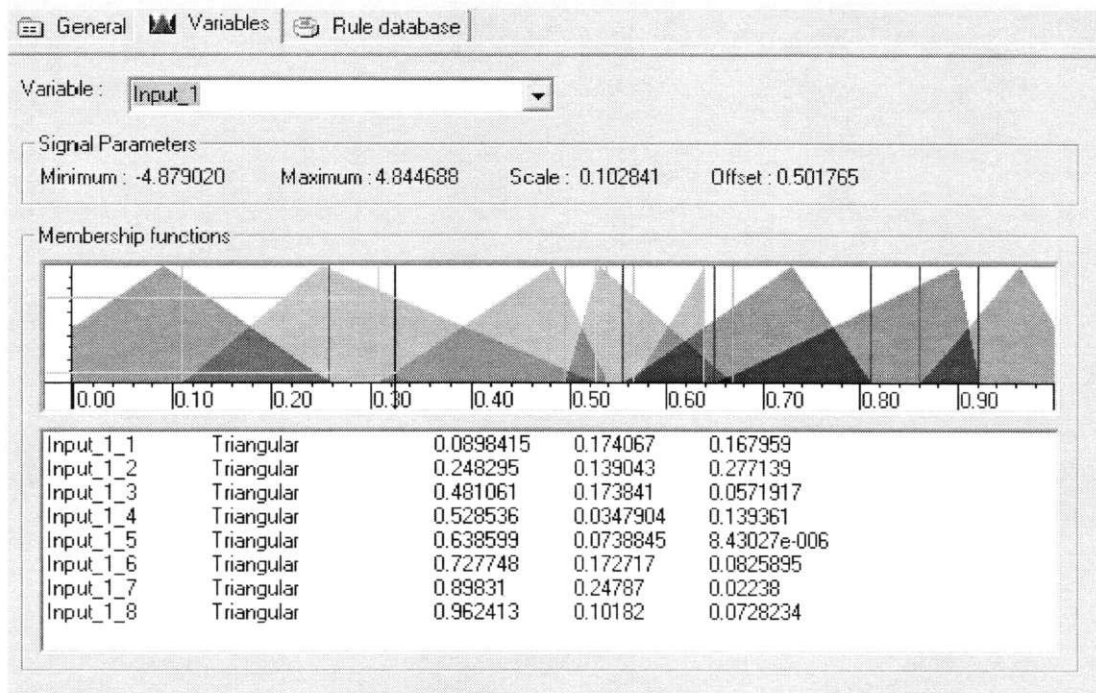


Рис. 6. Редактор лингвистических переменных.

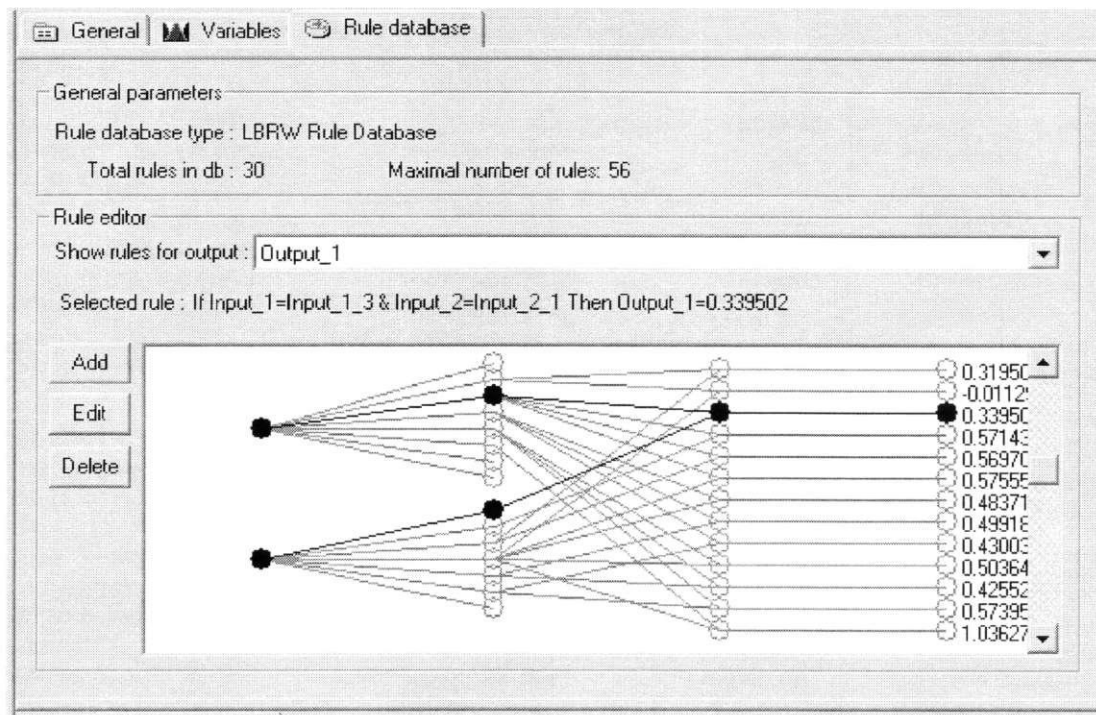


Рис. 7. Редактор базы нечетких правил.

телем действия. Постоянно обновляемый результат нечеткого вывода выводится вместе с аппроксимируемым ОС. Любые действия по изменению параметров проектируемой БЗ вы-

зывают обновление результатов аппроксимации. Таким образом, пользователь визуально контролирует влияние изменения параметров БЗ на результат аппроксимации.



При проектировании данной системы изначально планировалось ее совместное использование с системой Матлаб. В связи с этим был разработан интерфейс коммуникации между оптимизатором и системой Матлаб, позволяющий более гибко вычислять значения функций пригодности ГА. При этом наряду с ОС можно применять результаты численного интегрирования моделей ОУ, выполненных в среде Simulink, управляемых НР с синтезированными ОБЗ. Был разработан подход, позволяющий вычислять функции пригодности в системе Матлаб с последующей передачей результатов в ГА. Для этого создана соответствующая библиотека блоков среды Simulink, отвечающая за загрузку БЗ и нечеткий вывод (в режиме моделирования), а также за коммуникацию с оптимизатором (в режиме оптимизации). Блок нечеткого вывода для среды Simulink написан на языке С++ в виде соответствующей *s*- функции Simulink. Для моделирования нечеткого вывода (без использования моделей Simulink) был подготовлен соответствующий *mex*-файл, позволяющий получать результаты нечеткого вывода с помощью командной строки и исполняемых скриптов системы Матлаб. Программа совместима с системой Матлаб версии 6.1 и выше.

Поскольку основным звеном в технологии проектирования ИСУ является этап формирования БЗ [1], то построение робастных БЗ при указанных выше типах непредвиденных ситуаций управления позволяет в общем виде установить соответствие между условиями функционирования ОУ и требуемым уровнем робастности ИСУ. Рассмотрим результаты моделирования робастных структур ИСУ с эффективным применением ОБЗ.

*Примечание 5.* В разд. 4 описана методология проектирования робастных БЗ и соответствующий программный инструментарий в виде ОБЗ на мягких вычислениях, позволяющий решать поставленную задачу в рамках процессов обучения и адаптации. Ниже рассмотрены конкретные примеры применения ОБЗ в задачах проверки и оценки уровней структурной робастности проектируемой ИСУ на основе объединенной технологии стохастического и нечеткого имитационного моделирования. В качестве объектов моделирования были выбраны типовые структуры, позволяющие наглядно продемонстрировать эффективность и преимущество разработанного инструментария ОБЗ. Используемые модели ОУ обладают локальной и глобальной динамической неустойчивостью, высокой чувствительностью к изменению начальных условий, параметров структуры ОУ, случайных параметрических, внутренних и внешних возмущений. Приведены анализ результатов моделирования и практические рекомендации по их использованию в задачах проектирования робастных ИСУ. Методология стохастического моделирования кратко описана в Приложении.

**5. Система стохастического нечеткого моделирования робастных ИСУ.** Нечеткое моделирование робастных БЗ на основе ОБЗ основано на процессе извлечения ценной информации за счет моделирования и исследования индивидуальных (статистически представительных) информативных траекторий, описывающих поведение ОУ и традиционного ПИД-регулятора при воздействии на них случайных процессов. В рамках корреляционной теории различные по своей статистической природе случайные процессы (т.е. имеющие различные функции плотности распределения вероятности) могут быть неразличимыми по своим корреляционным свойствам. Полной статистической характеристикой случайных процессов является функция плотности распределения вероятностей. Поэтому выходной процесс формирующего фильтра, моделирующий внешнюю среду, должен быть представительной информативно значимой выборочной траекторией случайного процесса, позволяющей исследовать индивидуальные параметры динамических нечетких систем. Этому требованию удовлетворяют выборочные траектории случайных процессов, если известна их функция плотности распределения вероятностей. Моделирование случайных процессов с требуемой функцией плотности распределения вероятностей осуществляется методом нелинейных формирующих фильтров.

В данном разделе используется методология проектирования структур ИСУ, функционирующих во внешней среде при наличии случайных процессов, имеющих одинаковую автокорреляционную функцию и различные функции распределения плотности вероятностей. Метод нелинейных формирующих фильтров для описания случайных процессов с требуемой функцией плотности распределения вероятностей на основе уравнений Фоккера – Планка – Колмогорова описан в Приложении. Такой подход позволяет разработать обобщенную методологию исследования робастности ИСУ на основе стохастического нечеткого моделирования.

На рис. 8 приведена обобщенная структура системы стохастического нечеткого моделирования, которая применялась для оценки робастности и предельных возможностей структур ИСУ с указанием основных факторов, влияющих на чувствительность и надежность точности управления. Эффективность применения ОБЗ демонстрируется на конкретных типовых примерах моделей ОУ.

В частности, исследуемые модели физических ОУ и их среда функционирования характеризуются следующими (типовыми для реальных динамических ОУ) особенностями:

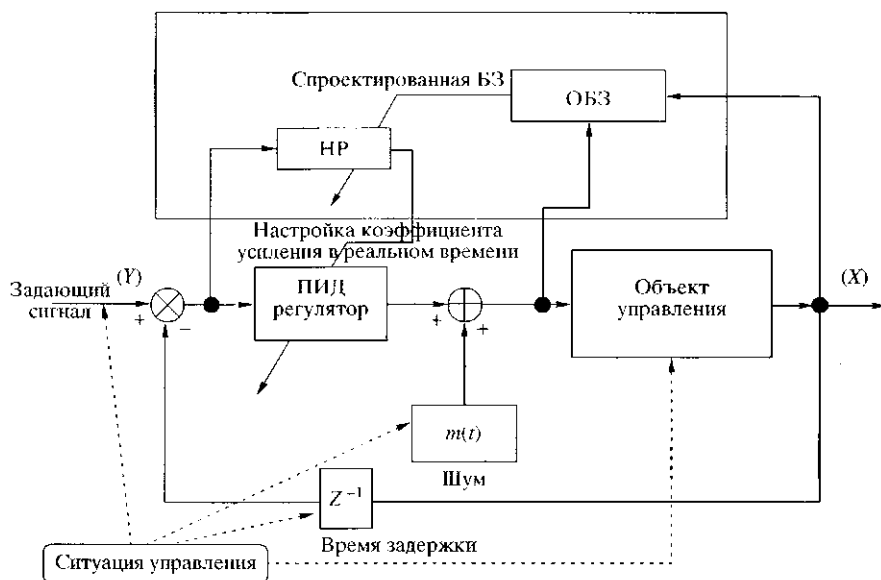


Рис. 8. Обобщенная система стохастического нечеткого моделирования с непредвиденными ситуациями управления.

по части обобщенных координат обладают локальной и глобальной динамической неустойчивостью;

по обобщенным динамическим координатам имеют существенно нелинейные перекрестные связи (стохастические нелинейности), которые взаимно (антагонистично) влияют на динамику, устойчивость и управляемость ОУ;

работают в непредвиденных ситуациях управления.

В качестве непредвиденных ситуаций управления рассматриваются четыре модели управления в условиях неопределенности исходной информации: 1) с переменной во времени статистической информацией о внешних и параметрических случайных возмущениях (выборочные траектории случайных процессов с зависящими от времени функциями плотности распределения вероятностей); 2) с неопределенностью информации об изменениях параметров или структуры ОУ; 3) при наличии случайного времени задержки в контурах управления и измерительной системы; 4) при изменении целей управления (задающего сигнала).

Моделирование разработанной модели ИСУ и ОУ осуществлялось в системе Матлаб/Симулинк (рис. 9). В качестве типовых, случайных шумов были смоделированы три типа случайных процессов с соответствующими функциями плотности распределения вероятностей.

Вид функций плотности распределения вероятностей и результаты моделирования выходных случайных процессов от соответствующих формирующих фильтров показаны на рис. 10. Варьируя структурой формирующих фильтров, параметрами в моделях ОУ, временем задержки в канале

измерения ошибки управления, видом задающего сигнала (целью управления), можно имитировать непредвиденные ситуации управления, оценить чувствительность и уровень робастности спроектированной ИСУ.

В данном разделе приводятся результаты моделирования робастных законов управления для интеллектуальных нечетких ПИД-регуляторов сложными, существенно нелинейными динамическими ОУ. В качестве демонстрации возможностей моделирования процессов интеллектуального управления динамическим ОУ и условий функционирования рассматриваются результаты моделирования следующих трех типовых ОУ: 1) нелинейный осциллятор с существенной диссипацией и локальной динамической неустойчивостью; 2) перевернутый маятник, установленный на каретке перемещения с глобальной динамической неустойчивостью; 3) существенно-нелинейный осциллятор с локальной и глобальной динамической неустойчивостью по части перекрестных связей обобщенных координат ОУ.

Данные осцилляторы представляют самостоятельный интерес для задач робототехники и механики (например, стробоскопический робот-манипулятор со сложной нелинейной динамикой поведения и значительной диссипацией) и позволяют провести сравнение с результатами, полученными с помощью технологии [1], основанной на ННС.

*Примечание 6.* Ввиду большого объема результатов моделирования и ограниченного допустимого объема статьи рассматривается третий вариант осциллятора, содержащий все ка-

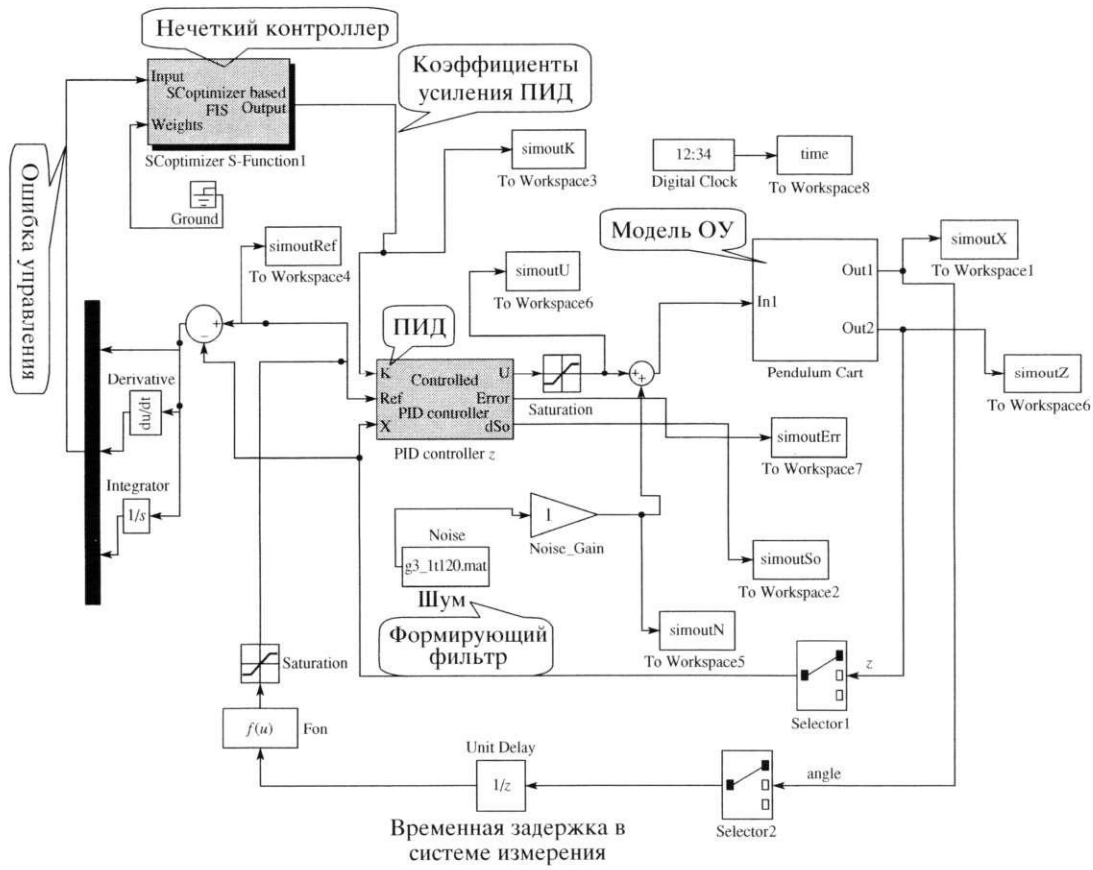


Рис. 9. Матлаб/Симулинк – модель системы управления.

чественные особенности предыдущих двух видов осцилляторов.

Пример 2. Маятник с переменной длиной. Физическая модель маятника с переменной длиной показана на рис. 11. Уравнения движения маятника представим как

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + 2\frac{\dot{l}}{l}\dot{\theta} + \frac{g}{l}\sin\theta = k'_p e_\theta + k'_d \dot{e}_\theta + k'_i \int e_\theta dt + \xi_1(t), \\ \ddot{l} + 2k_l \dot{l} - l\dot{\theta}^2 - g \cos\theta = \\ = \frac{1}{m}(k_p e_l + k_d \dot{e}_l + k_i \int e_l dt + \xi_2(t)), \end{cases} \quad (5.1)$$

где  $\xi_1(t)$ ,  $\xi_2(t)$  – соответствующие стохастические воздействия, описываемые различными функциями плотности распределения вероятностей.

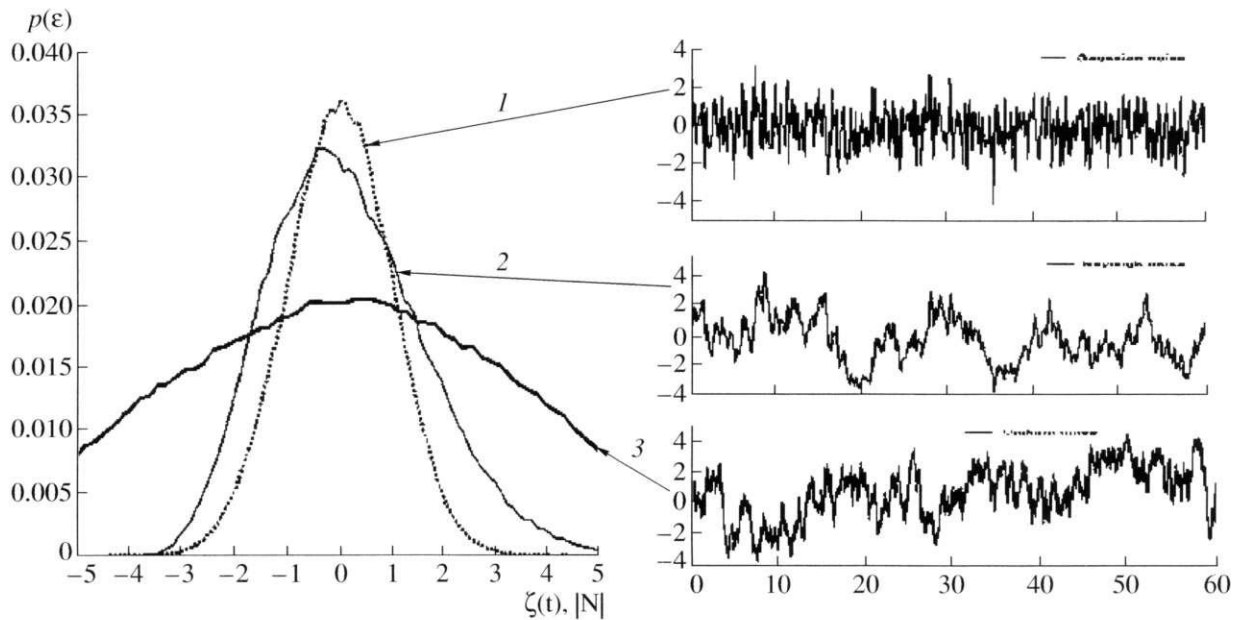
Термодинамические уравнения скорости производства энтропии в ОУ и ПИД-регуляторе имеют вид

$$\underbrace{\frac{dS_\theta}{dt} = 2\frac{\dot{l}}{l}\dot{\theta}\theta; \quad \frac{dS_l}{dt} = 2k_l \dot{l}}_{\text{Объект управления}} \quad (5.2)$$

$$\underbrace{\frac{dS_{\text{ПИД}(\theta)}}{dt} = k'_d \dot{e}_\theta^2; \quad \frac{dS_{\text{ПИД}(l)}}{dt} = k'_d \dot{e}_l^2}_{\text{ПИД-регулятор}}$$

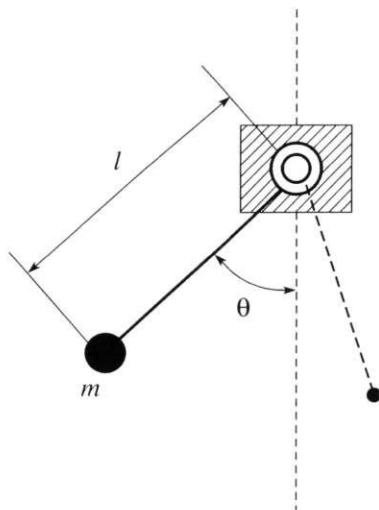
и рассматриваются совместно с уравнениями движения ОУ (5.1).

Движение системы, описываемой уравнениями (5.1), представляет собой глобально неустойчивую (по оси  $l$ ) и локально неустойчивую (по оси  $\theta$ ) динамическую систему (рис. 12). При этом в модели (5.1) присутствуют перекрестные нелинейные связи, влияющие на локальную неустойчивость по обобщенной координате  $\theta$ . Таким образом, (5.1) включает в себя локальную и глобальную неустойчивость по обобщенным координатам ОУ и является обобщением предыдущих моделей ОУ. Здесь и далее на рис. 13–23 используются следующие обозначения:  $X$ : angle ( $\theta = x$ ) – угол;  $Y$ : length ( $l = y$ ) – длина; Time ( $S$ ) – время, с; Free motion – свободное движение; unstable motion – неустойчивое движение; PID – ПИД; FNN – ННС; SCO – ОБЗ; Refsignal – задающий сигнал.



**Рис. 10.** Вид функций плотности распределения вероятностей и результаты моделирования выходных случайных процессов от соответствующих формирующих фильтров: 1 – гауссовский; 2 – рэлеевский; 3 – равномерно распределенный.

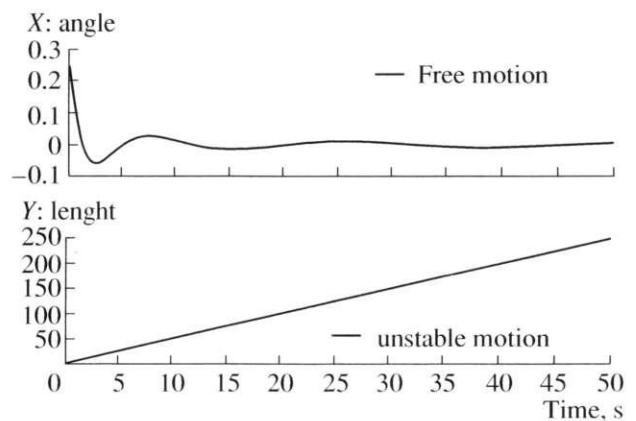
Рассмотрим следующую задачу позиционного управления: при наличии рэлеевского стохастического шума (рис. 10, позиция 2), действующего на ОУ вдоль оси  $\theta$  (максимальная амплитуда шума равна 10), а также гауссовского стохастического шума вдоль оси  $l$  (максимальная амплитуда шума равна 4) перевести маятник из начального положения в заданное (цель управления) и удерживать движение ОУ в этом состоянии:  $\theta_{ref} = 0.4$ ;  $l_{ref} = 3.5$ .



**Рис. 11.** Физическая модель маятника с переменной длиной.

Сформулируем задачу управления при следующих значениях параметров:  $m = 1$ ,  $k = 1$  и начальных условиях:  $[x_0 = 2.5, y_0 = 25]$ ,  $\{\dot{x}_0 = 0, \dot{y}_0 = 0.01\}$ . Структура ИСУ – представляет собой нечеткий регулятор (НР) для ПИД-регуляторов вдоль осей координат  $\theta$  и  $l$ . В этом случае рассматривается задача координационного управления коэффициентами усиления ПИД-регуляторов, представляющая самостоятельный интерес для теории и систем управления [2, 3, 8].

На рис. 13–17 показаны результаты моделирования движения системы в трех случаях управления: с помощью двух классических ПИД-регулято-



**Рис. 12.** Маятник с переменной длиной: свободное движение системы. Координата  $Y$  (длина) показывает глобальное неустойчивое движение.

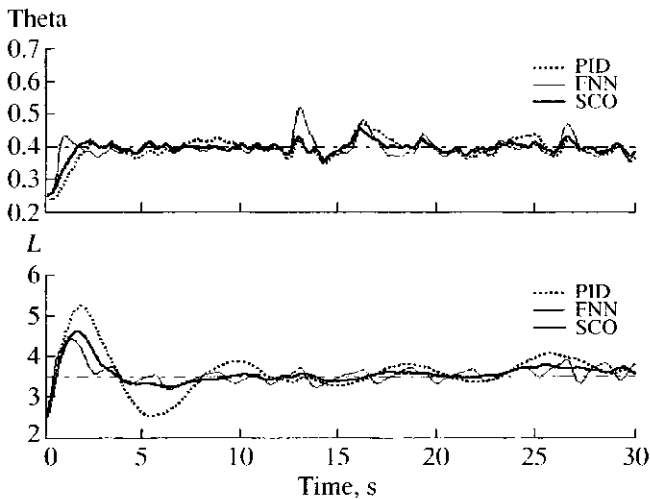


Рис. 13. Маятник с переменной длиной. Движение системы при стохастическом воздействии с тремя типами управления (ПИД, ННС и ОБЗ).

ров (с коэффициентами усиления  $K = \{6, 6, 6\}$ ); на базе традиционных мягких вычислений (с использованием структуры ННС, выбранной вручную, и метода построения БЗ на основе алгоритма обратного распространения ошибки); с применением разработанного в [3, 18, 21] инструментария ОБЗ. Следовательно, созданная на основе ОБЗ ИСУ более эффективна, чем ИСУ, полученная с помощью традиционных мягких вычислений на ННС, а также эффективнее классических ПИД-регуляторов. С точки зрения процессов оптимизации структур САУ по критериям качества управления, таким, как минимум ошибки управления; минимум производства энтропии в ОУ и в САУ (минимум тепловых потерь, потерь полезной работы и энергии), разработанная структура ИСУ является оптимальной и обладает минимальной сложностью.

*Исследование робастности ИСУ.* Рассмотрим свойство робастности построенных БЗ для трех вышеприведенных случаев управления. Сформулируем задачу управления с новыми условиями (непредвиденная ситуация управления), отличную от первоначальной, для которой подбирался оптимальный ОС, и сравним результаты моделирования для трех случаев управления.

*Задача управления с новыми условиями:*

новое начальное положение ОУ  $[-0.52, 2.5]$   $[0.01, 0]$ ;

новые задающие сигналы:  $\theta_{ref} = 0.78$ ;  $l_{ref} = 5$ ;

другие шумы, воздействующие на ОУ:

гауссовский шум вдоль оси  $\theta$  (максимальная амплитуда шума равна 1.5);

рэлеевский шум вдоль оси  $l$  (максимальная амплитуда шума равна 1).

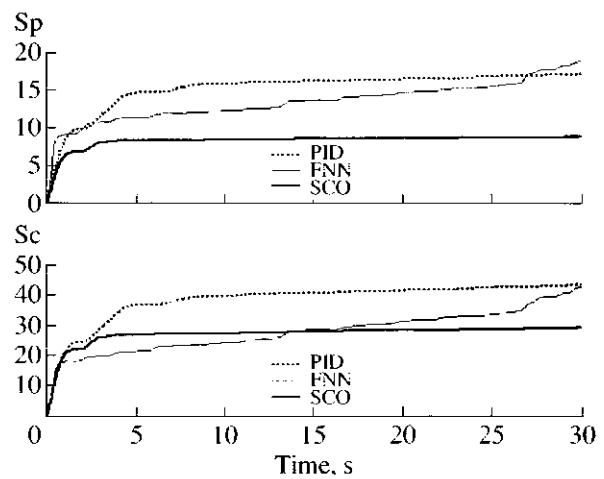


Рис. 14. Маятник с переменной длиной. Производство энтропии в объекте управления и в системе управления (ПИД, ННС и ОБЗ).

На рис. 18–20 показаны результаты моделирования управления движением системы в трех случаях управления в новых условиях. На рис. 21–23 управляющая сила и коэффициенты усиления нечеткого ПИД-регулятора, основанного на традиционном методе мягких вычислений типа ННС, равны нулю. Это означает, что спроектированная с помощью ННС БЗ нечеткого контроллера не робастна, т.е. для новых начальных данных в БЗ нет ни одного активируемого правила. Согласно результатам моделирования, спроектированная БЗ на основе ННС для НР в ИСУ, не справляется с новой ситуацией управления. Следовательно, БЗ ИСУ, разработанная с помощью традиционных мягких вычислений на основе ННС, не является робастной, напротив, БЗ ИСУ, полученная с примене-

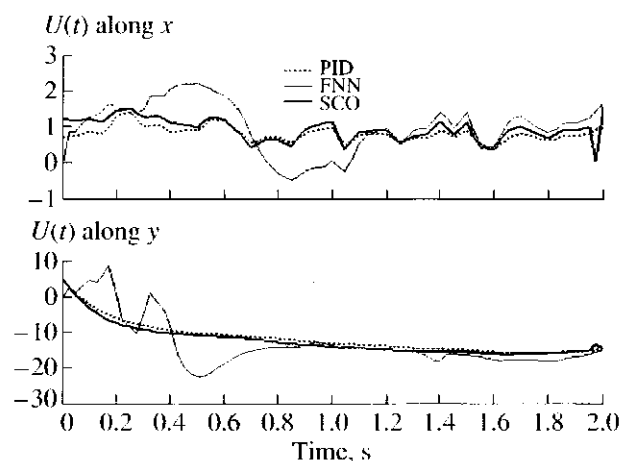


Рис. 15. Маятник с переменной длиной. Сила управления по осям координат  $\theta(x)$  и  $l(y)$ .

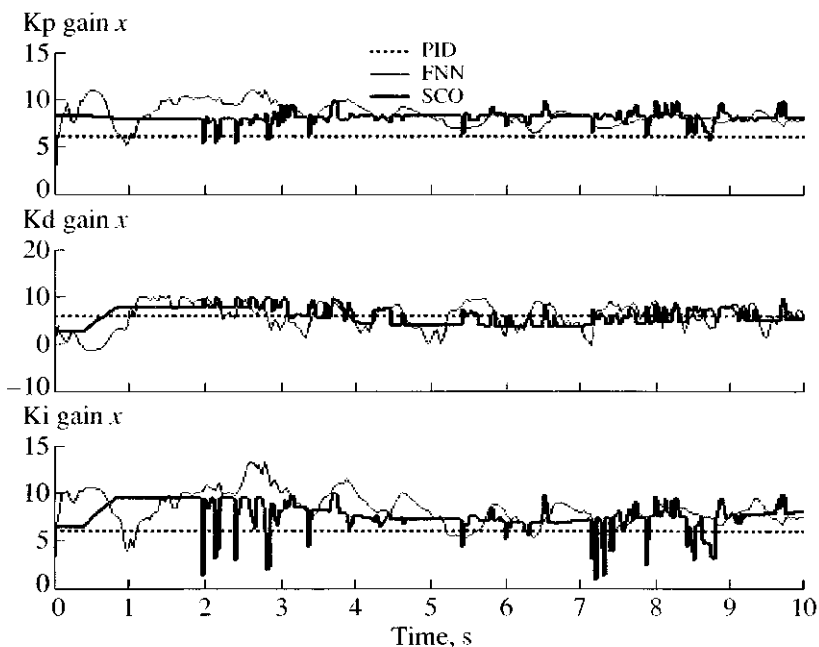


Рис. 16. Законы управления по оси координат  $\theta$  (ПИД, ННС и ОБЗ).

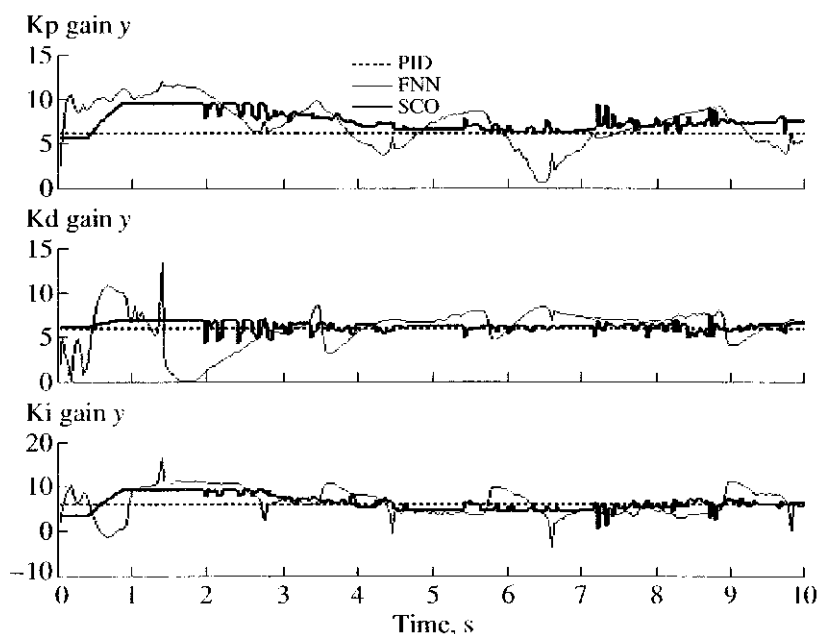


Рис. 17. Законы управления по оси координат  $l$  (ПИД, ННС и ОБЗ).

нием ОБЗ, робастна и эффективна с точки зрения задающего критерия качества управления.

**6. Примеры практического применения ОБЗ в реальных ОУ.** Инструментарий ОБЗ на мягких вычислениях был использован при проектировании робастных ИСУ промышленными ОУ; прошел экспериментальную проверку на реальных ОУ, таких, как перевернутый физи-

ческий маятник без математической модели, полуактивная подвеска автомобиля [23], управление навигацией роботом-мотоциклом [24], управление двигателем внутреннего сгорания [25] и др.

Проведенные испытания показывали высокую эффективность работы ОБЗ на мягких вычислениях как на ОУ с моделью, так и с исполь-

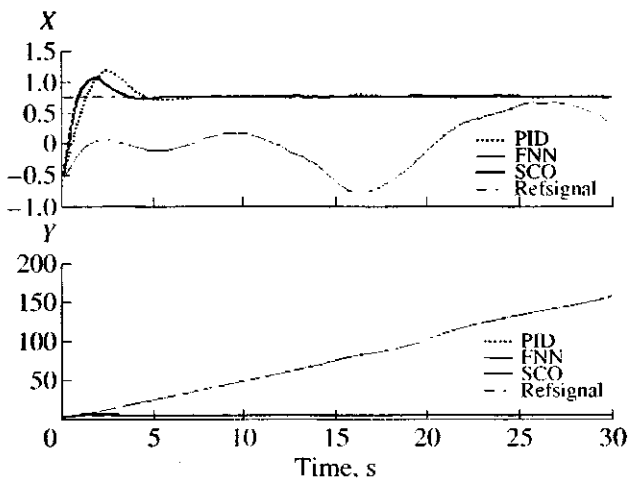


Рис. 18. Маятник с переменной длиной. Движение системы при стохастическом воздействии с тремя типами управления (ПИД, ПНС и ОБЗ). Новая ситуация управления.

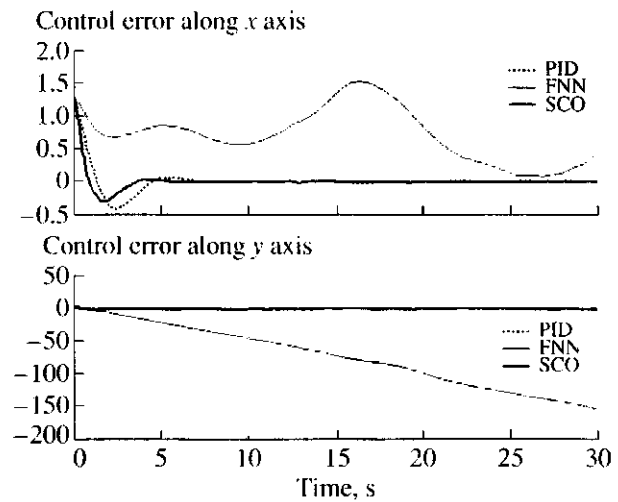


Рис. 19. Маятник с переменной длиной. Ошибка управления. Новая ситуация управления.

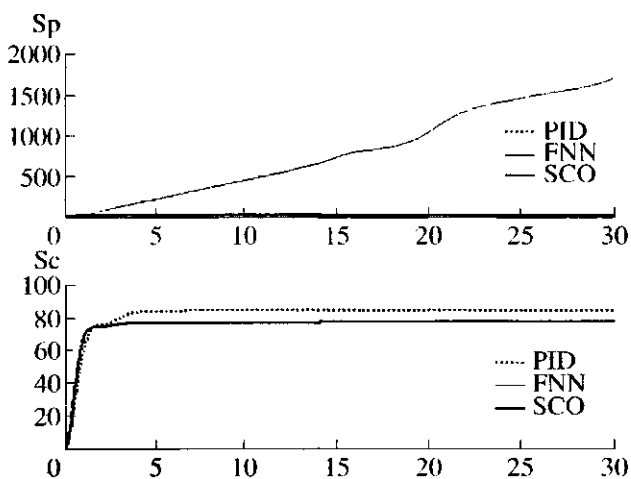


Рис. 20. Маятник с переменной длиной. Производство энтропии в объекте управления и в системе управления. Новая ситуация управления.

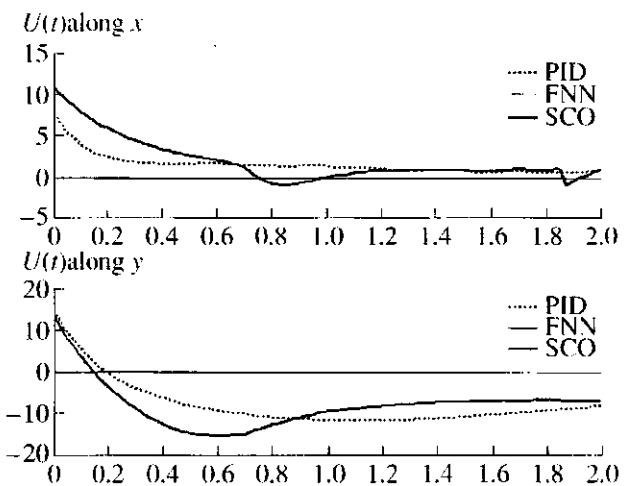


Рис. 21. Маятник с переменной длиной. Сила управления по осям координат  $\theta(x)$  и  $l(y)$ . Новая ситуация управления.

зованием экспериментальных данных, полученных с физической модели ОУ. Результаты моделирования и промышленной эксплуатации продемонстрировали следующее:

построенная БЗ НР, управляющего движением ОУ, является *робастной*;

с точки зрения критериев качества управления, таких, как минимум ошибки управления; минимум производства энтропии в объекте управления и системе управления (т.е. минимум тепловых потерь и потерь полезной работы и энергии), а также с учетом минимума управляющей силы разработанная структура ИСУ эффективнее традиционных ПИД-регуляторов и НР, спроектиро-

ванных на основе традиционного инструментария мягких вычислений типа ННС:

разработанный метод имеет свои ограничения по достижению требуемого уровня робастности, что заставляет вводить новые методы моделирования и вычислений (квантовые вычисления и квантовый нечеткий вывод) в инструментарий ОБЗ [7].

На основе предложенного инструментария ОБЗ рассмотрены актуальные задачи формирования БЗ для проектирования робастных НР, например задача координационного управления коэффициентами усиления двух ПИД-регуляторов, представляющая самостоятельный интерес для теории и систем управления. Ис-



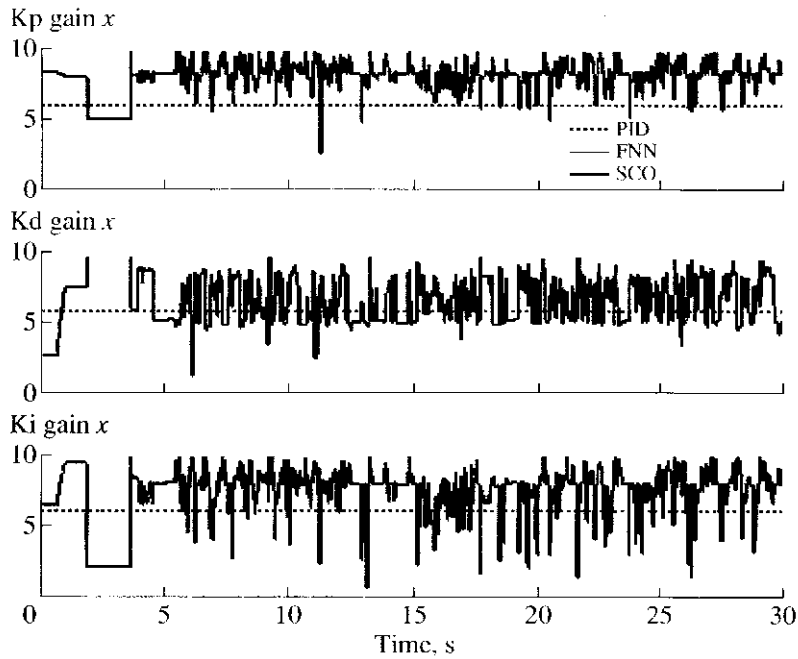


Рис. 22. Законы управления по оси координат  $\theta$ . Новая ситуация управления.

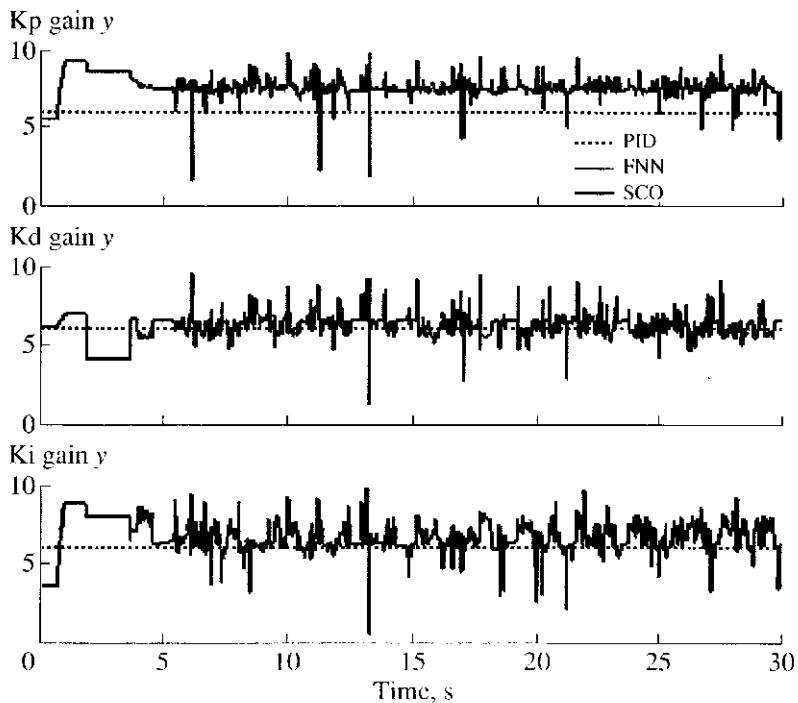


Рис. 23. Законы управления по оси координат  $l$ . Новая ситуация управления.

пользование инструментария ОБЗ позволяет одновременно реализовать процесс проектирования робастных БЗ на основе алгоритмов обучения и адаптации, реализуя первый этап информационной технологии проектирования робастных ИСУ.

**7. Ограничения и перспективы развития программной системы ОБЗ.** Как отмечалось, за счет интеграции с системой Матлаб ОБЗ дает возможность вводить дополнительные критерии качества управления, не изменяя исходного кода программных модулей системы. В силу отмеченных

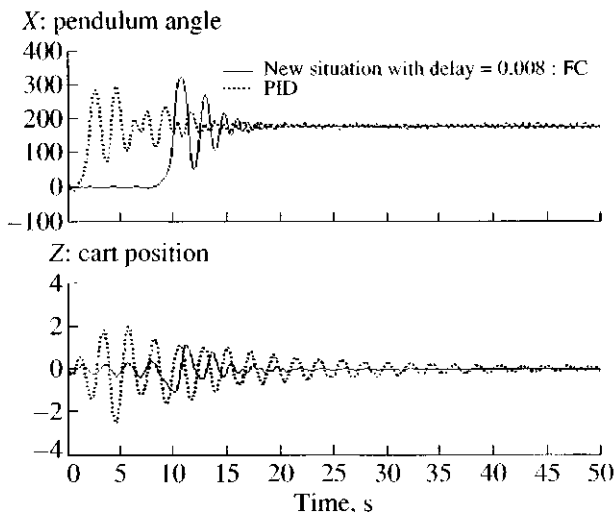


Рис. 24. Неустойчивое динамическое поведение ОУ в новой непредвиденной ситуации управления (увеличено время задержки до 0.008 с).

выше преимуществ ОБЗ составляет основу для первого этапа технологии проектирования ИСУ [3, 20, 21] (рис. 3).

*Примечание 7.* Были исследованы и показаны большие возможности инструментария ОБЗ в разработке робастных БЗ ИСУ для широкого класса ситуаций управления. Однако предложенный метод также имеет свои ограничения по достижению требуемого уровня робастности.

На рис. 24 и 25 показаны результаты моделирования систем “каровка перемещения–перевернутый маятник” и “маятник с переменной длиной” в непредвиденных ситуациях управления. Для системы “каровка перемещения – перевернутый маятник” новое время задержки в канале измерения составляло 0.008 с (при времени задержки 0.001 и 0.002 с, система устойчива и робастна) и привело к потере управляемости нечеткого и классического ПИД-регуляторов.

Для системы “маятник с переменной длиной” непредвиденная ситуация для начальных параметров системы  $m = 0.5$ ,  $k = 0.4$ ,  $c = 2$ ;  $[\theta_0 = 0.25, l_0 = 0.5]$   $[\dot{\theta}_0 = 0, \dot{l}_0 = 0.01]$  имела следующие характеристики: гауссовский шум по оси  $x$  и время задержки в канале измерения 0.075 с, рэлеевский шум по оси  $y$  и время задержки в канале измерения 0.04 с, задающий сигнал по оси  $x$  равен нулю, а по оси  $y$  – двум. Даже без ограничения на управляющую силу классический ПИД-регулятор с усредненными оптимальными параметрами не справляется с непредвиденной ситуацией управления.

На рис. 24 и 25 использованы следующие обозначения:  $X$  – pendulum angle – угол отклонения маятника;  $Z$  – cart position – положение каретки; control error – ошибка управления; control force – управ-

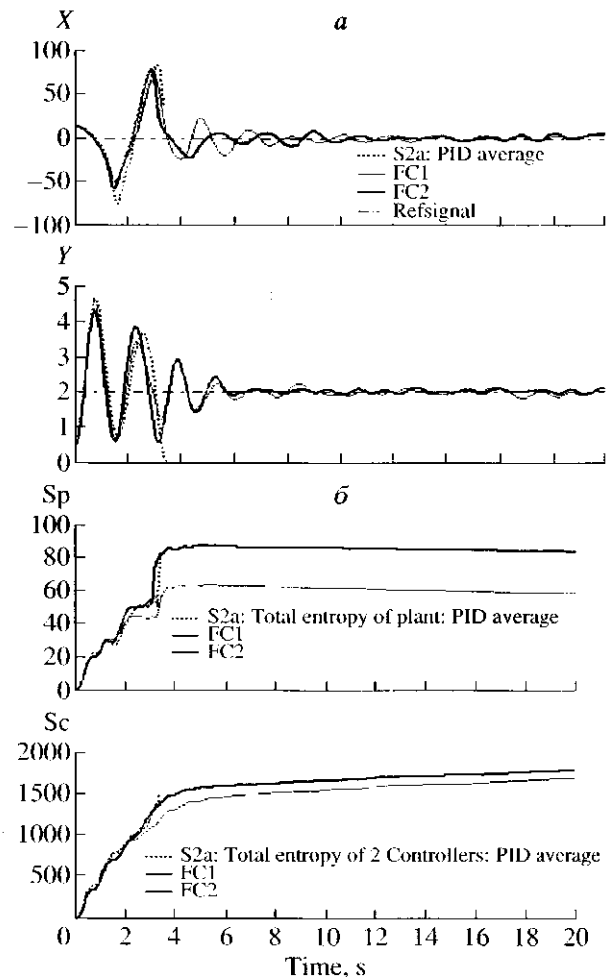


Рис. 25. Динамическое поведение ОУ в непредвиденной ситуации управления (описание в тексте): а – потеря управляемости ПИД-регулятором; б – энтропийные характеристики ОУ и регуляторов.

ляющая сила;  $S_p$  – производство энтропии в ОУ;  $S_c$  – производство энтропии в регуляторе;  $K_p$ ,  $K_D$ ,  $K_I$  – коэффициенты усиления ПИД-регулятора соответственно. Данные и другие результаты моделирования приводят к необходимости разрабатывать и вводить новые методы и вычисления (квантовые вычисления и квантовый нечеткий вывод [7, 13]) в инструментарий ОБЗ.

Ограничения возникают из физической природы алгоритма случайного поиска в структуре ГА. Предложенный ОБЗ может работать на одном пространстве решений (в силу предельных возможностей ГА). Для глобальной оптимизации на множестве пространств решений требуется перейти к новому виду вычислений, позволяющему объединить множества пространств решений в одно с помощью квантового оператора суперпозиции [4, 7]. Таковыми являются *квантовые вычисления*.

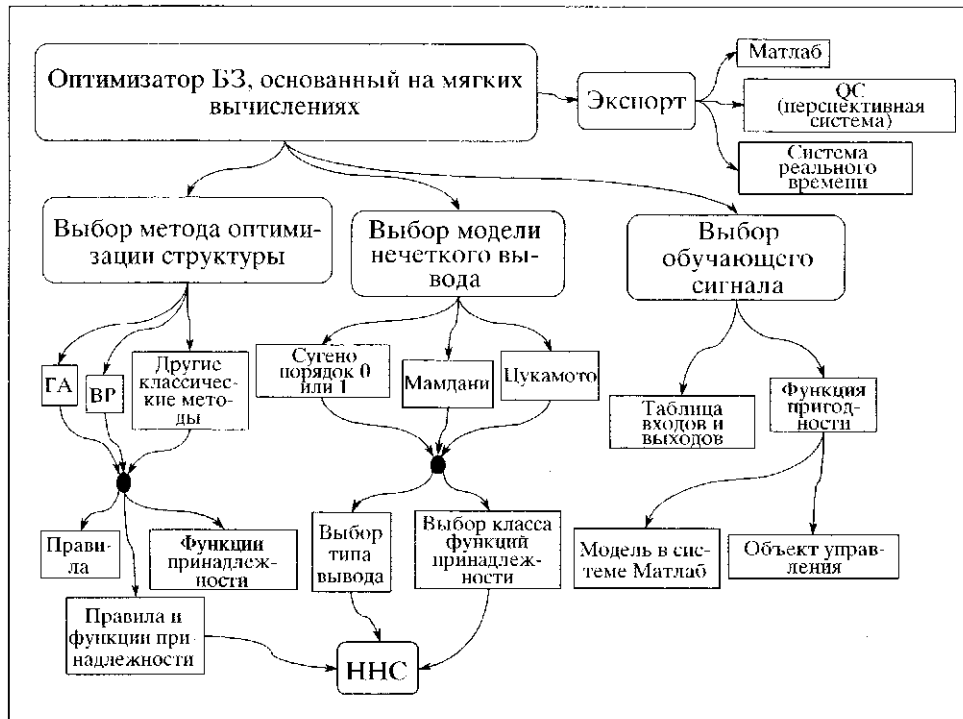


Рис. 26. Обобщенная архитектура ОБЗ.

В этом случае квантовый оптимизатор, применяющий методы квантовых вычислений, в качестве исходной информации привлекает частные БЗ, спроектированные на основе ОБЗ. Это означает, что ОБЗ позволяет создавать базис для реализации второго этапа технологии, использующего квантовые вычисления. С этой целью в архитектуре ОБЗ предусмотрен программно встраиваемый интерфейс с блоком квантовых вычислений (рис. 26).

Таким образом, перспективная информационная технология проектирования структур робастных ИСУ является двухуровневой. Первый уровень основан на ОБЗ, второй – на квантовых вычислениях.

**Заключение.** Представленные в статье методы разработки и технология проектирования ИСУ на основе ОБЗ позволяют реализовать принцип проектирования оптимальной ИСУ с максимальным уровнем надежности и управляемости сложным ОУ в условиях неопределенности исходной информации, а также при наличии стохастических шумов различной физической и статистической природы. Сформированные БЗ с помощью ОБЗ вырабатывают робастные законы управления коэффициентами усиления традиционных ПИД-регуляторов для широкого диапазона внешних возмущений и максимально нечувствительны к случайным изменениям структуры ОУ.

Робастность законов управления достигается введением векторной функции пригодности ГА,

одна из компонент которой описывает физический принцип минимума производства обобщенной энтропии как в ОУ, так и в системе управления, а другие компоненты – традиционные критерии качества управления как минимум ошибки управления и т.п. Подход, основанный на использовании ОБЗ для проектирования робастных ИСУ, позволяет:

проектировать оптимальную ИСУ с максимальным уровнем надежности и управляемости для множества динамических систем при наличии неопределенности в начальной информации [8];

уменьшить число датчиков как в контуре каналов управления, так и в самой измерительной системе без потери точности и качества управления [22];

робастная ИСУ, полученная на основе такого подхода, требует минимума исходной информации как о поведении ОУ, так и о внешних возмущениях [3, 20].

**Приложение.** Система моделирования случайных процессов с требуемой функцией плотности распределения вероятностей методом нелинейных формирующих фильтров. В данном приложении описывается методология проектирования структур формирующих фильтров случайных процессов, имеющих одинаковую автокорреляционную функцию и различные функции распределения плотности вероятностей. Результаты статистического анализа реальных случайных процессов показали, что типовыми

автокорреляционными функциями, описывающими данные процессы, являются следующие:

$$R(\tau) = B(0)\exp\{-\alpha|\tau|\}; \quad (\text{П.1})$$

$$R(\tau) = B(0)\exp\{-\alpha|\tau|\}\cos\beta\tau; \quad (\text{П.2})$$

$$R(\tau) = B(0)\exp\{-\alpha|\tau|\}\left[\cos\beta\tau + \frac{\alpha}{\beta}\sin(\beta|\tau|)\right], \quad (\text{П.3})$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – значение коэффициентов, определяемых из экспериментальных данных. Представленные автокорреляционные функции и их параметры используются в практике стохастического моделирования случайных процессов на основе формирующих фильтров.

В рамках корреляционной теории различные по своей статистической природе случайные процессы (т.е. имеющие различные функции плотности распределения вероятности) могут быть неразличимыми по своим корреляционным свойствам. Полной статистической характеристикой случайных процессов является функция плотности распределения вероятностей. Рассмотрим методологию проектирования структур формирующих фильтров случайных процессов на примере автокорреляционной функции (П.1) с различными типами функции плотности распределения вероятностей.

Возьмем стационарный стохастический процесс,  $X(t)$ , определенный на интервале  $[x_l, x_r]$ , границы которого могут быть ограниченными или неограниченными. Без потери общности предположим, что  $X(t)$  имеет нулевое среднее значение. Тогда  $x_l < 0$  и  $x_r > 0$ . Зная функцию плотности распределения вероятности  $p(x)$  и спектральную плотность  $\Phi_{XX}(\omega)$  (как преобразование Фурье от автокорреляционной функции  $R_{XX}(\tau)$ ) случайного процесса  $X(t)$ , можно смоделировать случайный процесс  $X(t)$  с помощью формирующего фильтра, структура и параметры которого определяются через вид и параметры автокорреляционной функции и функции плотности распределения вероятностей [26–28].

Допустим, что спектральная плотность случайного процесса имеет вид

$$\Phi_{XX}(\omega) = \frac{\alpha\sigma^2}{\pi(\omega^2 + \alpha^2)}, \quad \alpha > 0, \quad (\text{П.4})$$

где  $\sigma^2$  – среднеквадратическое отклонение  $X(t)$ . Если  $X(t)$  – марковский диффузионный процесс, то он может рассматриваться как решение следующего стохастического уравнения (в смысле Ито):

$$dX = -\alpha X dt + D(X) dB(t), \quad (\text{П.5})$$

где  $B(t)$  – единичный винеровский процесс, коэффициенты  $-\alpha X$  и  $D(X)$  известны как коэффициенты смещения и диффузии случайного процесса

$X(t)$  соответственно. Умножим левую и правую часть (П.5) на  $X(t - \tau)$  и проведем усреднение по ансамблю случайных траекторий. В результате получим

$$\frac{dR(\tau)}{d\tau} = -\alpha R(\tau), \quad (\text{П.6})$$

где  $R(\tau)$  – автокорреляционная функция случайного процесса  $X(t)$ , т.е.  $R(\tau) = E[X(t - \tau)X(t)]$ . Уравнение (П.6) имеет следующее решение:

$$R(\tau) = A \exp(-\alpha|\tau|), \quad (\text{П.7})$$

где  $A$  – соответствующий нормирующий множитель. Принимая  $A = \sigma^2$ , уравнения (П.4) и (П.7) могут быть связаны преобразованием Фурье. Таким образом, уравнение (П.5) воспроизводит случайный процесс,  $X(t)$  с требуемой спектральной плотностью (П.4). Отметим, что вид диффузионного коэффициента  $D(X)$  не влияет на вид спектральной плотности.

Определим вид диффузионного коэффициента  $D(X)$  так, чтобы случайный процесс  $X(t)$  имел требуемую функцию плотности распределения вероятностей  $p(x)$ . Известно, что функция плотности распределения вероятностей для данного класса динамических систем может быть определена через решение уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова, [26, 28], которое в стационарном случае может быть получено из (П.5) следующим образом:

$$\frac{d}{dx}G = -\frac{d}{dx}\left\{\alpha xp(x) + \frac{1}{2}\frac{d}{dx}[D^2(x)p(x)]\right\} = 0, \quad (\text{П.8})$$

где  $G$  известна как поток вероятностей. Так как случайный процесс  $X(t)$  определен на интервале  $[x_l, x_r]$ , поток вероятностей  $G$  должен удовлетворять двум граничным условиям при  $x = x_l$  и  $x = x_r$ .

В данном одномерном случае, поток  $G$  существует и стационарен, т.е. плотность потока вероятностей  $\frac{d}{dx}G = 0$ . Соответственно этому условию уравнение (П.8) принимает следующий вид:

$$\alpha xp(x) + \frac{1}{2}\frac{d}{dx}[D^2(x)p(x)] = 0. \quad (\text{П.9})$$

Интегрирование уравнения (П.9) приводит к следующему результату:

$$D^2(x)p(x) = -2\alpha \int_{x_l}^{x_r} up(u)du + C, \quad (\text{П.10})$$

где  $C$  – постоянная интегрирования.

Для определения вида  $C$  рассмотрим два случая. В первом случае, если  $x_l = -\infty$  или  $x_r = \infty$ , или спра-

ведливы оба условия, то  $p(x) = 0$  на данных граничных условиях и из уравнения (П.10) следует  $C = 0$ .

Во втором случае, если  $x_l$  и  $x_r$  – конечные величины, то коэффициент смещения  $-\alpha x_l$  для правого граничного условия является отрицательным, а для левого – положительным. Это означает, что усредненные потоки вероятностей для этих двух граничных условий имеют различные направления. Однако существование стационарной плотности распределения вероятностей дает дополнительное условие, согласно которому для этих двух граничных условий коэффициент диффузии  $D^2(x_l) = D^2(x_r) = 0$ . Это условие выполняется только если  $C = 0$ . В результате имеем

$$D^2(x) = -\frac{2\alpha}{p(x)} \int_{x_l}^x up(u) du. \quad (П.11)$$

Функция  $D^2(x)$ , вычисляемая из (П.11), неотрицательная, так как  $p(x) \geq 0$ , а среднее значение  $X(t)$  равно нулю. Таким образом, стохастический процесс  $X(t)$  воспроизводится как решение уравнения (П.5) с коэффициентом диффузии  $D(x)$ , определяемым из (П.11) с требуемыми функциями плотности распределения вероятности  $p(x)$  и спектральной плотности (П.4).

Стохастическое дифференциальное уравнение (П.5) в форме Ито может быть преобразовано к соответствующей форме Стратоновича:

$$\dot{X} = -\alpha X - \frac{1}{4} \frac{dD^2(X)}{dX} + \frac{D(X)}{\sqrt{2\pi}} \xi(t), \quad (П.12)$$

где  $\xi(t)$  – гауссовский белый шум с единичной спектральной плотностью. Уравнение (П.12) более практично при моделировании выборочных траекторий случайных процессов. Рассмотрим некоторые иллюстративные примеры, имеющие самостоятельные значения для теории и практики стохастического моделирования случайных процессов [26–28].

**Пример 3.** Предположим, что  $X(t)$  – стационарный случайный процесс с равномерной функцией плотности распределения вероятности (рис. 10, позиция 3)

$$p(x) = \frac{1}{2\Delta}, \quad -\Delta \leq x \leq \Delta. \quad (П.13)$$

Подставляя (П.13) в (П.11), получаем

$$D^2(x) = \alpha(\Delta^2 - x^2). \quad (П.14)$$

В этом случае стохастическое дифференциальное уравнение в смысле Ито имеет вид

$$dX = -\alpha X dt + \sqrt{\alpha(\Delta^2 - X^2)} dB(t). \quad (П.15)$$

Интересно отметить, что семейство стохастических процессов может быть получено из следующей обобщенной формы уравнения (П.15):

$$dX = -\alpha X dt + \sqrt{\alpha\beta(\Delta^2 - X^2)} dB(t). \quad (П.16)$$

Уравнение имеет различный вид, но одинаковую спектральную плотность (П.4).

**Пример 4.** Допустим, что  $X(t)$  имеет рэлеевскую функцию плотности распределения вероятностей

$$p(x) = \gamma^2 x \exp(-\gamma x), \quad \gamma > 0, \quad 0 \leq x \leq \infty. \quad (П.17)$$

Преобразуем  $X(t)$  к следующему виду  $Y(t) = X(t) - 2/\gamma$  с плотностью распределения вероятности:

$$p(y) = \gamma(\gamma y + 2) \exp(-\gamma y + 2), \quad -2/\gamma \leq y \leq \infty. \quad (П.18)$$

Из (П.11) следует

$$D^2(y) = \frac{2\alpha}{\gamma} \left( y + \frac{2}{\gamma} \right). \quad (П.19)$$

Стохастическое дифференциальное уравнение в форме Ито для  $Y(t)$  имеет следующий вид:

$$dY = -\alpha Y dt + \sqrt{\left[ \frac{2\alpha}{\gamma} \left( Y + \frac{2}{\gamma} \right) \right]} dB(t) \quad (П.20)$$

и соответствующее уравнение для  $X(t)$  в форме Стратоновича

$$\dot{X} = -\alpha X + \frac{3\alpha}{2\gamma} + \sqrt{\left( \frac{\alpha}{\pi\gamma} X \right)} \xi(t). \quad (П.21)$$

Отметим, что спектральная плотность для  $X(t)$  содержит дельта-функцию типа  $(4/\gamma^2)\delta(\omega)$  с отличным от нуля средним значением  $2/\gamma$ .

**Пример 5.** Рассмотрим семейство функций плотности распределения вероятностей, удовлетворяющих уравнению

$$\frac{d}{dx} p(x) = J(x) p(x). \quad (П.22)$$

Уравнение (П.22) может быть проинтегрировано как

$$p(x) = C_1 \exp\left(\int J(x) dx\right), \quad (П.23)$$

где  $C_1$  – нормирующей постоянной. Тогда

$$D^2(x) = -2\alpha \exp[-J(x)] \int x \exp[J(x)] dx. \quad (П.24)$$

Отметим следующие специальные случаи. Допустим

$$J(x) = -\gamma x^2 - \delta x^4, \quad -\infty < x < \infty, \quad (П.25)$$

где  $\gamma$  – произвольная постоянная, если  $\delta > 0$ . Подставляя (П.25) в (П.11), получим

**Таблица 3.** Структуры формирующих фильтров для типовых функций плотности распределения вероятностей  $p(x)$ 

Корреляционная функция	Функция распределения вероятности	Структура формирующего фильтра
$R_y(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha \tau }$	Гауссовское	$\dot{y} + \alpha y = \sigma^2 \xi(t)$
$R_y(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha \tau }$	Равномерное	$\dot{y} + \frac{\alpha}{2} y = \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\alpha(\Delta^2 - y^2)} \xi(t)$
$R_y(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha \tau }$	Рэлеевское	$\dot{y} + \alpha y \pm \frac{2\alpha}{\gamma} = \frac{\sigma^2}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{2\alpha}{\gamma} \left(y + \frac{2}{\gamma}\right)} \xi(t)$
$R_y(\tau) = \sigma^2 e^{-\alpha \tau }$	Пирсона	$\dot{y} + \alpha y + \frac{\alpha}{a_1 + 2b_2} (b_2 x + b_1) =$ $= \frac{\sigma_2}{\sqrt{2\pi}} \sqrt{\frac{2\alpha}{a_1 + 2b_2} (b_2 y^2 + b_1 y + b_0)} \xi(t)$

**Таблица 4.** Структуры формирующих фильтров случайных процессов с автокорреляционной функцией (П.3) и типовыми функциями плотности распределения вероятностей

Корреляционная функция	Функция плотности распределения вероятностей	Структура формирующего фильтра
$R(\tau) =$ $= \sigma^2 e^{-\alpha \tau } \left[ \cos \omega \tau + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega  \tau  \right]$	2D Гауссовское $p(y_1, y_2) = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} e^{-\frac{1}{2}\left(\left(\frac{y_1-\mu_1}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{y_2-\mu_2}{\sigma_2}\right)^2\right)}$	$\ddot{y} + 2\alpha\dot{y} + (\alpha^2 + \omega^2)y =$ $= \sqrt{2\alpha\sigma^2(\alpha^2 + \omega^2)} \xi(t)$
	2D Равномерное $p(y_1, y_2) = \frac{1}{4\Delta_1\Delta_2}$ $-\Delta_1 < y_1 < \Delta_1$ $-\Delta_2 < y_2 < \Delta_2$	$\dot{y}_1 = \frac{1}{2} a_{11} y_1 + a_{12} y_2 + \sqrt{\left(-\frac{a_{11}}{2\pi} (\Delta_1 - y_1^2)\right)} \xi_1(t)$ $\dot{y}_2 = \frac{1}{2} a_{22} y_2 + a_{21} y_1 + \sqrt{\left(-\frac{a_{22}}{2\pi} (\Delta_2 - y_2^2)\right)} \xi_2(t)$
	2D Гиперболическое $p(y_1, y_2) = \rho(\lambda) = C_1(\lambda + b)^{-\delta}$ $b > 0; \quad \delta > 1$ $\lambda = \frac{1}{2} y_1^2 - \frac{a_{12}}{2a_{21}} y_2^2$	$\dot{y}_1 = a_{11} y_1 + a_{12} y_2 - \frac{2a_{11}^2}{(\delta - 1)^2} \times$ $\times \left[ \frac{1}{2} y_1^2 - \frac{a_{12}}{2a_{21}} y_2^2 + b \right] y_1 -$ $- \frac{2a_{11}}{\sqrt{2\pi}(\delta - 1)} \left[ \frac{1}{2} y_1^2 - \frac{a_{12}}{2a_{21}} y_2^2 + b \right] \xi_1(t)$ $\dot{y}_2 = a_{21} y_1 + a_{22} y_2 + \frac{2a_{22}^2 a_{12}^3}{a_{21}^3 (\delta - 1)^2} \times$ $\times \left[ \frac{1}{2} y_1^2 - \frac{a_{12}}{2a_{21}} y_2^2 + b \right] y_2 +$ $+ \frac{2a_{22} a_{12}}{\sqrt{2\pi} a_{21} (\delta - 1)} \left[ \frac{1}{2} y_1^2 - \frac{a_{12}}{2a_{21}} y_2^2 + b \right] \xi_2(t)$

$$D^2(x) = \frac{\alpha}{2} \sqrt{\pi/\delta} \exp\left[\delta\left(x^2 + \frac{\gamma}{2\delta}\right)^2\right] \operatorname{erfc}\left[\sqrt{\delta}\left(x^2 + \frac{\gamma}{2\delta}\right)\right], \quad (\text{П.26})$$

где  $\operatorname{erfc}(y)$  – специальная функция ошибки, определяемая как

$$\operatorname{erfc}(y) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_y^{\infty} e^{-t^2} dt. \quad (\text{П.27})$$

Случай  $\gamma < 0$  и  $\delta > 0$  соответствуют бимодальному распределению, а  $\gamma > 0$  и  $\delta = 0$  – гауссовскому распределению. Семейство распределений вероятностей Пирсона будет выглядеть

$$J(x) = \frac{a_1 x + a_0}{b_2 x^2 + b_1 x + b_0}, \quad (\text{П.28})$$

а в специальном случае, при  $a_0 + b_1 = 0$ ,

$$D^2(x) = -\frac{2\alpha}{a_1 + b_2} (b_2 x^2 + b_1 x + b_0). \quad (\text{П.29})$$

Таким образом, структура формирующих фильтров с автокорреляционной функцией (П.1) и различными функциями плотности распределения вероятности может быть описана типовыми структурами формирующих фильтров, представленных в табл. 3. Аналогичным методом определяются структуры формирующих фильтров для случайных процессов с автокорреляционными функциями (П.2) и (П.3) различными функциями распределения вероятностей.

В табл. 4 приведены структуры формирующих фильтров для автокорреляционной функции (П.3) для типовых функций плотности распределения вероятностей в двумерном случае. Примеры применения методологии стохастического моделирования случайных процессов [26–28] с требуемой функцией плотности распределения вероятностей представлены на рис. 10. Другие методы моделирования случайных процессов и гарантированных оценок стохастической устойчивости схем численного интегрирования стохастических дифференциальных уравнений описаны в [29–33] и учтены при моделировании рассматриваемых стохастических нелинейных моделей ОУ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куравики И., Литвинцева Л.В., Такаhashи К. и др. Построение робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно нелинейными динамическими системами. 1 // Изв. РАН. ТИСУ. 2004. № 4.
2. Петров Б.Н., Гольдштейн И.И., Ульянов С.В. и др. Теория моделей в процессах управления: Информационные и термодинамические аспекты. М.: Наука, 1978.

3. Litvintseva L.V., Takahashi K., Ulyanov S.S. et al. Intelligent robust control design based on new types of computations. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. V. 60. 2004.
4. Петров Б.Н., Ульянов Г.М., Ульянов С.В. и др. Проблемы управления релятивистскими и квантовыми динамическими системами. М.: Наука, 1982.
5. Алиев Р.А., Ульянов С.В. Нечеткие модели процессов и систем управления // Итоги науки и техники (ВИНИТИ). Сер. Техн. кибернетика. 1990. Т. 29. 1991. Т. 32.
6. Petrov B.N., Pugachev V.S., Ulyanov S.V. et al. Informational foundations of qualitative theory of control systems // Proc. 7<sup>th</sup> IFAC. Helsinki, Finland. 1978. V. 3.
7. Ульянов С.В., Язенин А.В., Такаhashи К. и др. Моделирование и проектирование интеллектуальных робастных систем управления с использованием квантовых и мягких вычислений // Тез. докл. конф. по теории управления, посвященной памяти академика Б.Н. Петрова. М.: ИПУ РАН, 2003.
8. Ulyanov S.V. Self-organized control system. US patent № 6, 411, 944 B1. 1997.
9. Васильев С.И., Жерлов А.К., Федосов Е.А. и др. Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физматгиз, 2000.
10. Поляк Б.Т., Шербаков П.С. Робастная устойчивость и управление. М.: Наука, 2002.
11. Граничин О.Н., Поляк Б.Т. Рандомизированные алгоритмы оценивания и оптимизации при почти произвольных помехах. М.: Наука, 2003.
12. Ulyanov S.V., Yamafuji K., Kurawaki I. et al. Computational intelligence for robust control algorithms of complex dynamic systems with minimum entropy production. Pt 1 // J. Advanced Computational Intelligence. 1999. V. 3. № 2.
13. Ulyanov S. V., Quantum soft computing in control process design: Quantum genetic algorithms and quantum neural network approaches // Proc. WAC 2004: Soft Computing with Industrial Applications. V. 17 Spain, 2004.
14. Perroud M., Saucier A. Thermodynamics of dissipative systems // Helvetica Physica. 1987. V. 60. № 8.
15. Красовский А.А. “Опасная” энтропийная неустойчивость динамических САУ // ДАН СССР. 2000. Т. 327. № 6.
16. Bologna M., Grigoloni P., Karagiorgios M. et al. Trajectory versus probability density entropy // Physical Review. 2001. V. 64E. № 1.
17. Seifert U. Entropy production along a stochastic trajectory and an integral fluctuation theorem // Physical Review Letters. 2005. V. 95. № 4.
18. Панфилов С.А., Литвинцева Л.В., Ульянов С.С. и др. Программная поддержка процессов формирования, извлечения и проектирования баз знаний робастных интеллектуальных систем управления. // Программные продукты и системы. 2004. № 2.
19. Захаров В.Н., Ульянов С.В. Промышленные нечеткие системы управления и нечеткие регуляторы. Ч.1. Научно-организационные и технико-экономические аспекты // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1992. № 5.



20. *Panfilov S.A., Litvintseva L.V., Ulyanov S.V. et al.* Soft computing optimizer of intelligent control system structures. US patent № 20050119986, 2005.
21. *Panfilov S.A., Litvintseva L.V., Ulyanov S.V. et al.* Soft computing optimizer for intelligent control systems design: the structure and applications // *J. Systemics, Cybernetics and Informatics (USA)*. 2003. V. 1. № 5.
22. *Ulyanov S.V.* System for intelligent control based on soft computing. US patent № 6.415.272, 1998.
23. *Ulyanov S.V., Panfilov S.A., Hagiwara T.* Intelligent mechatronic control suspension system based on soft computing. US patent № 6.701.236 B1, 2001.
24. *Fujii S., Watanabe H., Panfilov S.A. et al.* Intelligent robust control system for motorcycle using soft computing optimizer. US patent № 20050197994 A1, 2005.
25. *Ulyanov S.V., Hashimoto S., Yamaguchi M.* System for intelligent control of an engine based on soft computing. US patent № 6.609.060 B1, 2001.
26. *Ulyanov S.V., Feng M., Yamafuji K. et al.* Stochastic analysis of time-variant nonlinear dynamic systems. Pts 1, 2: the Fokker-Planck-Kolmogorov equation approach in stochastic mechanics // *Prob. Engn. Mech.* 1998. V. 13. № 3.
27. *Cai G.Q., Wu C.* Modeling of bounded stochastic processes // *Prob. Engn. Mech.* 2004. V. 19. № 3.
28. *Николаенко Н.А., Ульянов С.В.* Статистическая динамика машиностроительных конструкций. М.: Машиностроение, 1977.
29. *Higham D.J.* An algorithmic introduction to numerical simulation of stochastic differential equations // *SIAM Review*. 2001. V.43. № 3.
30. *Burrage K., Burrage P.M., Tian T.* Numerical methods for strong solutions of stochastic differential equations: an overview // *Proc. R. Lond.* 2004. V. 460A. № 3946.
31. *Mao X.* Numerical solutions of stochastic functional differential equations // *LMS J. Comput. Math.* 2003. V. 6. № 2.
32. *Higham D.J., Mao X., Stuart A.M.* Exponential mean-square stability of numerical solutions to stochastic functional differential equations // *LMS J. Comput. Math.* 2003. V. 6. № 3.
33. *Acebron J.A., Spigler R.* Fast simulations of stochastic dynamical systems // *J. Computational Physics*. 2005. V. 208. № 2.