

УДК 62.4(07)

У-517



Учебно-
методические
пособия
Учебно-научного
центра ОИЯИ
Дубна

УНЦ-2013-54

С. В. Ульянов, Г. П. Решетников

ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Мягкие и дробные вычисления
в интеллектуальном управлении

Учебно-методическое пособие

2013

УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ОИЯИ

У843.4(07)
У-517

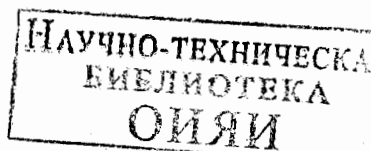
С. В. Ульянов, Г. П. Решетников

ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Мягкие и дробные вычисления
в интеллектуальном управлении

Учебно-методическое пособие

Дубна 2013



Учебное пособие написано профессором базовой кафедры Международного университета природы, общества и человека «Дубна»
«Распределенные информационно-вычислительные системы»
С. В. Ульяновым и доцентом Г. П. Решетниковым (ОИЯИ).

Рецензенты: доктор технических наук профессор А. П. Рыжов,
доктор физико-математических наук профессор Г. Н. Тимошенко,
кандидат физико-математических наук доцент А. Н. Аверкин

Ульянов С. В., Решетников Г. П.

У51 Технологии интеллектуальных вычислений. Мягкие и дробные вычисления в интеллектуальном управлении: Учебно-методическое пособие. — Дубна: ОИЯИ, 2013. — 244 с.: ил.

ISBN 978-5-9530-0379-7

В пособии рассматриваются вопросы моделирования интеллектуальных систем управления и проектирования баз знаний в условиях неопределенности и информационного риска. Подробно описана функциональная структура оптимизатора баз знаний на основе технологии мягких вычислений. Обсуждаются практические особенности этапов проектирования баз знаний, позволяющие проектировать нечеткие регуляторы с требуемым уровнем интеллектуальности в реальных физических объектах управления. Приведены конкретные примеры эффективности разработанного инструментария из области интеллектуальной робототехники и мехатроники.

Пособие предназначено для студентов, аспирантов, преподавателей и специалистов, занимающихся проектированием и исследованием интеллектуальных систем управления в проблемно-ориентированных областях науки и техники.

Ulyanov S. V., Reshetnikov G. P.

Intelligent Computing Technology. Soft and Fractional Computing in the Intelligent Control: Textbook. — Dubna: OIYAI, 2013. — 244 p.: ill.

ISBN 978-5-9530-0379-7

The textbook deals with the simulation of intelligent control systems and knowledge base design technology in the conditions of uncertainty and imperfect information risk. Detailed functional structure of a knowledge base optimizer based on the soft computing technology is introduced. The practical features of the knowledge base technology for the R&D of fuzzy controllers with a required level of intelligence in real physical control objects are discussed. Industrial examples of the effectiveness of the developed toolkit of intelligent robotics and mechatronics are described.

The tool book is intended for students, teachers and professionals involved in the design and research of management systems in problem-oriented science and technology fields.

Оглавление

Предисловие	6
Введение	8
Цитированная литература к введению	13
Глава 1: Роль интеллектуальных вычислений и синергетического эффекта информации в самоорганизации знаний при проектировании робастных ИСУ	17
Введение	17
1.1. Корректность моделей ОУ и технологии интеллектуальных вычислений	19
1.1.1. Модели ОУ и «парадоксы» технологии интеллектуальных вычислений	19
1.1.2. Технология мягких вычислений	23
1.1.3. Технология квантовых вычислений	25
1.1.4. Дробное исчисление	27
1.1.5. Особенности квантовой логики вычислений	30
1.1.6. Особенности теории дробных вычислений	33
1.2. Роль дробных вычислений в интеллектуальном робастном управлении	37
1.3. Роль выбора моделей квантовых алгоритмов в задачах интеллектуального робастного управления	39
1.3.1. Структура квантовых вычислений и КА	41
1.3.2. КА в задачах интеллектуального робастного управления	43
1.4. Структура и задачи ИТ- проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ: синергетический эффект информации	45
1.4.1. Синергетический эффект (от взаимодействия подсистем) в классическом и квантовом количествах информации: квантовый информационный процесс самоорганизанием БЗ	45
1.4.2. Особенности разработки структуры информационной технологии и процессов проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ в MATLAB	51
Заключение	60
Контрольные вопросы к главе 1	61
Рекомендуемая литература к главе 1	61
Приложение к главе 1	63
Глава 2. Оптимизатор баз знаний в структуре ИСУ	66
2.1. Особенности технологии проектирования и эволюция структур робастных ИСУ	67
2.2. Структурный анализ ИСУ	76
2.2.1. Поколения и эволюция типовых структур ИСУ	76
2.2.2. Структурный анализ ИСУ с использованием ОБЗ	81
2.3. Технология проектирования робастных процессов управления в условиях непредвиденных ситуаций на основе ОБЗ	82
2.3.1. Общие положения	82
2.3.2. Методика проектирования БЗ	83
2.4. Перспективы развития программной системы	101
2.5. Система стохастического нечеткого моделирования робастных ИСУ	102
2.5.1. Методология стохастического нечеткого моделирования	102

2.5.2. Моделирование робастных законов управления для интеллектуальных нечетких ПИД-регуляторов на основе ОБЗ: сравнение с предшествующими поколениями САУ и ИСУ	105
2.6. Примеры практического применения ОБЗ в реальных ОУ	115
Заключение	116
Рекомендуемая литература к главе 2	116
Глава 3. Эффективность инструментария проектирования интеллектуальных систем управления: сравнение ОБЗ с ANFIS и AFM	118
3.1. Описание проблемы и постановка задачи	118
3.2. Нелинейный осциллятор с существенной диссипацией и локальной динамической неустойчивостью (пример 1)	119
3.3. Сравнение эффективности ОБЗ и AFM (пример 1)	124
3.4. Робастность и предельные возможности построенных баз знаний и ПИД-управления (пример 1)	131
3.5. Глобально неустойчивые динамические системы (пример 2)	138
3.6. Сравнение эффективности модуля ANFIS (MATLAB) и ОБЗ (пример 2)	152
3.7. Общие выводы	159
3.8. Заключение	165
Рекомендуемая литература к главе 3	165
Контрольные вопросы к главе 3	166
Глава 4. Проектирование ИСУ для динамически неустойчивого объекта «каретка – перевернутый маятник» на основе оптимизатора баз знаний	167
4.1. Проектирование ИСУ и верификация физической модели ОУ	167
4.1.1. Математическая и компьютерная модель системы	167
4.1.2. Макет системы	169
4.1.3. Верификация математической модели и макета	171
4.1.4. Настройка ПИД-регулятора и проектирование нечетких регуляторов	175
4.1.4.1. Получение ОС с использованием ГА – ПИД-регулятор	178
4.1.4.2. Проектирование интеллектуального управления	179
4.1.5. Моделирование и эксперимент	184
4.1.6. Выводы	188
4.2. Дистанционное проектирование и настройка БЗ НР для управления удаленным автономным роботом	189
4.2.1. Удаленное соединение с ОБЗ	189
4.2.2. Проектирование БЗ для НР с использованием ОБЗ	191
4.2.3. Моделирование и эксперимент	193
4.2.4. Анализ результатов моделирования и экспериментов	197
4.2.5. Выводы	201
4.3. Беспроводная настройка	202
4.3.1. Проектирование регуляторов	202
4.3.2. Моделирование и эксперимент	204
4.4. Общие выводы	205
Рекомендуемая литература к главе 4	205
Контрольные вопросы к главе 4	206
Глава 5. Проектирование ИСУ роботом-манипулятором	207
5.1. Постановка задачи управления	207

5.2. Описание макета системы	208
5.3. Исследование ИСУ на основе генетического алгоритма	209
5.4. Проектирование ИСУ с применением оптимизатора баз знаний на основе технологии мягких вычислений	212
5.5. Применение оптимизатора баз знаний на основе мягких вычислений: декомпозиция управления	216
5.6. Оценка качества работы систем управления	220
5.7. Выводы	225
Рекомендуемая литература к главе 5	225
Контрольные вопросы к главе 5	226
Приложение. Нечеткость и условия неопределенности в робастных системах управления	227
П.1. Учет факторов неопределенности в структурах робастных САУ	228
П.2. Проблемы разработки ИСУ на технологиях мягких вычислений	231
П.2.1. Технология мягких вычислений и описание неопределенностей	232
П.2.2. Модели нечеткого вывода	236
П.3. Принципы и отличия построения нечетких систем управления на основе мягких вычислений	239
П.4. Структура ОБЗ с учетом приращения информационного риска	244

Предисловие

В учебном пособии обсуждаются методология и методика применения некоторых прикладных моделей интеллектуальных вычислений (ИВ), рассмотрено их совместное применение в задачах управления.

В частности, в книге описаны эффективные методы и применение мягких и дробных вычислений, которые до настоящего времени были известны лишь узкому кругу специалистов.

Известно, что эффективность применяемого инструментария для решения конкретной задачи в проблемно-ориентированной области зависит от соответствия уровня интеллектуальности вычислительного инструментария уровню сложности решаемой задачи. Выбор адекватного и эффективного инструментария для конкретной проблемно-ориентированной области вызывает определенные трудности (или интуитивное противоречие) у студентов, инженеров-исследователей и разработчиков новых высоких наукоемких информационных технологий (ИТ).

Поэтому с целью разъяснения для широкого круга читателей основных положений ИВ рассматриваются основные особенности применения таких моделей на примере поиска решения новых (представляющих самостоятельный теоретический и прикладной интерес) задач робастного интеллектуального управления в условиях непредвиденных ситуаций управления и присутствия информационного риска.

Необходимость описания технологии ИВ связана, в частности, с требованиями выполнения новых физических (информационно-термодинамических) принципов робастного интеллектуального управления. К ним относятся принцип *компенсации информационной неполноты* модели (слабоструктурированных) объектов управления (ОУ) выбором соответствующего уровня ИВ и принцип *соответствия алгоритма интеллектуального управления* уровню сложности и неполноты описания внутренней и внешней среды функционирования ОУ (энтропия алгоритмической сложности Колмогорова) и др.

Для полноты понимания материала и эффективного применения разработанного программного инструментария в данном пособии проведено сравнение результатов, полученных на основе инструментария MATLAB типа ANFIS, Fuzzy Tech, AFM, генетических алгоритмов и др.

Описаны существенные недостатки используемых инструментариев (MATLAB и др.) в решении указанных задач робастного управления сложными ОУ (особенно в условиях непредвиденных ситуаций управления и информационного риска).

Показаны преимущества и эффективность применения рассматриваемого класса ИВ и разработанного инструментария, что позволяет эффективно решать классические (алгоритмически неразрешимые) задачи, в частности задачи проектирования робастных интеллектуальных систем управления.

Материал пособия основан на лекциях авторов, прочитанных в УНЦ ОИЯИ и Международном университете природы, общества и человека «Дубна». Глава 4 написана совместно с аспирантами Института системного анализа и управления университета «Дубна» А.Г. Решетниковым и Т.А. Керимовым, а глава 5 – с А.В. Николаевой.

Авторы считают своим долгом поблагодарить оппонентов и коллег за полезные обсуждения, дополнения и замечания.

Авторы глубоко признательны профессорам Е.Н. Черемисиной и В.В. Коренькову за помощь и поддержку при написании, а также Е.А. Федоровой за помощь при издании этой книги.

Отбор материала и список цитированной литературы определялся опытом, научными и практическими интересами авторов, а также ограничениями на объем пособия.

Поэтому авторы заранее приносят свои извинения многим исследователям, чьи публикации известны, но не отражены в данном учебном пособии.

Дубна, 2013

Введение

Уровень развития и коммерческая привлекательность интеллектуальных информационных технологий (ИТ) и методов оптимального принятия решений в системах управления находится в прямой зависимости от типа интеллектуальных вычислений (ИВ), применяемых в процессах извлечения, обработки и формирования знаний, а также от вида интеллектуальной базы программно-аппаратной поддержки процессов обработки и передачи информации. Поэтому развитие теории и внедрение инноваций в теории и практике систем управления нашло свое отражение, в частности, в разработке новых видов вычислений, например, для решения задач оптимизации, обучения, адаптации и самоорганизации в интеллектуальных системах управления (ИСУ) физическими экспериментами на основе технологии ИВ.

Одним из основных назначений и преимуществ эффективного применения ИСУ является возможность гарантированного достижения цели управления с максимальным качеством управления на верхнем уровне и минимальным расходом полезного ресурса системы «объект управления (ОУ) + регулятор» на нижнем (исполнительском) уровне иерархической системы автоматического управления.

На содержательном уровне данная возможность отражает назначение целенаправленной деятельности ИСУ в общем случае непредвиденных ситуаций управления.

При этом эффективность применения ИСУ зависит от уровня интеллектуальности разработанной системы (формы, вида и глубинного представления знаний).

Важную роль при формировании уровня интеллектуальности системы автоматического управления (САУ) играет выбор используемого инструментария технологии ИВ для проектирования соответствующей базы знаний (БЗ) при заданной цели управления.

Отметим особенности выбора и применения на практике технологии и методов ИВ.

Особенности технологии ИВ и принципы ИСУ. Из многочисленных моделей ИВ технологии мягких, дробных и квантовых вычислений в данном пособии выбраны не случайно. Эти инновационные технологии вычислений составляют программно-алгоритмическую платформу для ИТ проектирования самоорганизующихся ИСУ, способных функционировать и гарантировать достижение цели управления в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций и информационного риска с требуемым уровнем робастности.

Именно задача разработки самоорганизующихся ИСУ слабо структурированными объектами управления, способных функционировать и гарантировать достижение цели управления в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций и информационного риска, является наиболее актуальной (и трудно решаемой) в теории систем управления. Одним из предметов пособия является решение указанной задачи.

Решение такой задачи связано с необходимостью реализации ряда новых (для робастного интеллектуального управления) физических и информационно-термодинамических принципов:

- (i) *принципа компенсации информационной неполноты описания модели* (слабоструктурированных) ОУ выбором соответствующего уровня ИВ;

- (ii) *принципа соответствия алгоритма интеллектуального управления* уровню сложности и неполноты представления знаний о внешней среде функционирования ОУ (связь информационной энтропии с мерой алгоритмической сложности Колмогорова);

- (iii) *принципа минимума потерь полезного ресурса* (минимум обобщенной энтропии – физический закон оптимального управления) в системе «ОУ + регулятор»;

- (iv) *принципа неразрушения и повышения эффективности нижнего исполнительского уровня* системы управления за счет самоорганизации БЗ интеллектуального регулятора;

- (v) *принципа синергизма извлекаемой скрытой квантовой информации* из классических состояний спроектированных процессов управления.

Перечисленные принципы рассмотрены в данном пособии с позиции проектирования робастных интеллектуальных нечетких регуляторов (НР) в структуре системы управления физическим экспериментом.

Рассмотрим базис реализации ИТ проектирования ИСУ и парадоксы ИВ. Выполнение и реализация новых физических (информационно-термодинамических) принципов интеллектуального робастного управления осуществляются на основе решения следующих трех принципиальных проблем.

А. В первом случае в отличие от прямой задачи (описания знаний количественными характеристиками) рассматривается решение обратной задачи теории искусственного интеллекта - извлечение, обработка и формирование знаний из количественных данных эксперимента. В этом случае разработанная технология проектирования объективных БЗ на основе оптимизаторов БЗ на мягких (и далее на квантовых) вычислениях исключает субъективизм экспертных оценок, обеспечивает достижение требуемого уровня робастности ИСУ.

Б. Во втором случае рассматривается проблема разработки и физического обоснования математической модели квантового алгоритма управления самоорганизацией знаний для формирования робастных БЗ в реальном времени. Ниже показана роль прямых аналогов физических (квантовых и термодинамических) эффектов в реализации процесса гарантированного достижения качества управления на основе технологии квантовых, мягких и дробных вычислений. При этом основное внимание уделяется описанию и интерпретации качественных особенностей биологически воспроизводимой (так называемой синергетически биоинспирированной) эволюции самоорганизации, основные компоненты которой описываются квантовыми операторами и составляют физическое содержание разработанной модели квантового алгоритма управления процессом самоорганизации. Следовательно, рассматривается задача робастного управления в непредвиденных ситуациях на основе квантовых стратегий принятия решений в виде программного инструментария квантового нечеткого вывода как частного случая разработанного квантового алгоритма управления самоорганизацией знаний.

В. Решение третьей проблемы демонстрирует результаты эффективного применения ИТ проектирования робастных БЗ непосредственно в структуре контуров управления ИСУ. И ниже показаны особенности проектирования робастных БЗ для непредвиденных ситуаций управления и в условиях информационного риска для ИСУ, включающих в свою структуру оптимизаторы БЗ.

Синергизм неточной (imperfect) информации и синергетический эффект квантовой самоорганизации БЗ в условиях непредвиденных ситуаций рассмотрен в данном пособии и основан на технологии извлечения скрытой в классических состояниях (неизмеримой в общем виде классическими приборами) квантовой информации, которая является дополнительным информационным ресурсом.

В качестве классических состояний рассматриваются законы управления изменениями во времени коэффициентов усиления исполнительных автоматических устройств, которые формируют оптимальную управляющую силу (с минимальными потерями полезного ресурса в системе «ОУ + регулятор»).

Разработанная ИТ проектирования позволяет использовать данный дополнительный информационный ресурс для повышения уровня робастности ИСУ. Само свойство робастности определяется как следствие самоорганизации БЗ в ИР на нижнем исполнительском уровне управления.

Спроектированная робастная БЗ позволяет ОУ гарантированно достичь поставленной цели управления в условиях информационного риска и непредвиденных ситуаций управления.

Необходимая появления данного пособия обусловлена повышенным интересом широкого круга студенческой, инженерной и исследовательской аудитории самых различных специальностей к разработке современных технологий ИВ и их практического применения для повышения эффективности исследуемых или действующих объектов и систем управления.

Проблема созрела давно и объясняется следующим, установленным за долгий период времени (1970–2013 гг.), фактом: из-за предметной новизны применения интеллектуальных систем и математической сложности описания многие из результатов носят для инженерной аудитории в основном методологический или теоретический характер. Так, например, выбор оптимального типа и параметров функции принадлежности, проектирование БЗ в теории нечетких систем (нечетких регуляторов) носит до сих пор эвристический характер, что вызывает трудности при исследовании и разработке ИСУ.

Поясним некоторые общие особенности данной проблемы.

1. Как правило, в публикациях отсутствует необходимая (для инженерной аудитории или начинающих исследователей) корректная физическая интерпретация разработанных моделей мягких вычислений и получаемых на их основе результатов. В частности, учебные университетские программы обучения (как в РФ, так и за рубежом) поверхностно освещают (или совсем не включают) перечисленные вопросы.
2. Отмеченный выше факт объясняется наличием неполного описания практического опыта обучения, проектирования и промышленной эксплуатации интеллектуальных систем, а также отсутствием принципиального решения одной из основных задач теории искусственного интеллекта: извлечение, обработка и формирование объективных знаний из количественных данных физических экспериментов или динамического поведения системы.
3. В инженерном программном инструментарии компании MathWorks (MATLAB) не представлен должным образом раздел проектирования ИСУ и БЗ. В результате на практике используется по существу инструментарий

экспертных систем или элементы технологии мягких вычислений (упрощенные модели генетических алгоритмов и нечеткие нейронные сети типа ANFIS) без обеспечения, например, необходимого уровня робастности и полноты БЗ.

4. В инженерной аудитории часто бытует мнение об «экзотическом» виде других новых типов ИВ, имеющих ограниченное применение в практике системной инженерии.

Особенности содержания пособия состоят в том, что оно отражает необходимые теоретические и прикладные результаты в области разработки новых видов ИВ: ИТ проектирования робастных ИСУ на основе мягких, дробных и квантовых вычислений, включающих в себя реализацию процессов *обучения, адаптации и самоорганизации*. Одновременно представлены ответы на проблемы применения в сложившейся ситуации новых видов ИВ в системной инженерии.

В области разработки моделей мягких вычислений опубликовано большое число статей и книг. Поэтому авторы рассчитывают на минимальную информированность читателя (в рамках пособий по мягким вычислениям). Предлагается изложение материала на примере проблемно-ориентированной области применения данного класса ИВ.

Содержание пособия имеет принципиальное отличие от работ [1–17], относящихся к структурному проектированию моделей интеллектуального управления, и представляет новое направление в области информационных технологий разработки и проектирования робастных ИСУ.

В этом смысле пособие обобщает и развивает работы [10–12, 18, 19], являясь, по мнению авторов, первой публикацией подобного рода в мировой практике.

Выделим некоторые особенности разработанного подхода к структурному проектированию моделей интеллектуального управления и его отличия от известных работ [1–17, 20–75] по разработке ИСУ.

- Применение ИВ и квантового алгоритма самоорганизации БЗ позволяет в реальном времени достичь цели управления в непредвиденных ситуациях за счет повышения уровня робастности ИСУ в проблемно-ориентированной области. Вычислительным базисом отмеченных направлений разработок является технология квантовых, дробных и мягких вычислений.
- Важным для системной инженерии результатом применения ИТ проектирования ИСУ является показанная возможность реализации квантовых алгоритмов и квантовых вычислений на *типовом* (а не на гибридном квантовом процессоре типа D – Wave и др.) процессоре в стандартной конфигурации аппаратной поддержки роботов-манипуляторов и автономных роботов как объектов физического эксперимента.
- Поэтому из многочисленных моделей ИВ в качестве примера в пособии представлены прикладные разработки технологий мягких, дробных и квантовых вычислений. Отметим, что в пособии рассматривается взаимосвязь технологий ИВ с другими направлениями типа квантового программирования, квантовых облачных (cloud), вслепую (blind) вычислений, ДНК-вычислений и др.
- Отмеченная актуальность и широта аудитории пользователей технологиями ИВ объясняется также следующим обстоятельством: одной из предметных областей применения технологий ИВ является разработка прорывных интеллектуальных наукоемких ИТ. Поэтому в пособии доступно (без потери необходимой

математической и физической строгости) изложены принципиальные вопросы разработки и эффективного применения технологий ИВ.

- В пособии подробно разъяснены возникающие логические «парадоксы» получаемых результатов на основе технологии ИВ, вызывающих в инженерной аудитории трудности в наглядной физической и математической интерпретации.

В работах [1–17, 20–74] по исследованию и разработке ИСУ не решены следующие принципиальные задачи, которые снижают достоверность и ценность представленных результатов:

- спроектированные структуры ИСУ не удовлетворяют сформулированным ранее пяти принципам построения ИСУ;
 - отсутствует методология выбора оптимальной структуры нечеткой нейронной сети;
 - отсутствует возможность аппроксимации обучающего сигнала с наперед заданной ошибкой;
 - выбор типа и вида функций принадлежности, а также параметров функции принадлежности не обоснован;
 - спроектированные структуры ИСУ не обладают требуемым уровнем робастности в непредвиденных ситуациях управления;
 - отсутствует методология построения обучающего сигнала;
 - отсутствует метод измерения и построения обучающего сигнала непосредственно с действующей физической модели объекта управления;
 - отсутствует методология извлечения знаний и построения робастных баз знаний на основе обучающего сигнала;
 - инструментарию Fuzzy Toolkit MATLAB, ANFIS, FIS, AFM и др. не обеспечивают возможность проектирования робастных БЗ нечетких контроллеров;
 - отсутствует методология и инструментарий проектирования гибридных нечетких ИСУ;
- и мн. др.

Перечисленные недостатки указанных работ устранены на основе применения разработанного оптимизатора на мягких вычислениях [19, 75, 76] и проиллюстрированы в пособии на доступных примерах, имеющих самостоятельное значение.

Практическая направленность пособия состоит в том, что основное внимание уделено практическому применению данных видов ИВ. Материал пособия может рассматриваться как научное исследование, как учебное и практическое пособие для исследовательских центров промышленных компаний или как дополнительные темы исследований в магистерских и аспирантских диссертациях. В качестве наглядных примеров для системной инженерии выбраны объекты ИТ проектирования ИСУ в проблемно-ориентированной области – программно-аппаратная поддержка интеллектуальной робототехники и мехатроники, инструментарий оптимизаторов БЗ на основе квантовых мягких вычислений для проектирования робастных дробных регуляторов и др.

Цитированная литература к введению

1. *Kaynak O., Zadeh L.A., Turksen B., Rudas I.J.* (Eds.) Computational intelligence: Soft computing and fuzzy-neuro integration with applications. Berlin: Springer-Verlag (NATO ASI Series, Series F). V. 162. 1998.
2. *Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А. и др.* Интеллектуальное управление динамическими системами. М.: Физматгиз, 2000.
3. *Лебедев Г.Н.* Интеллектуальные системы управления и их обучение с помощью методов оптимизации (Учебное пособие). М.: МАИ, 2002.
4. *Усков А.А., Круглов В.В.* Интеллектуальные системы управления на основе методов нечеткой логики. Смоленск: Смол. город. типография, 2003.
5. *Макаров И. М., Лохин В. М., Манько С. В. и др.* Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006.
6. *Гостев В.И.* Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радио і матор, 2008.
7. *Васильев В.И., Ильясов Б.Г.* Интеллектуальные системы управления. Теория и практика. М.: Радиотехника, 2009.
8. Интеллектуальные системы управления (ред. *Васильев С.Н.*). М.: Машиностроение, 2010.
9. *Ponce-Cruz P., Ramirez-Figueroa F.D.* Intelligent control systems with Lab VIEW™. Berlin: Springer Verlag, 2010.
10. *Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат И.И., Ульянов С.В.* Теория моделей в процессах управления: Информационный и термодинамический аспекты. М.: Наука, 1978.
11. *Алиев Р.А., Ульянов С.В.* Интеллектуальные промышленные системы управления I, II // Итоги науки и техники. Сер. техн. кибернетика. 1990. Т. 29; 30.
12. *Захаров В.Н., Ульянов С.В.* Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. II. Эволюция и принципы проектирования // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1993. № 4. С. 189 – 205.
13. *Wen Y.* (Ed.). Recent advances in intelligent control systems. Springer Verlag, 2009.
14. *Szederkényi G., Lakner R., Gerzson M.* Intelligent control systems: An introduction with examples. Kluwer Acad. Publ., 2002.
15. *Behera L., Kar I.* Intelligent systems and control principles and applications. Oxford University Press, 2010.
16. *Nanayakkara T., Jamshidi M., Sahin F.* Intelligent control systems with an introduction to system of systems engineering. CRC Press, 2009.
17. *Shin Y.C., Xu Ch.* Intelligent systems: Modeling, optimization, and control (Automation and Control Engineering). CRC Press, 2008.
18. *Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В., Хазен Э.М.* Информационно-семантические проблемы управления и организации. М.: Наука, 1977.
19. *Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А.* Интеллектуальное робастное управление: Технологии мягких вычислений. М.: ВНИИгеосистем, 2011.
20. *Пупков К.А., Коньков В.Г.* Интеллектуальные системы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.

21. Пупков К.А. Современные методы, модели и алгоритмы интеллектуальных систем. Учеб. пособие. М.: РУДН, 2008.
22. Пупков К.А., Егунов Н.Д. Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001.
23. Кулаков С.М., Трофимов В.Б., Лохин В.М. Интеллектуальные системы управления технологическими объектами: Теория и практика. Новокузнецк: СибГИУ, 2009.
24. Евгеньев Г. Б. Интеллектуальные системы проектирования. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009.
25. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов А.С. Нечеткие модели и сети. М.: Горячая Линия – Телеком, 2007.
26. Геловани В.А., Башлыков А.А., Бритков В.Б., Вязилов Е.Д. Интеллектуальные системы поддержки решений в нештатных ситуациях с использованием информации о состоянии природной среды. М.: Эдиториал, 2001.
27. Алиев Р.А., Алиев Р.Р. Теория интеллектуальных систем. Баку: Чашигоглу, 2001.
28. Алиев Р.А., Церковный А.З., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат, 1991.
29. Гаврилов А.В. Гибридные интеллектуальные системы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003.
30. Коломейцева М.Б., Хо Д.Л. Адаптивные системы управления динамическими объектами на базе нечетких регуляторов. М.: Компания Спутник+, 2002.
31. Швецов А.Н. Интеллектуальные информационные системы. Вологда: ВоГТУ, 2009.
32. Аверкин А.Н., Федосеева И.Н. Параметрические логики в интеллектуальных системах управления. М.: ВЦ РАН, 2000.
33. Валеев С.С. Проектирование интеллектуальных систем управления динамическими объектами на основе принципа минимальной сложности (На примере авиационных двигателей). Автореферат на соискание ученой степени доктора технических наук. Уфа: УАГУ, 2005.
34. Каляев И.А. Интеллектуальные роботы. М.: Машиностроение, 2007.
35. Семенов Н.А. Интеллектуальные информационные системы. Тверь: ТГТУ, 2004.
36. Грибова В.В., Клещев А.С., Шалфеева Е.А. Системы управления интеллектуальными Интернет-приложениями. Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2010.
37. Искандеров Ю.М. Создание баз знаний интеллектуальных систем. М.: МО РФ, 2003.
38. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб: Питер, 2000.
39. Чистякова Т.Б., Бойкова О.Г., Чистяков Н.А. Интеллектуальное управление многоассортиментным коксохимическим производством. СПб: ЦОП Профессия, 2010.
40. Пупков К.А., Егунов Н.Д., Баркин А.И., Зайцев А.В. и др. Методы классической и современной теории автоматического управления. Том 5. Методы современной теории автоматического управления. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004.
41. Ярушкина Н.Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. М.: Финансы и Статистика, 2004.
42. Рыбина Г.В. Основы построения интеллектуальных систем. М.: Финансы и Статистика, 2010.

43. Антамошин А.Н., Близнава О.В., Бобов А.В., Большаков А.А. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами. М.: Горячая Линия - Телеком, 2006.
44. Буреш О.В., Жук М.А. Интеллектуальные информационные системы управления социально-экономическими объектами. Краснодар: Красанд, 2012.
45. Тарасик В.П., Рынкевич С. Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами. М.: Технопринт, 2012.
46. Поляхов Н.Д., Приходько И.А., Кузнецов В.Е., Якунов О.Э. Интеллектуальные системы управления. СПб: СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2010.
47. Пятковский О.И. Интеллектуальные информационные системы (нейронные сети). Барнаул: АлтГТУ, 2010.
48. Афонин В.А., Макушкин В.А. Интеллектуальные роботы. М. Машиностроение, 2005.
49. Усков А.А., Кузьмин А.В. Интеллектуальные технологии управления: Искусственные нейронные сети и нечеткая логика. М.: Горячая Линия – Телеком, 2004.
50. Лукьянов А.А. Интеллектуальные задачи мобильной робототехники. Иркутск: ИГУ, 2005.
51. Цветков В., Розенберг И. Интеллектуальные транспортные системы: Принципы, особенности, эволюция. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
52. Асадуллин В., Утляков Г. Интеллектуальные системы управления: Комбинированные системы регулирования напряжения с элементами искусственного интеллекта для бесконтактных синхронных генераторов. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
53. El-Naggar A.A. Intelligent control. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
54. Kuljaca O., Lewis F., Horvat K. Intelligent control of industrial and power systems: Adaptive neural network and fuzzy systems. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
55. Khuntia P. Intelligent control strategies for aircraft and other dynamic systems. LAP Lambert Academic Publishing, 2010.
56. Lutfy O.F., Bahari S., Noor B. M., Marhaban M. H. Design of an intelligent control system for conveyor-belt grain dryers An application of soft computing techniques in grain drying systems. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
57. Gaeid K.S., Ping H.W., Almushhadany Y. Modeling & fault diagnosis of IM by using intelligent control. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
58. Cortesão R. Kalman techniques for intelligent control systems: Theory and robotic experiments. LAP Lambert Academic Publishing, 2010.
59. Luo M. Advanced intelligent vehicles control by considering natural environment impacts: Simulation in a virtual reality platform. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
60. Ariyono S. Adaptive artificial neural network controller for electromechanical continuously variable transmission. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
61. Salami A. Design of hybrid fuzzy logic controllers performance evaluation and practical application with PIC16F877A. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
62. Chen Y. Dynamical modelling of space tether flexible motorised momentum exchange tether and hybrid fuzzy sliding mode control for spin-up. LAP Lambert Academic Publishing, 2010.

63. *Jalali K.* Stability control of electric vehicles with in-wheel motors: A new approach using soft computing techniques. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
64. *Patel J., Gianchandani R.* ANFIS control for robotic manipulators: Adaptive neuro fuzzy inference systems for intelligent control. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
65. *Zafar Z., Javed A., Zaid S.* Autopilot system for an unmanned aerial vehicle (UAV): Adaptive neuro fuzzy inference based control system. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
66. *Kaur A., Kaur A.* Fuzzy logic and neuro fuzzy algorithms for air conditioning system: Comparison of techniques. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
67. *Chiang C.-H.* Soft computing based intelligent control systems and applications: The lifelong learning control systems. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
68. *Нукифоров В.О., Слута О.В., Ушаков А.В.* Интеллектуальное управление в условиях неопределенности. Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011.
69. *Castillo O.* Type-2 fuzzy logic in intelligent control applications. Publ.: Springer, 2011.
70. *Zdenko K, Bogdan S.* Fuzzy controller design: Theory and applications. Publ.: CRC Press., 2006.
71. *Reznik L.* Fuzzy controller's handbook: How to design them, How they work. Publ.: Newnes, 1997.
72. *Kai M.* Fuzzy control: Fundamentals, stability and design of fuzzy controllers. Publ.: Springer, 2006.
73. *Feng G.* Analysis and synthesis of fuzzy control systems: A model-based approach. Publ.: CRC Press, 2010.
74. *Castillo O., Melin P., Pedrycz W.* Soft computing for hybrid intelligent systems. Publ.: Springer, 2008.
75. *Ulyanov S.V.* et al. Soft computing optimizer of intelligent control system structures. Patent PCT WO 2005/013019 A3. Publ. Date 10. 02. 2005; Patent US 7,219,087B2. Date of Patent. May 15, 2007.
76. *Ulyanov S.V.* et al. System for soft computing simulation. Patent US 2006/0218108 A1. Date of Patent. Sept. 28, 2006.

Глава 1. Роль интеллектуальных вычислений и синергетического эффекта информации в самоорганизации знаний при проектировании робастных ИСУ

Введение

В данном пособии рассмотрены¹ основные определения, положения и принципы современной теории интеллектуальных вычислений. Приведены результаты применения теории мягких вычислений и нечетких систем в задачах теории и систем управления, рассмотрены конкретные примеры моделирования существенно-нелинейных, слабо структурированных моделей объектов управления (ОУ), интеллектуальной робототехники и мехатроники, представляющих самостоятельный интерес для теории и систем управления. Обсуждены вопросы разработки и моделирования в MATLAB/SIMULINK интеллектуальных систем управления (ИСУ) и оценки их робастности в непредвиденных ситуациях управления и информационного риска.

Следует отметить, что изложенная в книге методология применения MATLAB/SIMULINK в проектировании робастных ИСУ существенно отличается от идеологии и методологии инструментария Fuzzy Logic Toolbox и Robust Control, встроенных в MATLAB, и многочисленных примеров применения указанных инструментариев.

Отличительной особенностью излагаемого подхода является применение универсального (проблемно-независимого) оптимизатора баз знаний (ОБЗ), разработанного на основе технологии мягких вычислений. Подробно рассмотренный инструментарий ОБЗ позволяет проектировать робастные БЗ, а также устранять ряд недостатков методологии инструментария модулей Fuzzy Logic Toolbox и Robust Control, встроенных в MATLAB².

В частности, разработанный инструментарий ОБЗ позволил решить ранее не решаемые в классической теории управления и интеллектуальных систем задачи. К таким задачам относятся в первую очередь следующие: 1) оптимальное проектирование структуры нечеткой нейронной сети (ННС) с наперед заданной точностью аппроксимации сигнала обучения; 2) проектирование требуемого уровня робастности; 3) определение оптимального числа продукционных правил и их внутренней структуры (конструирование универсального аппроксиматора); 4) выбор оптимального типа

¹ Ульянов С.В., Литвинцева Л.В. Интеллектуальное робастное управление: Технологии мягких вычислений. (2-е переработанное издание). М.: ВНИИгеосистем, 2013.

² Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия – Телеком, 2007; Sumathi S.P. Computational intelligence paradigms: Theory and applications using MATLAB. N.Y.: CRC Press, 2010; Ponce-Cruz P., Ramirez-Figueroa F.D. Intelligent control systems with Lab VIEW™. Berlin: Springer Verlag, 2010; MATLAB for Engineers – Applications in control, electrical engineering, IT and robotics (Ed. K. Perutka). In Tech Publ. 2011; MATLAB – A Ubiquitous tool for the practical engineer (Ed. C.M. Ionescu). In Tech Publ. 2011; Applications of MATLAB in science and engineering (Ed. T. Michalowski). In Tech Publ. 2011; Scientific and engineering applications using MATLAB (Ed. E.P. Leite). In Tech Publ. 2011; Ruano A. Intelligent control systems using computational intelligence techniques. L.: IEE Control Series. V. 70. 2008; Negnevitsky M. Intelligent control design with MATLAB and SIMULINK. Intensive Course. Singapore: ТЕКВАС, 2011; Behera L. Intelligent systems and control principles and applications. Oxford: University Press, 2010; MATLAB – Modelling, Programming and Simulations (Ed. E.P. Leite). In Tech Publ. 2010; Valerio D. Ninteger v. 2.3 fractional control toolbox for Matlab. Univ. Techn. e Lisboa (Inst. Superior Technico), 2005.

**Научно-техническая
библиотека
ОИЯИ**

нечеткого логического вывода; 5) определение вида и оптимальных параметров функции принадлежности в правилах «Если А, то В» для типовой структуры нечеткого регулятора; 6) корректное тестирование робастности ИСУ и мн. др.

Итоги многолетнего практического опыта промышленного применения MATLAB в реальных проектах Yamaha Motor Co., Ltd, ST Microelectronics, Pronet Group (PronetLabs) и др. выявили следующий факт. Инструментарий программных модулей (типа Fuzzy Logic Toolbox, ANFIS, и Robust Control) в принципе не может решать корректно и эффективно вышеперечисленные задачи. Причина заключается в отсутствии необходимого уровня интеллектуальных вычислений в структурах инструментария указанных модулей³, что не позволяет решать задачи проектирования ИСУ с требуемым уровнем робастности. Примеры сравнения результатов моделирования на ОБЗ с упомянутыми модулями MATLAB приведены на так называемых типовых Benchmarks, которые наглядно показали высокую эффективность применения ОБЗ на мягких вычислениях в исследовании робастности ИСУ, функционирующих в непредвиденных ситуациях управления.

В настоящей книге обсуждаются также более глубокие механизмы разработки новых моделей интеллектуальных вычислений типа дробных исчислений, а также квантовых вычислений и проектирования процессов самоорганизации баз знаний (БЗ) на основе квантовых алгоритмов (КА), позволяющие расширить возможности проектирования ИСУ с более высоким уровнем робастности.

Необходимость исправления недостатков и расширения возможностей инструментария MATLAB при применении в процессах проектирования ИСУ объясняется также резким повышением сложности физических моделей традиционных ОУ, функционирующих в условиях непредвиденных ситуаций управления, а также исследованием новых моделей ОУ, разработанных на основе законов квантовой механики, теории относительности и термодинамики.

Процессы извлечения, обработки знаний и проектирования БЗ для такого рода ОУ требуют разработки новых видов наукоемких ИТ⁴, которые отсутствуют в программной среде MATLAB и успешно решаются на новых видах интеллектуальных вычислений⁵. При этом качество извлеченных знаний и проектирование объективных БЗ находятся в прямой зависимости от точности и адекватности физической и математической модели ОУ⁶. В пособии приведено также сравнение полученных результатов с соответствующими результатами моделирования Benchmarks.

³ Мишин А.А., Нефедов Н.Ю., Петров С.П., Полунин А.С., Литвинцева Л.В. Методы построения баз знаний для управления нелинейными динамическими системами // Системный анализ в науке и образовании: электрон. научн. журнал. Дубна, 2011. №2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/11> (дата обращения: 24.07.2011). Идентификационный номер: 0421100111\0008.

⁴ Ульянов С.В. Модели квантовых релятивистских объектов управления и компьютерные информационные нанотехнологии // Системный анализ в науке и образовании: электрон. научн. журнал. Дубна, 2012. № 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive>. Идентификационный номер: 0421100111\0008.

⁵ Ульянов С.В. Технология применения квантовых и дробных вычислений совместно с инструментарием MATLAB для проектирования интеллектуальных робастных систем управления // Системный анализ в науке и образовании: электрон. научн. журнал. Дубна, 2011. № 4 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive>. Идентификационный номер: 0421100111\0034.

⁶ Ульянов С.В., Решетников Г.П., Мишин А.А. Физическая корректность знаний и алгоритмическая сложность описания робастных моделей объектов управления. Ч.1 // Системный анализ в науке и

Следует также подчеркнуть, что стремительная смена элементной базы⁷ аппаратной поддержки и вычислительных средств на основе гибридных квантовых чипов^{8,9} позволяет существенно расширить прикладные области применения интеллектуальных контроллеров и встраиваемых ИСУ с ОБЗ на квантовых мягких вычислениях.

Данные результаты составляют базис новой квантовой интеллектуальной информационной технологии проектирования робастных ИСУ и расширяют возможности применения инструментария MATLAB/SIMULINK при решении практических задач нового класса систем управления и системной интеллектуальной инженерии.

1.1. Корректность моделей ОУ и технологии интеллектуальных вычислений

Выбор физического базиса и математического способа определения критерия корректного описания модели ОУ существенно влияет на качество процесса извлечения объективных знаний из динамического поведения ОУ и на формирование робастных БЗ в ИСУ. В результате существует понятие физической и математической корректности описания ОУ, а также применяется понятие физической, математической и расчетной модели ОУ.

Поэтому рассмотрим предварительно качественные особенности построения корректных моделей ОУ. Обсудим также их взаимосвязь с моделями интеллектуальных вычислений, таких как мягкие, дробные исчисления и квантовые вычисления в задачах проектирования робастных ИСУ, и рассмотрим подробно роль возникающих мнимых «парадоксов» при их применении в системной интеллектуальной инженерии.

1.1.1. Модели ОУ и «парадоксы» технологии интеллектуальных вычислений

Разработка логически непротиворечивых и адекватных (корректных) физическим условиям и ограничениям математических моделей ОУ с целью объективного извлечения знаний из динамического поведения для эффективной реализации ИСУ новыми видами современной техники является одной из актуальных проблем для современного этапа развития теории и систем управления. Выбор корректной модели, в первую очередь ОУ минимальной алгоритмической сложности, является важной для практики задачей. Однако критерий минимальной алгоритмической сложности при выборе метода описания модели ОУ требует математического уточнения и физического обоснования¹⁰.

А. Системный анализ разработки и проектирования ИСУ для многих моделей такого рода ОУ тесно связан с необходимостью *корректного* учета существующих физических ограничений. Ограничения на описание динамического поведения

образования: электрон. научн. журнал. Дубна, 2011. № 3 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive>. Идентификационный номер: 0421100111\0025.

⁷ Houck A.A., Tureci H.E., Koch J. On-chip quantum simulation with superconducting circuits // Nature Physics. 2012. V. 8. P. 292 – 299.

⁸ Johnson M.W. et al. Quantum annealing with manufactured spins // Nature. 2011. V. 473. No. 7346. P. 194 – 198.

⁹ Perdomo-Ortiz A., Dickson N., Drew-Brook M., Rose G., Aspuru-Guzik A. Filing low-energy conformations of lattice protein models by quantum annealing // arXiv:1204.5485v1 [quant-ph]. 2012.

¹⁰ Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. Алгоритмическая сложность и информационная теория управления // Итоги науки и техники. сер. Техническая кибернетика. М.: ВИНТИ АН СССР. 1979. Т. 11. С. 77 – 147.

сложного физического ОУ (в частности, на предельную точность процессов измерений и управления; выбор модели пространства-времени и др.) накладываются известными физическими законами (из таких дисциплин, как статистическая механика, теория относительности, термодинамика, теория информации и квантовая механика).

Примерами таких ограничений являются следующие: 1) термодинамические ограничения на физическую реализацию математических моделей ОУ; 2) различные типы обобщенных информационных соотношений неопределенности Гейзенберга; 3) квантовые ограничения на пропускную способность передачи информации с учетом термодинамических флуктуаций; 4) квантовые оценки предельных возможностей точности измерений параметров ОУ и процессов управления в нанотехнологиях и мн. др. Данные физические ограничения должны быть учтены в алгоритме проектирования объективных БЗ в ИСУ.

Повышение требований к точности управления на физическом уровне описания моделей ОУ, например, в области нанотехнологий, с учетом квантовых эффектов (в таких как исполнительные устройства - квантовые электромеханические системы [1 – 4]), приводит к логическому переходу в квантовую область процессов измерений и управления на атомно-молекулярном уровне [5, 6].

В свою очередь, происходит неизбежный пересмотр физических основ самой теории управления [7 – 13]. Аналогичный результат получен при разработке основ квантовой теории информации и квантовых вычислений, приведших к пересмотру аксиоматики моделей физических вычислений и логическому обобщению тезиса Тьюринга - Черча [14 – 17].

Многие из перечисленных проблем физической теории и систем управления рассматривались ранее [7, 11, 18 – 20]. Были рассмотрены конкретные примеры и получены важные выводы о необходимости учета физической природы самого ОУ в структуре и предельных возможностях процессов управления [7 – 10]. Роль корректной интерпретации физической и математической моделей эксперимента¹¹, взаимосвязь с необходимым уровнем полноты извлекаемых при измерении знаний, алгоритмической сложности математических моделей ОУ и влияние перечисленных факторов на робастность формируемой БЗ в ИСУ (функционирующих в динамически изменяющихся непредвиденных ситуациях управления) в теории управления практически не исследовались.

Принципиальное значение при формировании объективных знаний имеет глобальная оценка функциональной реализуемости различных видов аппроксимации моделей при наличии логико-информационных границ и физических (термодинамических, квантово-релятивистских) ограничений на описание реальных нелинейных ОУ [10].

На основе достоверности извлекаемого количества информации определяется информационная оценка приращения риска (статистической корректности) формируемого описания модели ОУ и границ ее применимости. В результате методология оценки корректности математических моделей слабо структурированных физических ОУ находится в стадии своего становления и требует привлечения новых видов интеллектуальных вычислений, способных установить причинно-следственные связи и взаимоотношения подсистем.

¹¹ Пытьев Ю.П. Математические методы интерпретации эксперимента. М: Высшая школа, 1989.

Поэтому *принцип компенсации неполноты описания модели физического ОУ* разработкой и применением соответствующего уровня интеллектуальных вычислений является одним из основных при исследовании слабо структурированных моделей ОУ.

Б. В теории систем управления одним из эффективных подходов снижения риска принятия решения (от неполноты описания модели ОУ и внешней среды) является разработка структур робастных ИСУ. Данные структуры реализуют принцип компенсации неопределенности описания модели ОУ за счет повышения уровня интеллектуальности традиционных систем управления. В частности, компенсация информационной неопределенности осуществляется за счет повышения интеллектуальности нижнего исполнительского уровня в виде соответствующих структур интеллектуальных регуляторов и соответственно спроектированных самоорганизующихся робастных БЗ. Неизмеримые (ненаблюдаемые) обобщенные координаты динамического поведения ОУ или скрытая в классических состояниях квантовая информация в законах управления ИСУ, существующая в силу квантовой нелокальной корреляции, являются одним из примеров такой ситуации управления. Подобные эффекты должны быть учтены и скомпенсированы продукционными логическими правилами в соответствующих БЗ проектируемых робастных ИСУ.

Как следствие, возросшие требования к повышению надежности функционирования сложных (в общем случае слабо структурированных) ОУ в условиях информационного риска и непредвиденных (нештатных) ситуациях управления привели к необходимости разработки соответствующей информационной технологии (ИТ) проектирования и повышения уровня робастности ИСУ. Базисом такой ИТ является применение новых видов интеллектуальных вычислений, основанных на нестандартных моделях логического (в общем случае *немонотонного*) вывода. Однако применение на практике нестандартных логик, используемых в основе технологий интеллектуальных вычислений, и главное, выводы, полученные с их применением в задачах принятия решений и управления, часто приводят к мнимым «парадоксам» и противоречию с интуитивными представлениями инженера-исследователя об ожидаемом результате.

При этом отметим, что сам термин «нестандартная» логика уже включает такую ситуацию, а его введение обосновано стремлением решать задачи, не решаемые существующими технологиями проектирования. К таким технологиям интеллектуальных вычислений относятся мягкие, дробные и квантовые вычисления (и их сочетания), рассматриваемые в данной книге с точки зрения применения в задачах проектирования робастных БЗ и интеллектуальных ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления и информационного риска.

В. Применение новых технологий в инженерной практике, теории и системах управления часто осложняется проблемами преодоления инерции «прагматической» инженерной интуиции и философии системной инженерии. Так происходило, например, в начале 70-х гг. прошлого столетия при внедрении в инженерную практику идей мягких вычислений на основе теории нечетких множеств (один из авторов является одним из пионеров в этой области¹²) в процессы проектирования нечетких регуляторов и систем управления. Суть возникающих «парадоксов» заключается в физической и логической интерпретации понятия числа, производной и интеграла как

¹² См. первую в мировой практике книгу по проектированию нечетких систем управления: Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат И.И., Ульянов С.В. Теория моделей в процессах управления. М.: Наука, 1978.

исходного базиса моделирования ОУ и проектирования систем управления. Поясним данный факт наглядными примерами, которые позволяют установить причинно-следственные связи и обосновать результаты физической интерпретации возникающих мнимых логических «парадоксов». Например, понятия производной и интеграла нецелочисленных (дробных) порядков, лежащих в основе дробного исчисления, при первом знакомстве с ними вызывают существенные затруднения при попытке их наглядной геометрической и корректной физической интерпретации, которые препятствуют широкому использованию этого исчисления в прикладных областях исследований и разработок робастных систем управления.

Достаточно отметить, что в зависимости от определения производной нецелочисленного порядка применение производной такого типа к постоянной величине приводит к «парадоксу» – результат отличен от нуля. Хотя история возникновения и развития дробного исчисления насчитывает уже более трех столетий, его основы не изучаются в большинстве курсов математического анализа технических университетов. Между тем суть перехода от классического математического анализа к его обобщению, которым и является дробное исчисление, может быть достаточно просто изложена с помощью приемов, уже известных в математике (см. ниже, п. 1.1.4).

Г. В традиционных исчислениях по количественному результату численного алгоритма осуществляется соответствующая оценка качественного свойства исследуемого объекта. Логическая оценка качества в общем случае может быть осуществлена только в конце количественных вычислений, а для алгоритмически неразрешимых численных проблем (сложность алгоритма по Колмогорову) часто искомая оценка не может быть достигнута. Основой интеллектуальных вычислений является не только возможность применения операций на числовых шкалах (как в традиционных вычислениях), но и введение новых видов операций на шкалах, определяющих качественные характеристики исследуемого объекта. В этом случае цель применения интеллектуальных вычислений заключается в реализации возможности непосредственного определения качественных характеристик объекта оперированием ими алгоритмически так же, как на числовых шкалах. Количественные оценки состояния объекта можно получить из качественных оценок обратным отображением шкал.

Мягкие и квантовые вычисления являются примерами таких исчислений.

Большим сюрпризом применения КА оказался выявленный эффект, что при этом многие классические задачи могут быть решены с экспоненциальным ускорением или решены алгоритмически принципиально неразрешимые классическими методами задачи. Так, например, для определения качественной характеристики функции (постоянной или балансирующей для четырех аргументов) в традиционном подходе требуется четыре шага численных операций, в то же время квантовый алгоритм Дейча (1985 г.) определяет данное качество исследуемой функции за один шаг. Алгоритм Шора решает задачу факторизации заданного числа с экспоненциальной скоростью по отношению к лучшему ранее известному алгоритму, а при увеличении длины решает алгоритмически неразрешимую задачу с полиномиальной сложностью. Алгоритм Гровера осуществляет поиск решения в неструктурированных данных с квадратичной скоростью.

Нечеткие множества, введенные в 1965 г. Л. Заде, позволяют расширить (многовековое) определение самого числа и ввести множество новых шкал качественных характеристик, которые невозможно определить методами классических

исчислений. Но при этом многие «парадоксальные» факты интерпретации результатов применения нечеткой логики основаны на отказе от закона булевой логики в виде закона исключения третьего.

Квантовая логика приводит к обнаружению скрытой квантовой информации в классических логических операциях при применении к ним нелинейных преобразований.

Такие исчисления открывают новые возможности для теории и проектирования ИСУ. В частности, применение данных типов вычислений или их совместных комбинаций существенно повышает уровень робастности ИСУ, функционирующих в условиях информационного риска или непредвиденных (нештатных) ситуациях.

Рассмотрим кратко методологические особенности применения технологий мягких, дробных и квантовых вычислений, используемых при проектировании робастных БЗ ИСУ.

1.1.2. Технология мягких вычислений

Логический «парадокс» в виде обобщения понятия числа за счет введения субъективной качественной шкалы и отображения в нее в виде лингвистической переменной качественной аппроксимации его (числа) количественной характеристики привел к более чем 30-летней дискуссии с представителями научной школы теории вероятностей. К подобным трудностям относится, например, корректное определение понятий функции принадлежности, логические взаимоотношения «нечеткая/случайная величина» и др. Основой технологии мягких вычислений являются теория *нечетких множеств* и модели *нечеткой логики*, в которой, как отмечалось выше, не используется закон исключения третьего.

Это приводит к нестандартному выводу о возможности одновременного рассмотрения, например, числа 10 на шкале [0, 100] как лингвистической переменной «большой» или «маленький» с различными значениями функции принадлежности на заданной качественной лингвистической шкале. Трудность определения самой функции принадлежности возлагалась на эксперта, что приводило к введению субъективных факторов в математические модели и вызывало критику со стороны представителей вероятностной школы исследования неопределенностей. В теории случайных процессов с помощью решения уравнения Фоккера-Планка-Колмогорова можно по входным данным и характеристикам динамической системы определить функцию плотности распределения вероятностей выходного сигнала, которая является полной его объективной характеристикой. В теории нечетких систем технология определения функции принадлежности (аналогичной теории случайных процессов) отсутствовала.

Только практическое применение нечетких САУ классическими ОУ разъяснило и сняло разногласия и трудности определений индивидуальных и массовых событий, операции усреднения и извлечения информации и т. п. В результате нечеткие модели логического вывода на фазовом пространстве лингвистических переменных позволили разработать структуры нечетких ИСУ, эффективно решающие задачи управления в условиях существенной неопределенности исходной информации, слабой формализации описания ОУ и нечеткости целей управления.

Одной из основных проблем практического и эффективного применения технологии мягких вычислений в задачах интеллектуального управления являлось

решение следующих задач: а) объективное определение вида функции принадлежности из заданного класса и ее оптимальных параметров в продукционных правилах БЗ; б) определение оптимальной структуры нечетких нейронных сетей (ННС) в задачах обучения (аппроксимация обучающего сигнала с требуемой/заданной ошибкой и с минимальным количеством продукционных логических правил в БЗ – разработка и проектирование универсального аппроксиматора); в) применение генетического алгоритма (ГА) в задачах многокритериального управления при наличии дискретных ограничений на параметры объекта управления и др.

Такие задачи, как отмечено выше, принципиально не решаются инструментариями Fuzzy Logic Toolbox и Robust Control, встроенными в виде автономных модулей в среду MATLAB.

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе разработанного оптимизатора БЗ (ОБЗ)^{13,14} с применением технологии мягких вычислений. Разработанный интеллектуальный инструментарий позволил проектировать робастные БЗ на основе решения одной из алгоритмически трудно решаемых задач теории искусственного интеллекта – извлечения, обработки и формирования объективных знаний без использования экспертных оценок.

В структуре оптимизатора используются три ГА, которые позволяют спроектировать, как следствие, оптимальную структуру ННС (вид функций принадлежности и их параметры, количество внутренних слоев и др.), аппроксимирующей обучающий сигнал с требуемой (заранее заданной) ошибкой. Объединение методологии стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментарии разработанного ОБЗ позволило повысить уровень робастности проектируемых БЗ и решать сложные задачи формирования объективных знаний^{14,15}.

Однако при существенном изменении среды функционирования или при возникновении непредвиденных ситуаций управления спроектированные законы управления не всегда гарантируют требуемые условия робастности и, соответственно, достижение цели управления. Данный эффект ограничивается функциональной структурой ГА, в которой (по определению) пространство поиска решений фиксировано и задается экспертом, а также выбором функции пригодности, которая рассматривается как критерий оптимального управления.

Таким образом, найденное технологией мягких вычислений (на основе ГА) оптимальное решение соответствует только заданной ситуации управления, содержит (в неявном виде) субъективность исходной информации, а при неправильном определении пространства поиска найденное решение может неадекватно соответствовать ситуации управления. Для такого рода ситуации управления требуется привлечение новых видов технологий интеллектуальных вычислений, например, технологии интеллектуальных квантовых вычислений [21].

Следует отметить, что технология мягких вычислений уже эффективно применяется в задачах управления квантовыми ОУ. Однако до настоящего времени применение квантовых вычислений для эффективного решения классических алгоритмически

¹³ Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Проектирование робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. ТИСУ. 2006. № 5. С. 102 – 141.

¹⁴ Ulyanov S.V., Litvintseva L.V. Soft computing optimizer of intelligent control system structures. US patent No. 7, 219, 087 B2. 2007.

¹⁵ Ulyanov S.V., Litvintseva L.V. System for soft computing simulation. US patent No. 20060218108 A1. 2006.

неразрешимых задач теории и систем управления сталкивалось с утверждением Ю. Манина и Р. Фейнмана (введенного в начале 80-х гг. прошлого столетия) о необходимости применения квантовых вычислений к решению квантовых задач.

1.1.3. Технология квантовых вычислений

В квантовой логике технологии интеллектуальных квантовых вычислений и квантовой теории информации существует «парадокс» – не выполняется классический закон дистрибутивности. Этот факт отражает новые (необычные) явления в квантовой механике типа некоммутативности переменных, неопределенности и невозможности одновременного точного измерения наблюдаемых и др. В результате необычные явления для классической физики, такие как запутанные состояния (entanglement), телепортация, сверхплотное кодирование, приводят к «парадоксам» и трудностям физической интерпретации с позиции логики классической физики. Так, например, две подсистемы, каждая из которых находится в смешанном хаотическом состоянии (и с отличной от нуля энтропией), при слиянии в единую систему образуют чистое (с нулевой энтропией) состояние, обладающее высшим уровнем порядка (эффект квантовой самоорганизации). При этом количество информации в целой системе меньше, чем в каждой из ее составляющих подсистем, а взаимная энтропия имеет отрицательное значение.

Квантовая суперпозиция, состоящая из двух классических *взаимоисключающих* логических состояний, позволяет образовать одно единое состояние, содержащее, например, одновременно логически противоречащие «да» и «нет» (состояние типа «кот Шрёдингера»). Из двух классических однобитовых состояний с помощью квантовой корреляции (которая выше классической) возможно дополнительно (в зависимости от вида квантовой коммуникации) извлечь еще более одного бита. Квантовые стратегии принятия решений позволяют из двух классических игроков, не имеющих стратегий выигрыша в данной игровой ситуации, сформировать игрока-победителя («Паррondo» эффект), использующего квантовый подход к решению задачи.

Рис. 1.1 демонстрирует физическое различие в определении вычислительного базиса мягких и квантовых вычислений.

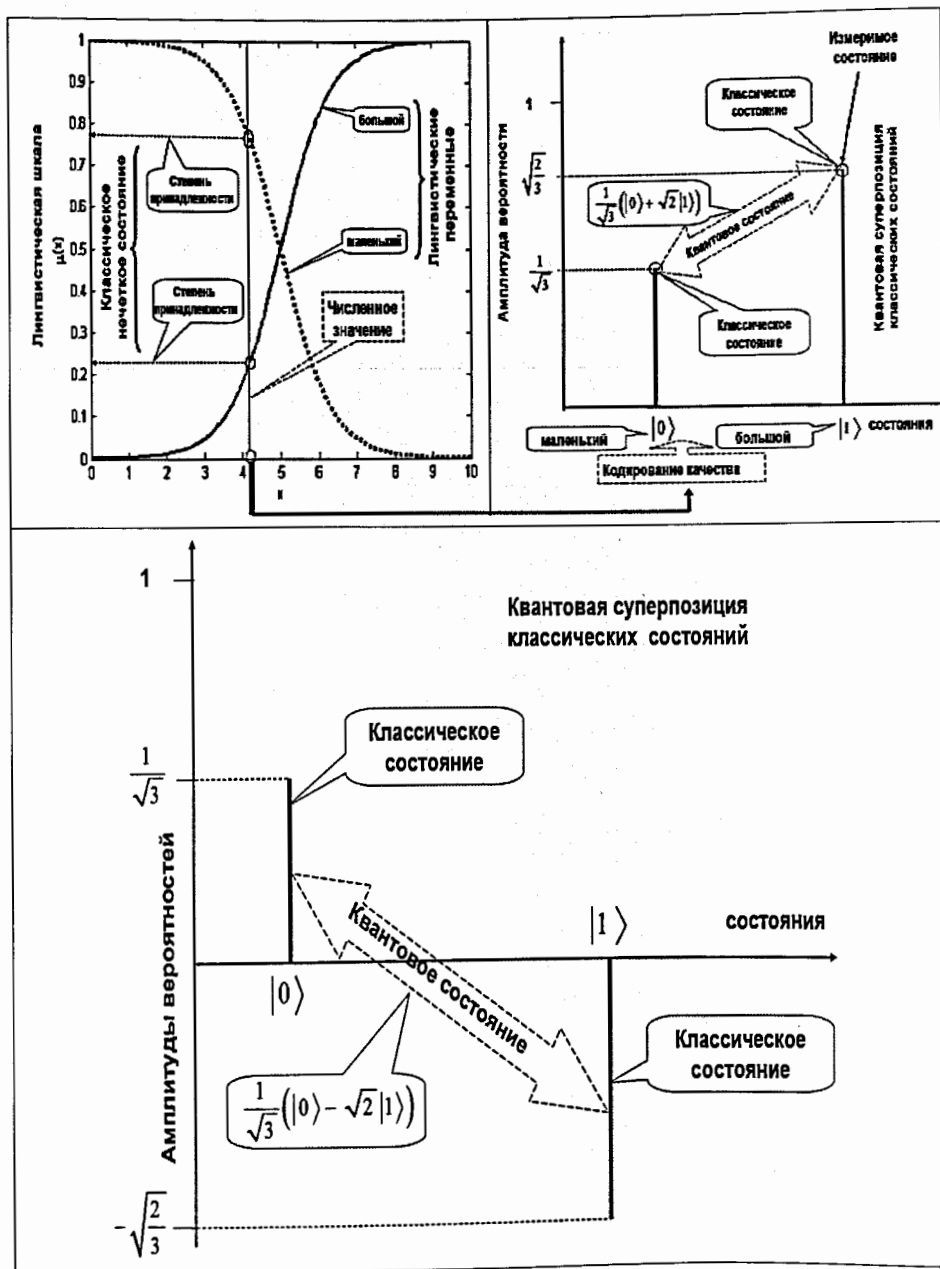


Рис. 1.1. Физическое различие между нечетким и квантовым состояниями

Одновременно рис. 1.1 дает корректную физическую интерпретацию значения квантовой суперпозиции (quantum superposition) с различными классическими состояниями типа $\frac{1}{\sqrt{3}}(|0\rangle + \sqrt{2}|1\rangle)$ и $\frac{1}{\sqrt{3}}(|0\rangle - \sqrt{2}|1\rangle)$ (квантовые состояния – quantum states) соответственно.

Из представленных на рис. 1.1 описаний физических состояний видно, что нечеткое состояние числа имеет *два значения* функции принадлежности на шкале лингвистического описания (принцип исключения третьего не выполняется). Квантовое же состояние состоит из *двух классических состояний*, качественные характеристики которых закодированы в квантовых переменных, связанных принципом квантовой логической дополнителности.

Совместное использование вычислительных базисов из рис. 1.1 приводит к новому виду *квантовых мягких вычислений*.

Таким образом, описание на квантовом языке постановок многих классических (слабо структурированных) инженерных задач (трудно решаемых на языке классической логики) позволяет найти их эффективное решение. Однако такой подход имеет ряд особенностей при практическом применении в задачах управления. В теории квантовой информации и квантовых вычислений понятию числа соответствуют понятия *наблюдаемой* и *суперпозиции* состояния наблюдаемых квантовой системы, а необратимое измерение дает одно из возможных состояний.

Положительные результаты применения классических технологий интеллектуальных вычислений (типа мягких вычислений) совместно с аппаратом квантовых вычислений привело к новому альтернативному подходу – применению технологий квантовых интеллектуальных вычислений в задачах оптимизации процессов управления классическими ОУ (физический аналог применения обратного метода исследования «квантовая система управления – классический ОУ»). Такой подход также существенно расширяет возможности самих интеллектуальных вычислений.

1.1.4. Дробное исчисление (fractional calculus)

Математический анализ с использованием интегродифференциальных операторов нецелых порядков или дробное исчисление (fractional calculus) имеет более чем трехвековую историю.

Здесь рассмотрим только некоторые характерные примеры¹⁶. Обсудим в частности аналоги функций в классическом математическом анализе с точки зрения дробного математического анализа. Такие аналоги являются обобщением известных функций в классическом математическом анализе и наглядно иллюстрируют «парадоксы» дробного исчисления с точки зрения операций и результатов стандартной интерпретации математического анализа.

Прежде всего рассмотрим аналог известной формулы дифференцирования для степенной функции порядка n в виде $\frac{d^n x(t)}{dt^n} = k(k-1)\dots(k-n+1)\frac{k!}{(k-n)!}t^{k-n}$.

¹⁶ См. Васильев В.В., Симак Л.А. Дробное исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем. Киев: НАН Украины, 2008.

Анализ приведенной формулы для производной порядка n показывает, что формально порядок дифференцирования может быть отличным от целого. Для этого необходимо использовать гамма-функцию, которая обобщает факториал-функцию на случай нецелочисленных аргументов. Гамма-функция для целых положительных $x = n$ связана с факториалом в виде $\Gamma(n) = (n-1)!$. Выполнив замену целого порядка дифференцирования n на дробный β и вводя гамма-функцию, получим следующую формулу дифференцирования степенной функции с дробным порядком:

$$\frac{d^\beta x(t)}{dt^\beta} = \frac{\Gamma(k+1)}{\Gamma(k-\beta+1)} t^{k-\beta}. \quad (1.1)$$

Так, например, для единичной функции типа $f(x)=1$ в стандартном математическом анализе производная имеет вид $\frac{df(x)}{dx} = \frac{d1}{dx} = 0$.

Однако в дробном исчислении согласно (1.1) для всех значений β дробная производная (дифферинтеграл) имеет вид

$$\frac{d^\beta f(x)}{dx^\beta} = \frac{d^\beta 1}{dx^\beta} = \frac{x^{-\beta}}{\Gamma(1-\beta)}.$$

Выражение (1.1) может рассматриваться как функция трех аргументов: t , k и β ; таким образом, дается более подробное описание функции и всех ее производных и интегралов (как целого, так и дробного порядков). В качестве иллюстрации приведем графические образы выражения (1.1) для случаев $k=0$, когда порядок дифференциального оператора изменяется в пределах от -1 до $+1$.

Рис. 1.2 показывает изменение дифферинтеграла для данного случая.

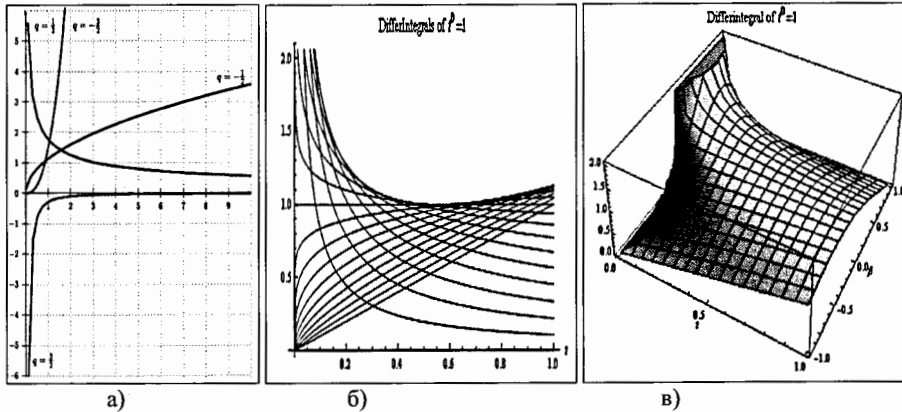


Рис.1.2. Графики дифферинтегралов от единичной функции для различных значений $\beta = q = 1/2, 3/2, -1/2, -3/2$ (а); в пределах $-1 < \beta < +1$ (б); изменение дифферинтеграла в 3D как функции параметров $(t, k=0, \beta)$ (в)

Для идентичной функции $f(x) = x$ имеем $\frac{df(x)}{dx} = \frac{dx}{dx} = 1$.

В то время как дробная производная имеет вид

$$\frac{d^q f(x)}{dx^q} = \frac{d^q x}{dx^q} = \frac{x^{1-q}}{\Gamma(2-q)}.$$

На рис. 1.3 показаны графики дробных дифферинтегралов для различных значений $\beta = q = 1/2, 3/2, -1/2, -3/2$.

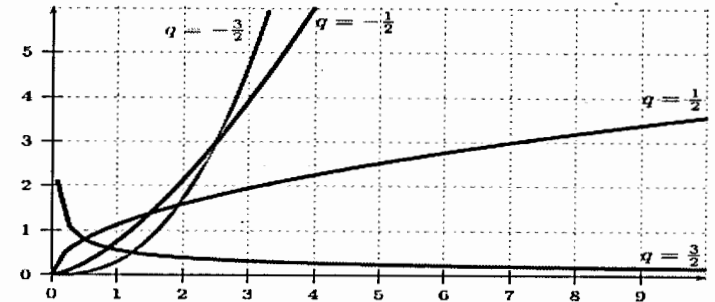
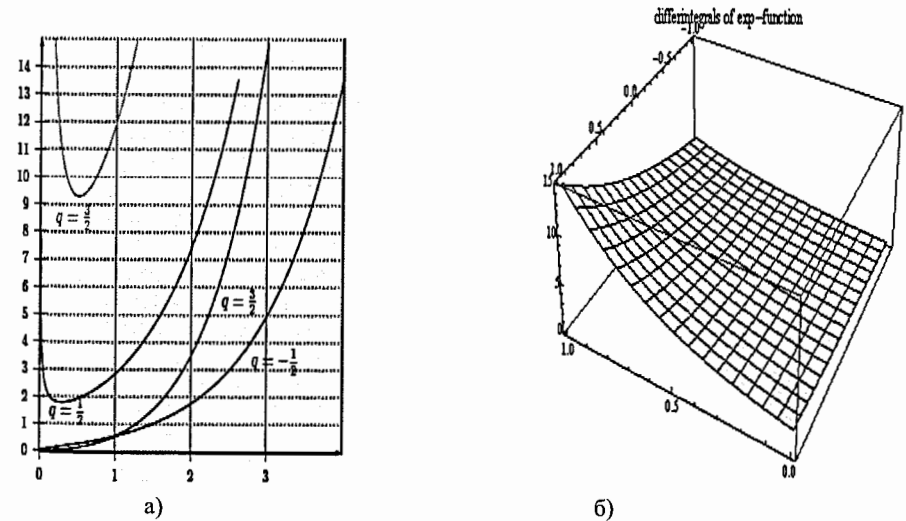


Рис.1.3. Графики дифферинтегралов от идентичной функции для различных значений $\beta = q = 1/2, 3/2, -1/2, -3/2$

Для экспоненты $f(x) = e^x$ дифферинтеграл определяется в виде $\frac{d^q e^{xx}}{dx^q} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^{k-q}}{\Gamma(k-q+1)}$.

На рис 1.4 показаны графики рассмотренных дифферинтегралов от указанных функций.



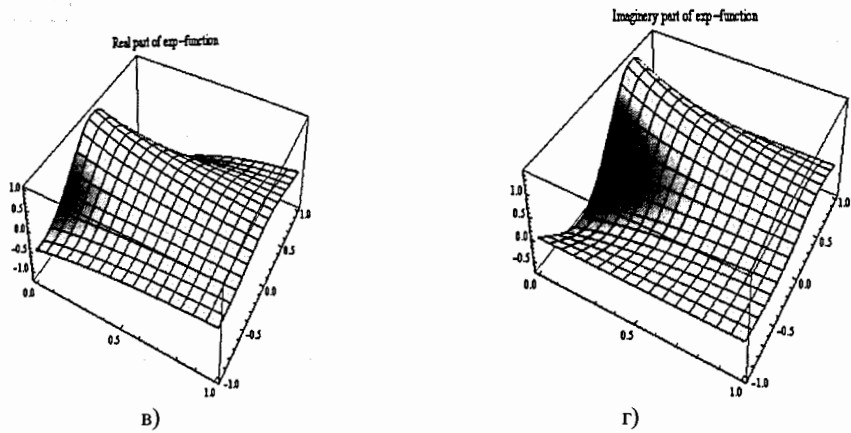


Рис. 1.4. Графики дифференциалов от экспоненциальной функции

Таким образом, дробное исчисление относится к обособленному разделу математического анализа и является инструментом математического моделирования сложных динамических процессов в обычных и фрактальных средах. Данный математический инструментариум позволяет на новой основе понятий производной и интеграла решать задачи анализа, синтеза, идентификации, диагностики, создания новых типов робастных систем управления.

1.1.5. Особенности квантовой логики вычислений

В классической логике выполняются законы коммутативности, ассоциативности, упорядоченности, поглощения и имеет место дистрибутивный закон $(A+B)C = AC+BC$. Переменные A, B, C, \dots называются высказываниями. Между некоторыми парами высказываний A, B, C, \dots можно установить отношение порядка $A \leq B$, означающее, что если высказывание A истинно, то высказывание B также истинно, или высказывание B является следствием высказывания A . В квантовой логике также выполняются коммутативный и ассоциативный законы, закон упорядочения и закон поглощения. Однако закон дистрибутивности в квантовой логике в общем случае не выполняется.

Чтобы убедиться в этом, рассмотрим три вектора A, B, C в двумерном евклидовом пространстве (рис. 1.5) и высказывания A, B и C , состоящие в том, что вектор ψ направлен вдоль соответствующего вектора.

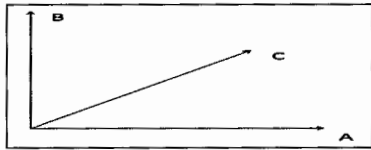


Рис. 1.5. Векторы A, B, C в двумерном евклидовом пространстве

Имеем $A+B=I, (A+B)C=C$. С другой стороны, $AC=\theta, BC=\theta$, где θ - абсурдное высказывание. Поэтому $AC+BC=\theta$. Таким образом, дистрибутивный закон не выполняется: $(A+B)C \neq AC+BC$. Нарушение дистрибутивности составляет основное отличие квантовой логики. Наличие данной особенности отличает квантовую логику от аристотелевой логики¹⁷.

Основным объектом квантовой логики являются решетки. Допустим, что состояния некоторой системы описываются решеткой (рис. 1.6).

На рис. 1.6 состояние 0 означает «никакое» или «ложное», состояния 1, 2, 3, 4 являются взаимоисключающими друг друга состояниями, так что состояние 1 и 2 (обозначение $1 \wedge 2$) есть 0; аналогично $1 \wedge 3 = 1 \wedge 4 = 2 \wedge 3 = 0$. I - всегда реализующееся состояние $I = 1 \vee 2 \vee 3 \vee 4$, где \vee - знак дизъюнкции, и $1 \vee 2 = 1 \vee 3 = 2 \vee 3 = 3 \vee 4 = I$.

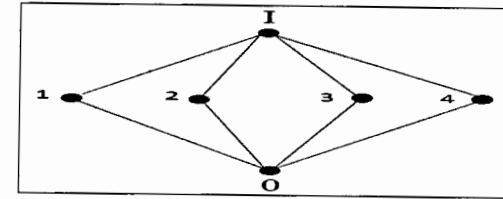


Рис. 1.6. Вид недистрибутивной решетки

Нетрудно заметить, что решетка на рис. 1.6 недистрибутивна:

$$1 \wedge (3 \vee 4) = 1 \wedge I = 1 \neq (1 \wedge 3) \vee (1 \wedge 4) = 0 \vee 0 = 0.$$

Другой важной особенностью данной решетки является невозможность определения на ней вероятностной меры¹⁸. Действительно, если все состояния равноправны, то естественно приписать любому из состояний 1, 2, 3, 4 вероятность $\frac{1}{4}$, но тогда вероятность состояния $1 \vee 2$ по теореме сложения вероятностей есть $\frac{1}{2}$, однако $1 \vee 2 = I$, и, следовательно, эта вероятность равна 1. Поэтому в квантовой механике поведение динамической системы описывается не вероятностью, а амплитудой вероятности, которая, в свою очередь, позволяет вычислять условные вероятности.

Рассмотрим теперь особенность логики квантовых операций на примерах классических логических операций, содержащих или состоящих из внутренних квантовых операций¹⁹.

Пример 1: Операция корень квадратный из операции «отрицание». Рассмотрим понятие квантовый бит (кубит) $|\psi\rangle = \left(|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle \pm |1\rangle)$, который играет важную роль в квантовой теории информации. Кубит является квантовой

¹⁷ Ахиезер А.И., Половин Р.В. Почему невозможно ввести в квантовую механику скрытые параметры // Успехи физических наук. 1972. Т. 107, вып. 3. С. 464 - 487.

¹⁸ Гриб А.А. Квантовая логика: Возможные применения // Закономерности развития современной математики: Методологические аспекты. М.: Наука, 1987. С. 313 - 317.

¹⁹ Ульянов С.В. и др. Логические и квантовые парадоксы интеллектуальных квантовых и мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: электрон. научн. журнал. Дубна, 2010. №2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/11>. Идентификационный номер: 0421000111\0018.

суперпозицией двух классических состояний в виде логического базиса $(|0\rangle, |1\rangle)$. Логическая операция «НЕТ», действуя на кубит $|\psi\rangle$, является линейным оператором $\text{not}: C^2 \rightarrow C^2$, который действует на все логические базисы следующим образом: $\text{not}|0\rangle = |1\rangle$, $\text{not}|1\rangle = |0\rangle$. Соответствующее матричное представление в логическом базисе имеет вид $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ и является так называемой матрицей Паули σ_x .

Рассмотрим теперь нелинейную операцию $\sqrt{\text{not}}$ над операцией not . Результат операции $\sqrt{\text{not}}$ является линейным оператором $\sqrt{\text{not}}: C^2 \rightarrow C^2$, который, действуя на кубит над всеми логическими базисами, приводит к следующему результату:

$$\sqrt{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}} = \begin{pmatrix} \frac{1+i}{2} & \frac{1-i}{2} \\ \frac{1-i}{2} & \frac{1+i}{2} \end{pmatrix}, \quad \sqrt{\text{not}}|0\rangle = \frac{1+i}{2}|0\rangle + \frac{1-i}{2}|1\rangle; \quad \sqrt{\text{not}}|1\rangle = \frac{1-i}{2}|0\rangle + \frac{1+i}{2}|1\rangle.$$

Физически данный результат означает, что измерение выходного результата $(|0\rangle, |1\rangle)$, если входом является сигнал $|0\rangle$, дает $\begin{cases} |0\rangle \text{ с вероятностью } \frac{1}{2}, \\ |1\rangle \text{ с вероятностью } \frac{1}{2}, \end{cases}$

Аналогично для входа $|1\rangle$.

Таким образом, оператор $\sqrt{\text{not}}$ является случайным переключателем. Интуитивно такой переключатель должен сохранять данное свойство, если его применить дважды. Однако это свойство не выполняется и применение дважды оператора $\sqrt{\text{not}}\sqrt{\text{not}} = \text{not}$, т.е. $\sqrt{\text{not}}\sqrt{\text{not}}|\psi\rangle = \text{not}|\psi\rangle$. Объясняется данный «парадоксальный» факт тем, что в квантовой механике оценка эволюции вероятности квантовых переходов осуществляется по законам сложения амплитуд вероятностей по всем возможным путям траекторий движения, а не самих вероятностей. Амплитуда вероятностей может быть уменьшена (деструктивная интерференция) или усилена (конструктивная интерференция) в процессе суммирования амплитуд вероятностей, что существенно отличает квантовые операции от классических вероятностных операций. Операцию $\sqrt{\text{not}}$ часто именуют как «возможное (“tentative”)» отрицание или «полуотрицание (half-negation)»: применение дважды оператора $\sqrt{\text{not}}$ приводит к полному классическому логическому отрицанию not . Отметим, что применение оператора $\sqrt{\text{not}}$ к вычислительному базису $(|0\rangle, |1\rangle)$ приводит к формированию квантовой суперпозиции с комплексными амплитудами вероятности. Поэтому нелинейный оператор $\sqrt{\text{not}}$ является сугубо квантовым оператором, не имеющим аналогов в классической и нечеткой логике.

Таким образом, операция классического логического отрицания состоит из двух внутренних квантовых операторов, реализующих конструктивную и деструктивную интерференцию амплитуд вероятностей.

Пример 2: Корень квадратный из оператора идентичности. Для заданного $n \geq 1$ корень квадратный из оператора идентичности на пространстве $\otimes^n C^2$ (\otimes^n - знак

тензорного умножения, см. приложение к данной главе 1) является линейным оператором $\sqrt{I^{(n)}}$, таким, что для любого элемента $|x_1, \dots, x_n\rangle$ в вычислительном базисе $B^{(n)}$ выполняется следующее условие:

$$\sqrt{I^{(n)}}(|x_1, \dots, x_n\rangle) = |x_1, \dots, x_n\rangle \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}((-1)^{x_i}|x_i\rangle + |1-x_i\rangle).$$

Основным свойством оператора $\sqrt{I^{(n)}}$ является следующее: $\sqrt{I^{(n)}}(\sqrt{I^{(n)}}|\psi\rangle) = |\psi\rangle$ для каждого $|\psi\rangle \in \otimes^n C^2$.

Очевидно, что $\sqrt{I^{(n)}} = \begin{cases} H, & \text{если } n = 1 \\ I^{(n-1)}, & \text{остальное} \end{cases}, \quad H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix}.$

Таким образом операция $\sqrt{I} = \sqrt{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}$ порождает квантовый оператор Адамара,

применение которого, например, к состоянию $|x_1\rangle = |0\rangle$, порождает квантовую суперпозицию $H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ с действительными значениями амплитуд

вероятности. Следовательно, оператор $\sqrt{I^{(n)}}$, как и в случае $\sqrt{\text{not}^{(n)}}$, может интерпретироваться как «возможное частное утверждение (tentative partial assertion)», преобразующее точную определенную информацию в максимально неопределенную информацию²⁰. Очевидно, что применение оператора $\sqrt{I^{(n)}}$ приводит состояние системы к максимальному беспорядку. Применение этого оператора дважды возвращает систему в исходное состояние с сохранением начальной информации об исходном состоянии.

Приведенные примеры указывают на существование «скрытой» квантовой информации в классических состояниях, извлечение которой дает дополнительные возможности для формирования эффективных квантовых стратегий на пространстве классических стратегий принятия решений (см. подробности ниже в главе 2, п. 2.3.3).

1.1.6. Особенности теории дробных вычислений

Отмеченная ранее особенность вычисления дробных производных и интегралов, выраженная в непривычной форме интерпретации результата, отразилась на длительности интервала времени применения методологии дробных исчислений в практике инженерных исследований. Вызывали трудности решения вопросов выбора модели дробной производной и дробного интеграла, выбора метода численного моделирования, определения оптимальных значений дробных показателей и коэффициентов усиления регуляторов, определения дробных случайных процессов и дифференциальных уравнений для описания модели ОУ и мн. др.

²⁰ Giuntini R., Ledda A., Sergioli G., Paoli F. Some generalizations of fuzzy structures in quantum computational logic // Intern. J. General Systems. 2011. V. 40. No. 1. P. 61 – 83.

Только за последние 20 лет данное исчисление приобрело новое интенсивное развитие в связи с появлением практических инженерных приложений. В отличие от стандартного определения производной функции от аргумента, которая определяется в данной точке, производная дробного порядка зависит от памяти предыдущих состояний. Для избежания многих «парадоксов» и необходимости иметь корректные предельные переходы к классическому определению, было предложено множество моделей интегродифференциалов и дифферинтегралов, выбор которых определялся возможностями корректных схем численного интегрирования и конкретными условиями описания модели ОУ.

Выше в п. 1.1.4 было рассмотрено представление производной в виде прямого обобщения показателя производной на нецелочисленный случай. Рассмотрим для сравнения другой вариант определения дробной производной в виде модели

Эллиотта²¹:
$$D_{*}^{\alpha}y(x) = \frac{1}{\Gamma(-\alpha)} \int_0^x \frac{1}{(x-x')^{\alpha+1}} y(x') dx', \quad \alpha, x \in \mathbb{R}_+, \quad (1.2)$$

Результаты численного интегрирования (1.2) для функций $y(x) = x$ и $y(x) = e^{-x}$ представлены на рис. 1.7, а, б соответственно.

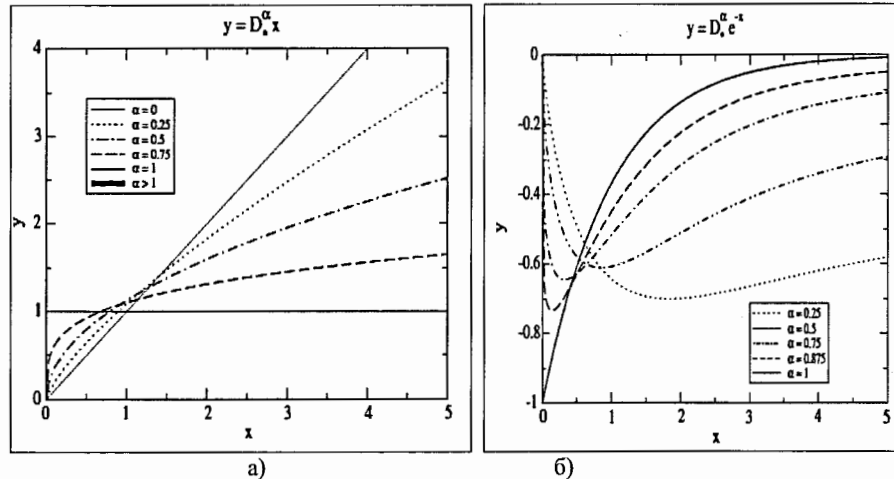


Рис. 1.7. Примеры вычисления дробных производных $y(x) = x$ и $y(x) = e^{-x}$

Сравнение с результатами, представленными на рис. 1.3 и 1.4, показывает существенные различия в качественном поведении вычисленных функций. В частности, на рис. 1.7, а представлены три специальных случая: $D_{*}^0 y(x) = x$, $D_{*}^1 y(x) = 1$ и $D_{*}^{\alpha} y(x) = 0, \forall \alpha > 1$, которые не противоречат результатам математического анализа.

²¹ Diethelm K., Ford N.J., Freed A.D., Luchko Yu. Algorithms for the fractional calculus: A selection of numerical methods // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. 2005. V. 194. P. 743–773.

Промежуточные значения $\alpha = 1/4, 1/2, 3/4$ имеют плавные переходы в промежутке между значениями $\alpha = 0$ и 1, что согласуется с интуитивным представлением о качественном поведении производной.

Качественное поведение производной от экспоненциальной функции имеет скачкообразный характер: стартуя из нуля, резко пересекает график стандартной производной и стремится затем к нулевому значению. Отмеченные особенности проявляются в процессах численного интегрирования дифференциальных уравнений дробного порядка.

На рис. 1.8 приведен пример численного интегрирования дифференциального уравнения дробного порядка следующего вида: $D_{*}^{\alpha} y(x) = 1 - y(x)$, при разных значениях α и разных начальных условиях.

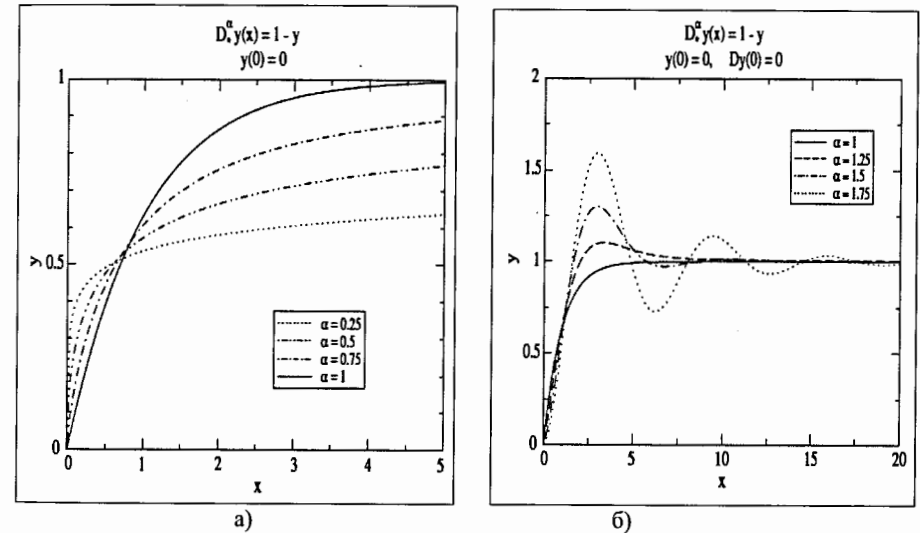


Рис. 1.8. Динамическое поведение системы $D_{*}^{\alpha} y(x) = 1 - y(x)$ при различных $\alpha \in (0, 1]$ и начальных условиях $y(0) = 0$ (а) и $\alpha \in [1, 2)$ и начальных условиях $y(0) = 0, Dy(0) = 0$

При этом вид качественного поведения и математическое описание свойств самой гамма-функции Эйлера представляют самостоятельный интерес.

В общем виде гамма-функция имеет следующий вид:

$$\Gamma(x) = \begin{cases} \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt, & \text{Re}(x) > 0 \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! n^{x-1}}{x(x+1)(x+2)\dots(x+n-1)}, & (x - \text{любое}). \end{cases} \quad (1.3)$$

На рис. 1.9 и 1.10 представлен вид модуля гамма-функции комплексного и гамма-функции действительного аргументов.

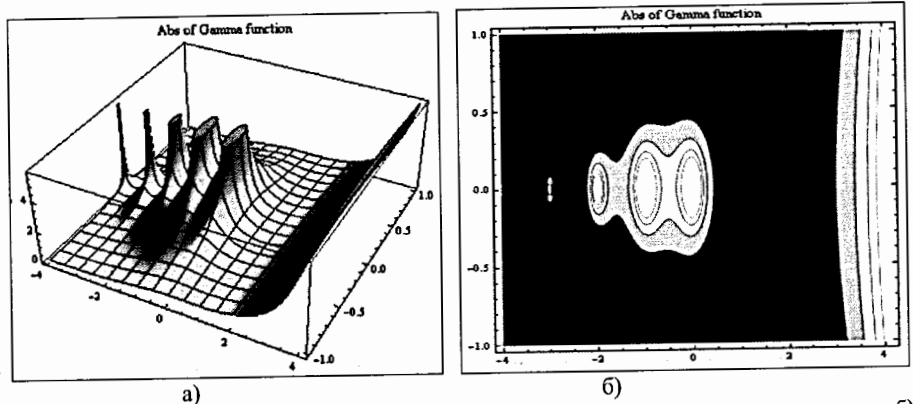


Рис. 1.9. Вид гамма-функции: а) модуль гамма-функции комплексного аргумента; б) модуль гамма-функции комплексного аргумента (контурный график)

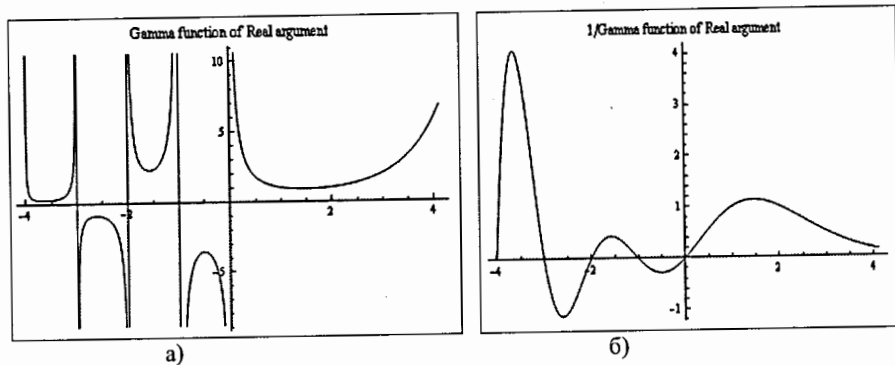


Рис. 1.10. Вид гамма-функции действительного аргумента: а) гамма-функция действительного аргумента; б) обратная гамма-функция действительного аргумента

На рис. 1.10, а видно, что гамма-функция претерпевает разрывы вида $\pm \infty$ в нуле и при целых отрицательных значениях аргумента. Однако в дробном анализе чаще всего встречаются значения гамма-функции в степени (-1) или отношения гамма-функций различных аргументов, которые являются непрерывными функциями на множестве рассматриваемых значений аргументов.

Для примера на рис. 1.10, б показан вид функции $1/\Gamma(x)$, которая является непрерывной функцией. Таким образом, описание и моделирование ОУ существенно зависит от модели дробной производной, начальных условий, метода интегрирования, выбранного порядка производной и т.п. Данные вопросы и их роль в задачах моделирования ОУ и робастного управления рассмотрены ниже в главе 9.

Практика применения данного исчисления, например, в задачах робастного управления, показала его эффективность, что привело к планомерному его исследованию в задачах теории и систем управления.

1.2. Роль дробных вычислений в интеллектуальном робастном управлении

Применение методов дробного исчисления в задачах робастного управления дало возможность повысить качественные характеристики процессов управления. Так, например, на рис. 1.11 показан переходный процесс ПИД-регулятора и дробного ПИД-регулятора на ступенчатое воздействие²².

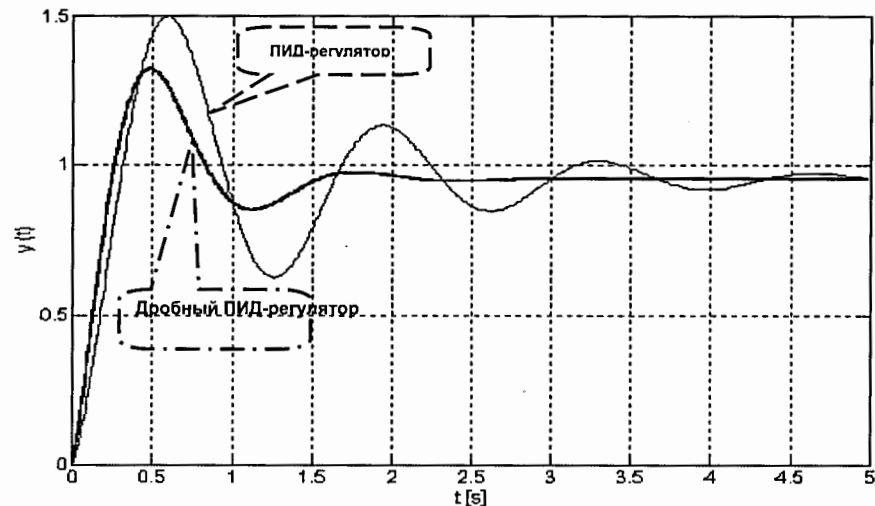


Рис. 1.11. Сравнение переходных процессов ПИД-регулятора и дробного ПИД-регулятора на ступенчатое воздействие

Нетрудно заметить, что динамические характеристики дробного ПИД-регулятора (перерегулирование, время переходного процесса, точность, ошибка управления) значительно лучше традиционного ПИД-регулятора. Однако форма дробного интегродифференциального исчисления приводит к новым трудностям разработки методов аналитического и численного исследования динамического поведения таких регуляторов.

Достаточно отметить здесь, что применение дробного исчисления к структуре традиционного ПИД-регулятора типа

$$PID = \underbrace{k_p + k_D s + k_I s^{-1}}_{\text{Частотная область}} = \underbrace{k_p e + k_D \dot{e} + k_I \int e(\tau) d\tau}_{\text{Временная область}}$$

существенно изменяет структуру регулятора, например, для PI^{-q} , D^q и $q, = \frac{1}{2}$, $q, = -\frac{1}{2}$ имеем

²² Mata de Oliveira Valerio D.P. Ninteger v. 2.3 Fractional control toolbox for MatLab: User and programmer manual. Madrid: Universidade Tecnica de Lisboa Instituto Superior Tecnico, 2005.

$$PI^{-\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{2}} = \underbrace{k_p + k_D s^{q_1} + k_I s^{-q_2}}_{\text{Частотная область}} \Leftrightarrow \underbrace{k_p(t)e + k_D(t) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\dot{e}(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau + k_I(t) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{e(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau}_{\text{Временная область}}$$

В теории и проектировании систем управления на основе дробных вычислений эффективно используются также необычные для традиционных структур регуляторов такие, как $I^{-\alpha} D^{\alpha}$, т. е. дробные интегродифференциальные регуляторы.

На рис. 1.12 показано сравнение динамического поведения дробного $I^{-\alpha} D^{\alpha}$ -регулятора с поведением дробного PI (ПИ), PI (ПИ) и PID (ПИД) на ступенчатое возмущение.

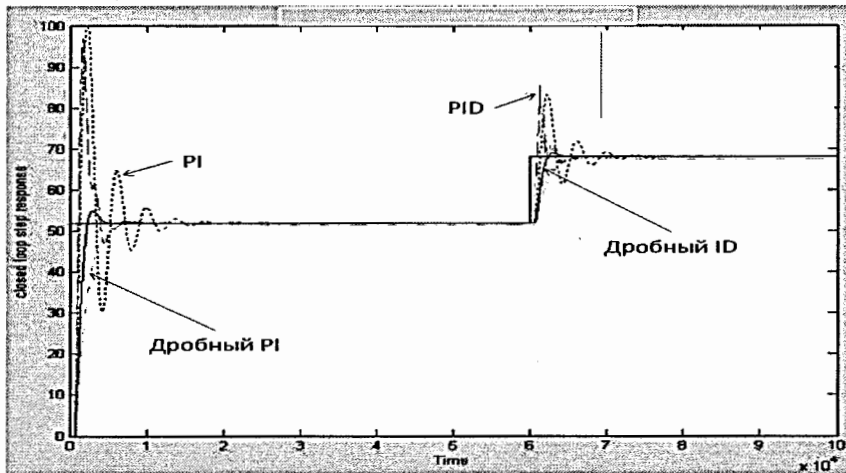


Рис. 1.12. Сравнение динамического поведения дробного $I^{-\alpha} D^{\alpha}$ -регулятора с поведением дробного PI (ПИ), PI (ПИ) и PID (ПИД) на ступенчатое возмущение

Из результатов сравнения динамических характеристик видно превосходство $I^{-\alpha} D^{\alpha}$ -регулятора. В то же время ПИД-регулятор дробного порядка теперь имеет пять параметров $\{k_p, k_D, k_I, q_1, q_2\}$ и позволяет существенно расширить область поиска оптимальных параметров по сравнению с традиционным ПИД-регулятором для достижения области робастности ИСУ²³.

Использование мягких и квантовых вычислений в сочетании с моделями дробных регуляторов с нечеткими регуляторами, со скользящим режимом, нечетких H_2/H_{∞} -регуляторов, а также методов PSO (particle swarm optimization) и др. расширяет возможности процессов проектирования робастных ИСУ.

²³ Ahn H.-S., Bhambhani V., Chen Y. Fractional-order integral and derivative controller for temperature profile tracking // Sadhana. 2009. V. 34. Part 5. P. 833–850.

На рис. 1.13 показано сравнение динамического поведения дробного ПИД-регулятора, спроектированного методом PSO, с H_2/H_{∞} -регулятором и H_{∞} -регулятором²⁴.

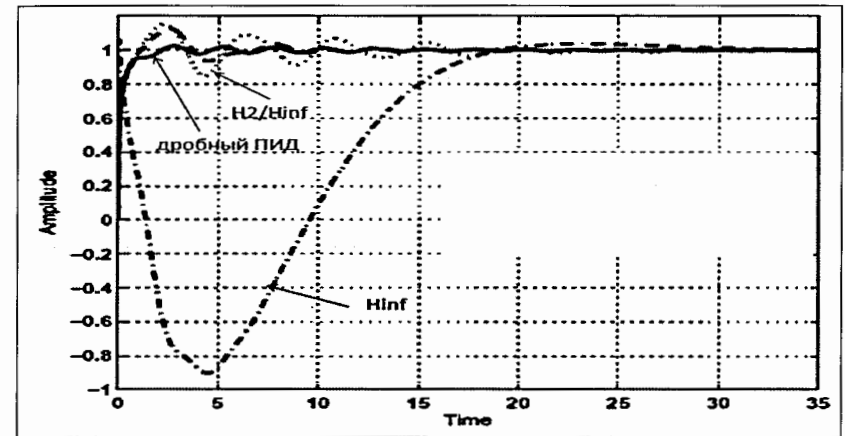


Рис. 1.13. Сравнение динамического поведения дробного ПИД-регулятора с H_2/H_{∞} -регулятором и H_{∞} -регулятором

Из результатов сравнения следует преимущество дробного ПИД-регулятора.

Данные и другие типы регуляторов, а также смежные вопросы дробного исчисления и их совместное использование с интеллектуальными вычислениями рассмотрены в главе 9.

1.3. Роль выбора моделей квантовых алгоритмов в задачах интеллектуального робастного управления

Квантовые вычисления и алгоритмы в отличие от классических аналогов в первую очередь позволяют непосредственно определить качественные свойства исследуемой функции, кодируя их в начальных квантовых состояниях суперпозиции. Для поиска решения с помощью квантовых алгоритмов (КА) целенаправленно изменяют исходную суперпозицию начальных состояний, в которой закодировано искомое решение, применяя последовательно соответствующие типы квантовых операторов. В этом случае может быть использован алгебраический формализм. Применяемый алгебраический формализм поддерживается абстрагированием логического вывода относительно квантовых эффектов и отображает важнейшие квантовые эффекты программным путем, устраняя трудность аппаратной реализации, такую как декогерентность. Поэтому в квантовых вычислениях и моделях КА особую роль играет выбор модели квантовых операторов.

²⁴ Zamani M., Karimi-Ghartemani M., Sadati N. FOPID controller design for robust performance using particle swarm optimization // Fractional Calculus and Applied Analysis: Intern. J. Theory and Applications. 2007. V. 10, No 2. P. 169 – 187.

Отметим, что если операторы ГА описаны, достаточно хорошо известны и имеют четкую физическую интерпретацию по аналогии с биологическими механизмами эволюции естественного отбора Дарвина, то операторы КА менее известны в инженерных приложениях и требуют более детального рассмотрения физической интерпретации и математической формализации квантовых вычислений.

На рис. 1.14 приведено сравнение операторов ГА и КА.

Из функциональной структуры ГА на рис. 1.14 видно, что по определению пространство поиска решений фиксировано и задается экспертом, а также фиксируется выбором функции пригодности, которая рассматривается как критерий оптимальности управления. Мнение эксперта проявляется в общем случае в его опыте корректного задания пространства поиска ГА, знании вида функции пригодности и гарантии нахождения искомого решения в заданном пространстве.

В КА все возможные пространства решений объединяются оператором суперпозиции в единое обобщенное пространство, и автоматически гарантируется нахождение искомого решения в обобщенном пространстве.

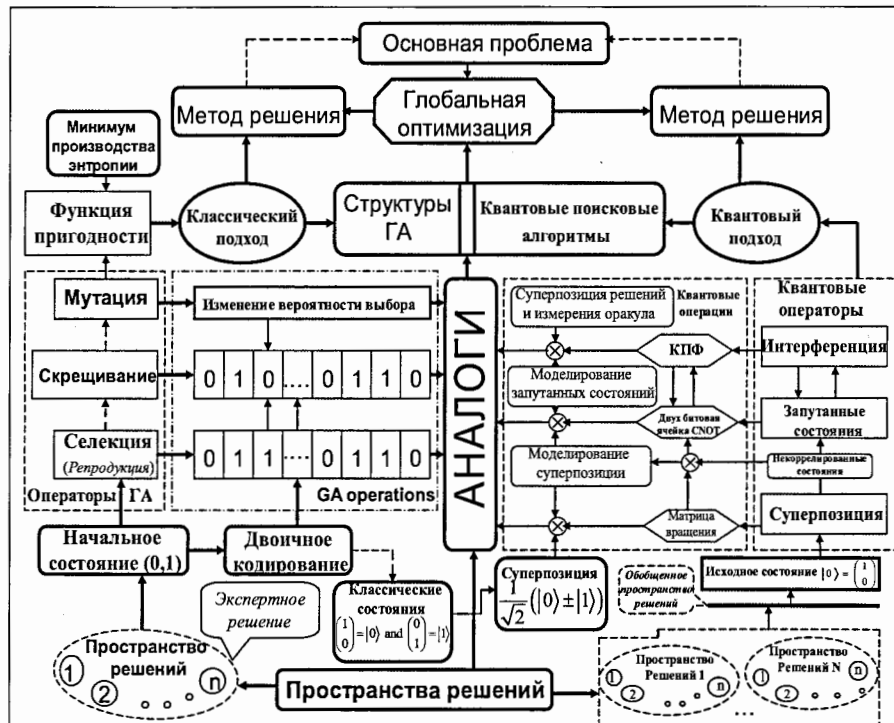


Рис. 1.14. Сравнение структур ГА и КА (КПФ – квантовое преобразование Фурье)

Рассмотрим кратко некоторые особенности квантовых операторов, составляющих основу КА, а также физическую интерпретацию результата действия от применения квантовых операторов.

1.3.1. Структура квантовых вычислений и КА

В теории квантовых вычислений можно выделить два направления исследований:

- задано множество точек функционала $S = \{(x, y)\}$, необходимо найти вид такого оператора U , чтобы выполнялось условие $y = U \cdot x$;
- задана проблема (КА), необходимо найти вид квантовой схемы – квантовой алгоритмической ячейки (КАЯ), решающей заданную проблему (реализующей данный КА).

Алгоритмы решения данных задач могут быть реализованы как на аппаратных средствах в виде КАЯ, так и на программном уровне с помощью соответствующего программного инструментария (toolkit) квантового программирования и с реализацией на классическом компьютере в среде MATLAB. Возможность²⁵ эффективного моделирования КА на классическом компьютере может быть использована для моделирования КА.

Фундаментальный результат теории квантовых вычислений заключается в том, что все операции (подобно классическому случаю) могут быть реализованы схемой, состоящей из универсальных базисных элементов. Однако в отличие от классического аналога КАЯ могут быть выполнены на различных классах универсальных элементов в зависимости от используемого вычислительного базиса. КАЯ (с фиксированными вычислительными и измерительными базисами) обеспечивают описание эволюции некоторого унитарного оператора U , которому соответствует квантовый вычислительный процесс (обозначения в приложении к данной главе 1):

$$|\psi_{fin}\rangle = U|\psi_{in}\rangle, \quad (1.4)$$

где вектор (волновая функция) $|\psi_{in}\rangle$ задает начальные условия вычислений (решаемой проблемы), а $|\psi_{fin}\rangle$ отражает результат вычислений за счет действия оператора U на начальное состояние $|\psi_{in}\rangle$.

На рис. 1.15 показана типовая структура КА.

Выбирая различный вид оператора U (в частности, гамильтониан), можно сформировать различные модели квантовых вычислений.

В общем виде модель квантовых вычислений состоит из пяти этапов:

- приготовление начального (классического или квантового) состояния $|\psi_{in}\rangle$;
- выполнение преобразования Адамара H для начального состояния с целью подготовки состояния суперпозиции;
- применение оператора запутанных состояний или оператора квантовой корреляции (квантового оракула) к суперпозиционному состоянию;
- применение оператора интерференции;
- использование оператора измерения для результата квантовых вычислений $|\psi_{fin}\rangle$.

²⁵ Ulyanov S.V., Melik-Adamyam A.F. Design and simulation technology of quantum algorithmic gates in MATLAB: V. I; II. M.: VNIgeosystems, 2012.

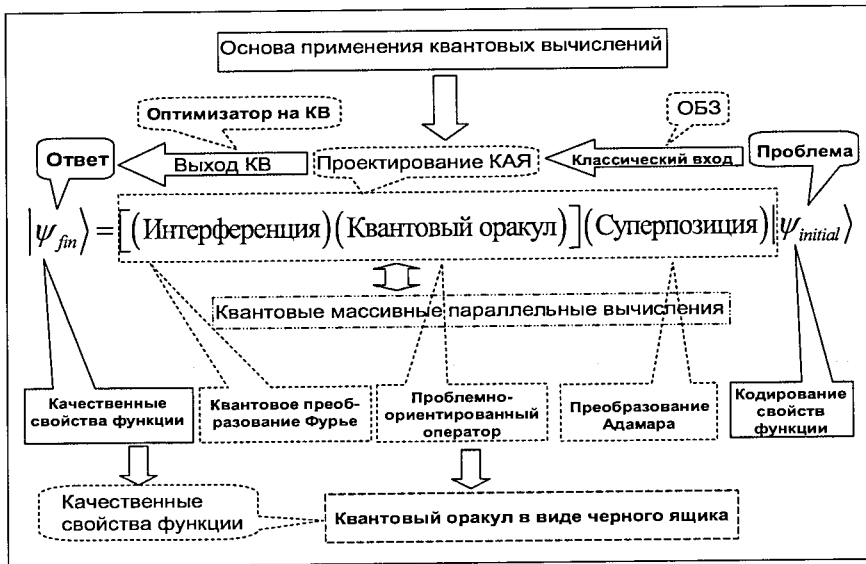


Рис. 1.15. Обобщенная структура КА

Таким образом, система моделирования квантовых вычислений и КА реализуется на классических компьютерах с применением КАЯ. Процесс проектирования КАЯ в матричной форме заключается в проектировании трех квантовых операторов: суперпозиции (*Sup*), квантовой корреляции (запутанных состояний – entanglement U_F) и интерференции (*Int*). Они составляют основу структур КА.

В общем виде структура КАЯ может быть представлена

$$КАЯ = \left[(Int \otimes^n I) \cdot U_F \right]^{h+1} \cdot [{}^n H \otimes {}^m S], \quad (1.4)$$

где I – оператор идентичности; \otimes – символ тензорного произведения; S равен I или матрице Адамара и выбор зависит от описания исследуемых свойств функции.

Одной из особенностей процесса проектирования (1.4) является выбор типа оператора U_F , физически описывающий тип квантовой корреляции и закодированные в суперпозиции качественные свойства исследуемой функции f .

Работа квантовых операторов осуществляется в итеративном режиме в зависимости от типа КА. При этом для общего случая предполагается, что определенные вычислительные проблемы могут быть решены на квантовом компьютере более эффективно (с меньшей вычислительной сложностью, так называемая *NP*-проблема), чем на классическом компьютере. Более того, с помощью эффективного применения квантового компьютера достигаются решения алгоритмически неразрешимых (на классическом уровне) проблем.

Таким образом, существуют эффективно решаемые с помощью применения КА задачи, для которых не существует ни одного успешного классического (рандомизированного) алгоритма.

Эти наблюдения свидетельствуют о том, что КА составляют физически обоснованный базис не только техники ускорения вычислений, но и поиска решений сложных проблем, используя такие квантовые законы, как суперпозиция (для расширения пространства возможных решений), квантовый параллелизм процессов вычислений (в интересах ускорения поиска решений) и квантовая интерференция (с целью извлечения искомого решения).

Так, например, тензорное произведение является обобщением билинейной операции произведения матриц $A \otimes \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \times a & A \times b \\ A \times c & A \times d \end{pmatrix}$ и имеет следующие свойства:

$$\begin{aligned} (a) \text{Ранг}(A \otimes B) &= \text{Ранг}(A) + \text{Ранг}(B); \\ (b) \text{Размерность}(A \otimes B) &= \text{Размерность}(A) \times \text{Размерность}(B). \end{aligned} \quad (1.5)$$

Таким образом, с помощью тензорного произведения можно экспоненциально расширить рабочее пространство вычислений и сформировать *базис для параллельных вычислений*. В этом смысле суперпозиция выступает как первый этап на пути организации *квантового параллелизма*.

Дополнительно к отмеченным вычислительным ресурсам квантовая корреляция рассматривается как новый физический вычислительный ресурс, позволяющий резко увеличить успешный поиск решений проблем, ранее не рассматриваемых в классической области вычислений. К таким проблемам относятся телепортация, сверхплотное кодирование, передача данных по квантовым каналам связи с повышенным уровнем секретности и защиты (от несанкционированного доступа или подслушивания), коррекция квантовых кодов с заданным уровнем толерантности и др.

Квантовые алгоритмы (КА) основаны на физических законах теории квантовых вычислений, а именно в вычислениях участвуют унитарные, обратимые квантовые операторы. В общем виде КА, согласно рис. 1.15, состоит из трех основных унитарных операций: суперпозиции; квантовой корреляции (квантового оракула или запутанных операторов) и интерференции. Четвертый оператор, оператор измерения результатов квантовых вычислений, является необратимым (классическим). Квантовые вычисления, основанные на перечисленных типах операторов, относятся к новому виду интеллектуальных вычислений.

1.3.2. КА в задачах интеллектуального робастного управления

Одним из основных назначений и преимуществ эффективного применения ИСУ является возможность гарантированного достижения цели управления с *максимальным качеством* управления на верхнем уровне и *минимальным расходом* полезного ресурса системы «*объект управления (ОУ) + регулятор*» на нижнем (исполнительском) уровне иерархической системы автоматического управления (САУ).

На содержательном уровне данная возможность отражает назначение целенаправленной деятельности ИСУ в общем случае непредвиденных ситуаций управления. При этом эффективность применения ИСУ зависит от уровня интеллектуальности разработанной системы.

Важную роль при формировании уровня интеллектуальности САУ играет выбор используемого инструментария технологии интеллектуальных вычислений для проектирования соответствующей БЗ при заданной цели управления.

Положительные результаты применения классических технологий интеллектуальных вычислений (типа мягких вычислений) совместно с аппаратом квантовых вычислений привело к новому альтернативному подходу – применению технологии квантовых интеллектуальных вычислений в задачах оптимизации процессов управления классическими ОУ (физический аналог применения обратного метода исследования «квантовая система управления – классический ОУ»). Такой подход также существенно расширяет возможности самих интеллектуальных вычислений.

Рассмотрим классификацию КА. С точки зрения функциональных возможностей КА классифицируются на две группы: алгоритмы принятия решений и поисковые алгоритмы.

Классификация КА и их применение в задачах управления отражены на рис. 1.16.

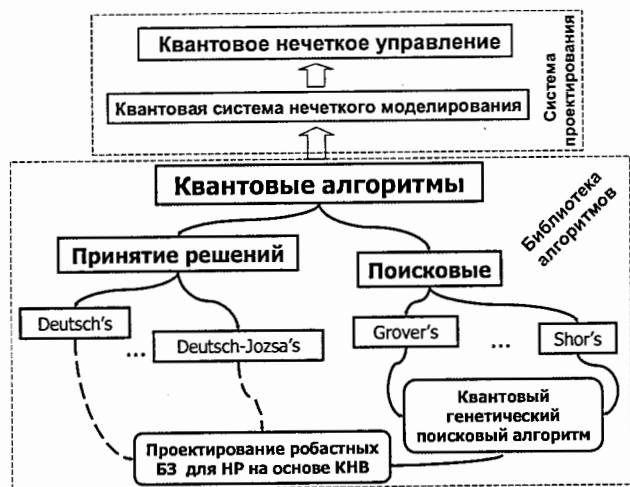


Рис. 1.16. Классификация КА

Аналогии между мягкими и квантовыми вычислениями приведены на рис. 1.17.

Особенности эффекта существования «скрытой» квантовой информации в классических состояниях, извлечение которой дает дополнительные ресурсы для формирования эффективных интеллектуальных процессов управления в условиях риска и непредвиденных ситуаций управления за счет квантовой корреляции, включаются в структуру информационной технологии проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ.

Физическая интерпретация данных особенностей и механизма извлечения скрытой квантовой информации подробно описаны ниже. Здесь остановимся на

предварительном описании структуры ИТ проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ, ее особенностях и решаемых задачах.



Рис. 1.17. Аналогии мягких и квантовых вычислений

1.4. Структура и задачи ИТ - проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ: синергетический эффект информации

Алгоритмический базис методологии и ИТ - проектирования самоорганизующихся ИСУ составляет КА формирования и управления самоорганизацией БЗ, использующий синергетический эффект возникновения дополнительного количества информации, создаваемый взаимодействующими подсистемами. При этом сами подсистемы могут содержать нулевое количество взаимной информации. Отметим прежде всего физическую сущность информационных моделей процессов самоорганизации.

1.4.1. Синергетический эффект (от взаимодействия подсистем) в классическом и квантовом количествах информации: квантовый информационный процесс самоорганизации БЗ

Под алгоритмическим процессом самоорганизации робастных БЗ в данной книге понимается процесс проектирования в реальном времени робастных сигналов адаптивного управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств в условиях неопределенности новой исходной информации об изменении цели управления, в условиях информационного риска или непредвиденных ситуаций управления.

Исполнительные устройства с помощью квантового нечеткого вывода (КНВ) формируют управляющую силу на ОУ на основе реакции продукционных правил ранее спроектированных (на ограниченное количество заданных ситуаций управления) робастных БЗ (например, нечетких ПИД-регуляторов). При этом сами спроектированные БЗ могут терять свойство робастности при новой ошибке

управления, в которой содержится информация о новой непредвиденной ситуации управления.

Процесс самоорганизации БЗ реализуется в реальном времени. В основе самоорганизации лежит синергетический эффект: обнаружение и извлечение (в процессе обработки алгоритмом КНВ) *дополнительной квантовой информации*, скрытой в классических состояниях процесса управления. Сам синергетический эффект возникает за счет корреляций между взаимодействующими частными БЗ, и осуществляется формирование дополнительного количества информации, которое отсутствует во взаимодействующих БЗ. При этом происходит *редукция избыточной информации*, содержащейся в классических состояниях процесса управления.

Таким образом, рассматриваемый в данной книге *синергетический эффект* квантовой самоорганизации знаний при формировании робастных БЗ осуществляется в *информационном пространстве* состояний системы управления в отличие от *физического пространства* при самоорганизации диссипативных физических структур²⁶.

Данный факт имеет принципиальное значение при разработке процессов проектирования робастных ИСУ. Поясним данное положение примерами описания качественных свойств классических мер информации Шеннона, таких как отрицательное значение и синергетизм взаимной информации (synergistic mutual information – синергетическая взаимная информация), скрытых в заданных мерах информации и формируемых за счет корреляционных свойств взаимодействующих подсистем^{27, 28, 29}.

В связи с тем, что в инженерных университетских дисциплинах методы теории информации излагаются факультативно, отметим основные определения, сведения и факты из теории классической и квантовой теорий информации, которые используются в данной книге: *меры информационной энтропии, относительной энтропии и взаимной информации согласно классической теории информации*^{30,31}.

Допустим, что для дискретной случайной величины X заданы функция плотности распределения вероятностей $p_X(x)$, условные функции плотности распределения вероятностей $p_{Y|X}(y|x)$, $p_{X|Y}(x|y)$ и совместная функция плотности распределения вероятностей $p_{X,Y}(x,y)$.

Определение. Мера энтропии $H(X)$ определяется в виде $H(X) = -\sum_x p(x) \log p(x)$. Энтропия является мерой измерения потенциальной неопределенности, содержащейся в случайной величине X , и имеет следующие свойства:

²⁶ Nicolis G., Prigogine I. Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations. N.Y.: J. Wiley, 1977.

²⁷ Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В., Хазен Э.М. Информационно-семантические проблемы в процессах управления и организации. М.: Наука, 1977.

²⁸ Williams P.L., Beer R.D. Nonnegative decomposition of multivariate information // arXiv:1004.2515v1. 2010.

²⁹ Griffith V. Quantifying synergistic information remains an unsolved problem // arXiv:1112.1680v2. 2011.

³⁰ Yeung R.W. Information theory and network coding. N.Y.: Springer, 2008.

³¹ Стратонович Р.Л. Теория информации. М.: Советское Радио, 1975.

- $H(X) \geq 0$, т. е. энтропия – неотрицательная величина на пространстве определения случайной величины, и $H(X) = 0$, если и только если X – величина детерминированная;
- так как $H_b(X) = \log_b(a) H_a(X)$, то нет необходимости переопределять базис логарифма;
- величина $H(X) = -\log p(x)$ называется собственной информацией случайной величины.

Определение. Мера объединенной энтропии определяется как

$$H(X, Y) \triangleq -E_{p(x,y)}[\log p(x,y)] = -\sum_{x \in X} \sum_{y \in Y} p(x,y) \log p(x,y).$$

Определение. Для заданной случайной величины X мера условной энтропии Y (усредненной по X) определяется как

$$\begin{aligned} H(Y|X) &\triangleq -E_{p(x)}[H(Y|X=x)] = -\sum_{x \in X} p(x) H(Y|X=x) = \\ &= -E_{p(x)} E_{p(y|x)}[\log p(Y|X)] = -E_{p(x,y)}[\log p(Y|X)]. \end{aligned}$$

Отметим, что в общем случае $H(X|Y) \neq H(Y|X)$.

Правило цепи. Совместная и условная энтропии имеют естественную природу вычислений.

- **Теорема (цепочное правило):** $H(X, Y) = H(X) + H(Y|X)$.
- **Следствие:** $H(X, Y|Z) = H(X|Z) + H(Y|X, Z)$.
- Условная энтропия определяет энтропию одной из случайных величин с условным знанием о другой величине.

Относительная энтропия и взаимная информация. Мера редукции неопределенности называется *взаимной информацией* $I(X; Y) = H(X) - H(X|Y)$.

Теорема: Соотношения между взаимной информацией и энтропией имеют следующий вид:

$$\begin{aligned} I(X; Y) &= H(X) - H(X|Y); \\ I(X; Y) &= H(Y) - H(Y|X); \\ I(X; Y) &= H(X) + H(Y) - H(X, Y); \\ I(X; Y) &= I(Y; X) \text{ (симметрия);} \\ I(X; Y) &= H(X) \text{ (собственная информация).} \end{aligned}$$

Диаграмма Вена, представленная на рис. 1.18, геометрически иллюстрирует соотношения между указанными мерами энтропии и количества информации.

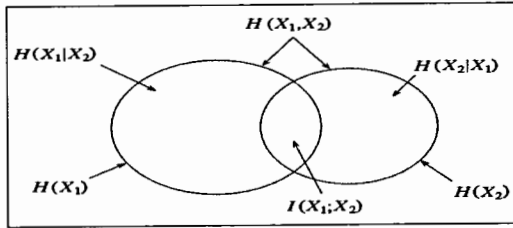


Рис. 1.18. Диаграмма Вена взаимоотношений между мерами энтропии и количества информации для двух случайных величин X_1 и X_2

Пример 3: *Отрицательное значение взаимной информации.* Допустим, что X_1 и X_2 – две независимые случайные бинарные величины с вероятностями

$$\Pr(X_i = 0) = \Pr(X_i = 1) = 0,5, \quad i = 1, 2.$$

Допустим, что

$$X_3 = (X_1 + X_2) \bmod 2. \quad (1.6)$$

Нетрудно проверить, что X_3 имеет одинаковую функцию плотности распределения вероятностей, что и X_1, X_2 . Тогда имеем, что энтропии данных величин также равны, т.е.

$$H(X_i) = -0,5 \log 0,5 - (1 - 0,5) \log (1 - 0,5) = 1, \quad i = 1, 2, 3.$$

Отметим, что X_1, X_2 и X_3 – попарно независимые случайные величины. Меры энтропии рассматриваются с основанием логарифма 2. Поэтому взаимная энтропия $H(X_i, X_j) = 2$, а взаимное количество информации $I(X_i, X_j) = 0$ для $1 \leq i < j \leq 3$. Из (1.6) следует также, что каждая случайная величина является функцией двух других случайных величин. Тогда по правилу цепочки для энтропии имеем

$$H(X_1, X_2, X_3) = H(X_1, X_2) + H(X_3 | X_1, X_2) = 2 + 0 = 2.$$

Теперь для $1 \leq i < j \leq 3$ имеем

$$\begin{aligned} I(X_i; X_j | X_k) &= H(X_i, X_k) + H(X_j, X_k) - H(X_1, X_2, X_3) - H(X_k) = \\ &= 2 + 2 - 2 - 1 = 1. \end{aligned}$$

Здесь использовано известное соотношение из теории информации

$$\begin{aligned} I(X; Y | Z) &= H(X | Z) - H(X | Y, Z) = H(X, Z) - H(Z) - [H(X, Y, Z) - H(Y, Z)] = \\ &= H(X, Z) + H(Y, Z) - H(X, Y, Z) - H(Z). \end{aligned}$$

Тогда

$$I(X_1; X_2; X_3) = I(X_1; X_2) - I(X_1; X_2 | X_3) = 0 - 1 = -1. \quad (1.7)$$

В данном примере имеем $I(X_1; X_2; X_3) < 0$, что означает $I(X_1; X_2 | X_3) > I(X_1; X_2)$.

Диаграмма Вена на рис. 1.19 характеризует данную ситуацию.

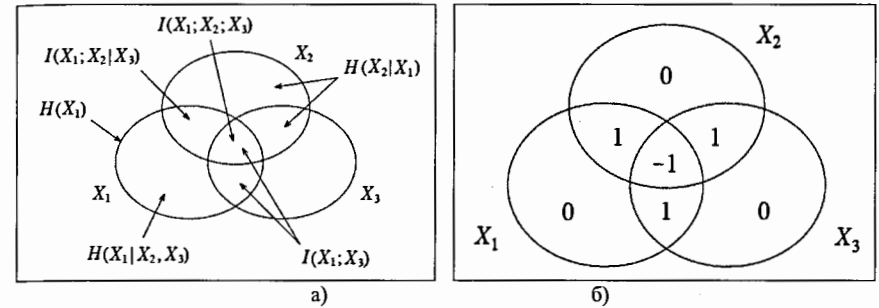


Рис. 1.19. Диаграмма Вена взаимоотношений между мерами энтропии и количества информации для двух случайных величин X_1, X_2 и X_3

Следовательно, в отличие от свойств мер энтропии Шеннона количество взаимной условной информации Шеннона между двумя случайными величинами может возрастать при добавлении условной третьей случайной величины. Более того, в (1.7) правая часть выражений не симметрична относительно символов X_1, X_2 и X_3 , в то время как левая часть является симметричной величиной. Таким образом имеем *синергетический* эффект возрастания взаимной условной информации за счет формирования симметрии из несимметричных величин и отрицательного значения взаимной информации.

Пример 4: *Синергизм информации.* Рассмотрим логическую схему обработки информации на основе логического элемента «исключающее ИЛИ – XOR», представленную на рис. 1.20, б.

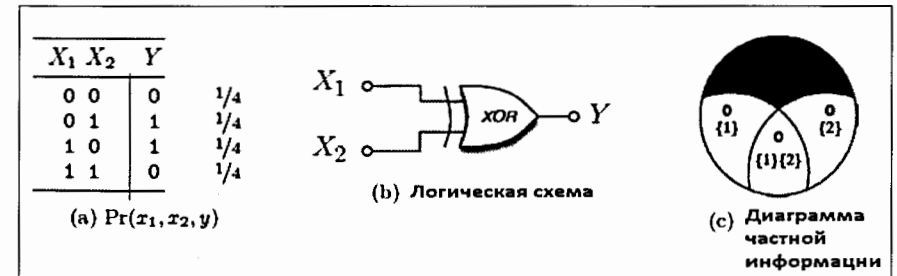


Рис. 1.20. Пример логической схемы «исключающее ИЛИ – XOR»

В этом случае коалиция X_1, X_2 полностью определяет величину Y , т.е. $I(Y; X_1, X_2) = H(Y) = 1$ бит, но для X_1 и X_2 взаимная информация относительно Y

$$I(Y; X_1) = I(Y; X_2) = 0 \text{ бит.}$$

Таким образом, множество $\{X_1, X_2\}$ определяет синергетическую информацию в количестве 1 бита относительно Y . При этом сами подсистемы $\{X_1, X_2\}$ содержат

нулевое количество информации Y . Аналогичный синергетический эффект имеет место в квантовом случае, который применяется в квантовом нечетком выводе.

Квантовый нечеткий вывод (КНВ), разработанный ранее на основе четырех фактов из квантовой теории информации, является частным случаем разработанного алгоритма самоорганизации [21]. На структурном уровне организации ИСУ осуществляется объединение спроектированных ранее конечного числа БЗ с моделью КНВ в один блок квантового НР. Это объединение дает возможность формировать в реальном времени робастное управление из реакций продукционных правил указанных БЗ на непредвиденную ситуацию управления. При этом достаточно использовать только минимальную информацию об изменении ситуации управления, содержащейся в новой ошибке управления.

Таким образом, с помощью алгоритма управления самоорганизацией БЗ осуществляется извлечение скрытой дополнительной квантовой информации из классической информации, содержащейся в реакции классических состояний сигналов управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств, спроектированных ранее для конечного числа ситуаций обучения. При этом осуществляется редукция избыточной информации в классических состояниях сигналов управления.

Результатом работы алгоритма управления самоорганизацией БЗ является проектирование (в реальном времени) робастного сигнала управления параметрами соответствующих исполнительных устройств, формирующих управляющую силу на ОУ в условиях непредвиденных ситуаций управления.

Во избежание недоразумений в интерпретации процесса самоорганизации, отметим также, что физически по определению «самосборка» и «самоорганизация» являются разными понятиями. Процесс «самосборка» отличается от «самоорганизации» отсутствием в общем виде в процессе «самосборка» предварительного выбора типа корреляции между невязанно связанными элементами («строительными блоками») и процесс «самосборка» осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий. Управление выбором (типа и вида) квантовой корреляции между «строительными блоками» в процессе «самосборка» определяет вид синергетической кооперации в формируемой за счет самоорганизации структуре.

Поэтому введение управления выбором корреляции позволяет учитывать в формируемых структурах синергетику целенаправленных кооперативных эффектов из ограниченного числа «строительных блоков» и составляет основу процесса самоорганизации.

Решение данной задачи непосредственно связано со следующей (трудной и принципиально важной для теории и систем управления) проблемой: *определение роли и влияния аналогов квантовых эффектов на повышение уровня робастности проектируемых ИСУ*. Данная проблема решается ИТ проектирования робастных ИСУ на основе КА самоорганизации БЗ в непредвиденных ситуациях управления и информационного риска.

1.4.2. Особенности разработки структуры информационной технологии и процессов проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ в MATLAB

Уровни самоорганизации в иерархии когнитивных эволюционных процессов управления были проанализированы в данной работе с точки зрения интеллектуальной системной инженерии (Intelligent System of Engineering Systems) как новой прикладной ветви теории искусственного интеллекта. Было показано, что для гарантированного достижения цели управления законы управления изменением коэффициентов усиления (coefficient gain schedule), например, нечеткого ПИД-регулятора должны проектироваться на основе дополнительно извлеченных знаний, позволяющих распознавать физические особенности и информационные ограничения на ОУ. Извлеченные знания используются для самоорганизации данного ОУ при достижении цели управления в конкретной ситуации управления. Решение поставленной задачи осуществляется на основе технологии мягких и квантовых вычислений.

На рис. 1.21, а показана типовая структура ИСУ и описана рассматриваемая в данной книге проблема проектирования объективной БЗ.

На рис. 1.21, б представлена структурная схема ИТ. Отражены также этапы проектирования объективной БЗ для робастных ИСУ, основанных на новых видах интеллектуальных вычислений.

Согласно рис. 1.21, б, центральным моментом эффективного применения технологии процессов извлечения, обработки и сжатия ценной информации для формирования активных знаний в виде робастных БЗ является применение *структурированного* случайного поиска, который осуществляется на основе технологии мягких вычислений. Этап 1 – реализация формирования конечного множества индивидуальных БЗ в конкретных ситуациях управления с обучением.

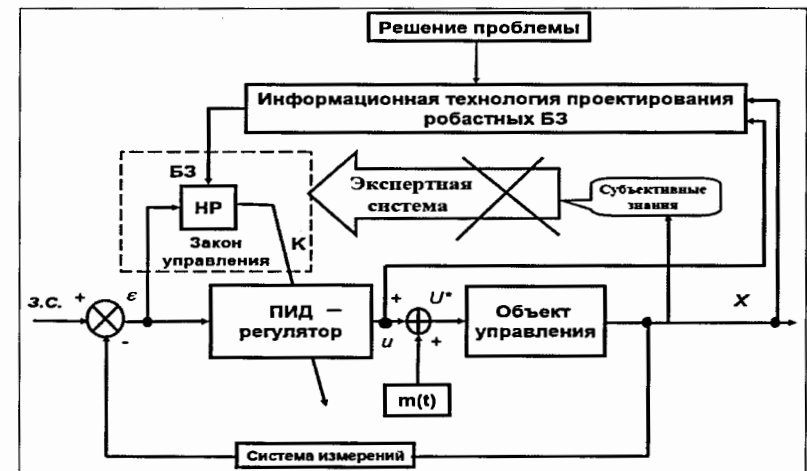


Рис. 1.21.а. Проектирование робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления: проблема проектирования БЗ

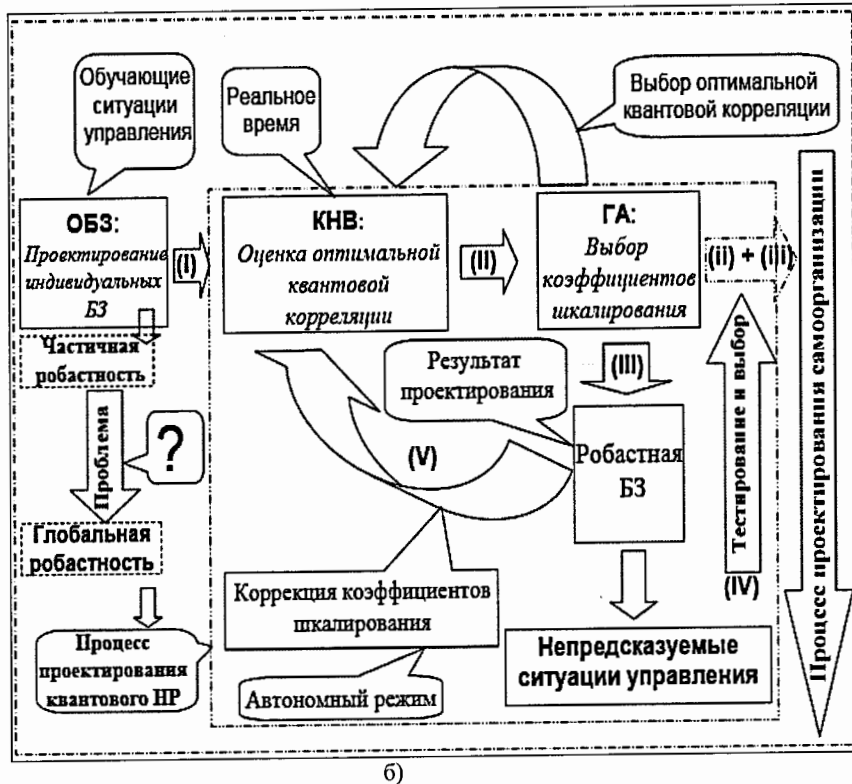


Рис. 1.21,б. Проектирование робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления: структура технологии и этапы проектирования

Использование в разработанном алгоритме квантовых стратегий управления самоорганизацией знаний составляет сущность этапа 2, на котором на основе квантового нечеткого вывода (КНВ) осуществляется самоорганизация активных (в реальном времени) знаний из реакций спроектированных индивидуальных БЗ на новую непредвиденную ситуацию управления.

В разработанной ИТ эффективно реализуется новый принцип проектирования робастных структур ИСУ: проектирование простого по структуре и практической реализации НР с повышенным уровнем интеллектуальности (wise controller) для эффективного управления сложными ОУ.

Отметим, что выходной сигнал из НР на рис. 1.21, а определяет вектор $K = \{k_p, k_d, k_i\}$ коэффициентов усиления ПИД-регулятора и означает пропорциональный, дифференциальный и интегральный коэффициенты усиления соответственно.

На рис. 1.21, а перечеркнутый блок «экспертная система» означает, что разработанная технология проектирования робастных БЗ не использует экспертные субъективные оценки продукционных правил в БЗ, которые появляются при

интерпретации экспертами результатов измерения и наблюдения выходного сигнала X из ОУ. Объективно измеренный сигнал X является исходной информацией для эксперта, оценка которого при построении БЗ носит в общем случае (например, при большой размерности) субъективный характер.

Применение технологии интеллектуальных вычислений позволяет использовать непосредственно результаты измерений и извлекать из них знания без субъективной интерпретации за счет применения функций пригодности в ГА.

Поэтому задачей технологии проектирования (обозначенной на рис. 1.21, а и структурно представленной на рис. 1.21, б) является формирование объективных робастных БЗ в ИСУ для непредвиденных ситуаций управления.

На рис. 1.21 (и ниже на рис. 1.23), а также далее по тексту используются следующие обозначения: z с. – задающий сигнал (цель управления); $u(t)$ – управляющая сила; $m(t)$ – случайные шумы (возмущения на ОУ), воспроизводимые формирующими фильтрами; U^* – управляющая сила с наложенным шумом; X – выходной сигнал ОУ; ε – ошибка управления; $K(t)$ – коэффициенты усиления ПИД-регулятора; ГА – генетический алгоритм; НР – нечеткий регулятор; КНВ – квантовый нечеткий вывод; ОБЗ – оптимизатор баз знаний; ГИОС – глобальная интеллектуальная обратная связь; КА – квантовый алгоритм; ОУ – объект управления. Отметим также, что на рис.1.21, а пунктирная рамка блока «закон управления» не охватывает ПИД-регулятор, хотя управляющий сигнал u формируется именно этим устройством.

Подчеркнем, что законы формирования управляющей силы $u(t)$ следуют из структуры ПИД-регулятора и хорошо известны. Этот факт является достоинством ПИД-регуляторов. Менее известные решения формирования во времени оптимальных законов управления коэффициентами усиления ПИД-регуляторов, несмотря на достаточно большое количество публикаций результатов (известно более 85 патентов по формированию законов управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора). Поэтому методологически в данной книге, в силу интенсивного применения, в качестве исходного выбран ПИД-регулятор, а данный блок выделен и к нему применен термин «закон управления».

Простота физической реализации спроектированных законов управления для исполнительского уровня совместно с повышенным «уровнем интеллектуальности» и дает необходимый технический эффект: неразрушение исполнительского уровня с гарантированной эффективностью и надежностью управления за счет повышения уровня его интеллектуальности.

Отметим и кратко опишем основные этапы информационной технологии проектирования робастных БЗ, представленной на рис. 1.21, б.

На первом этапе (I) проектирования с помощью технологии мягких вычислений (блок ОБЗ) формируется конечное множество БЗ для конкретных ситуаций управления, отмеченных на рис. 1.21, б выноской «обучающие ситуации управления». На данном этапе проектирования решается задача формирования частичной робастности ИСУ, при которой ИСУ выполняет задачи управления для заданного класса ситуаций управления. Вопрос формирования свойства глобальной робастности ИСУ (обозначен на рис.1.21,б выноской вопроса) составляет проблему, которую решает данная информационная технология проектирования.

Последовательный переход (от частичной к глобальной робастности) приводит к процессу проектирования квантового ИР с использованием квантовых стратегий в нечетком логическом выводе (в виде КНВ, обозначенного соответствующей выноской на рис. 1.21, б).

Реализация данного перехода осуществляется на этапах II, III и IV соответственно.

Отметим, что многие регуляторы со скользящими режимами, САУ с переменной структурой, дробные регуляторы (fractional или noninteger order controllers), H_2/H_∞ -управление, μ -синтез и др. были исследованы авторами данной книги, и они также эффективно проектируются разработанной технологией, представленной на рис. 1.22.



Рис. 1.22. Структура реализации информационной технологии проектирования робастных интеллектуальных регуляторов

После получения результатов работы КНВ блок ГА формирует коэффициенты «шкалирования» для обобщенных коэффициентов усиления ПИД-регулятора. Результаты (ii) \in этапу (II) и (iii) \in этапу (III). Остальные подэтапы процесса проектирования показаны соответствующими выносками на рис. 1.21, б, интерпретация которых представлена ниже в главах 4 – 7.

В результате процесс самоорганизации робастных БЗ в непредвиденных ситуациях управления реализуется суммарным действием перечисленных этапов проектирования, что отражено на рис. 1.23.

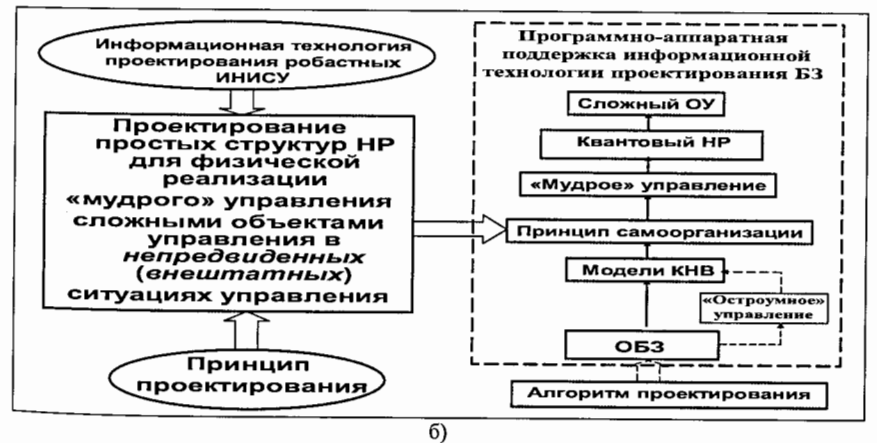
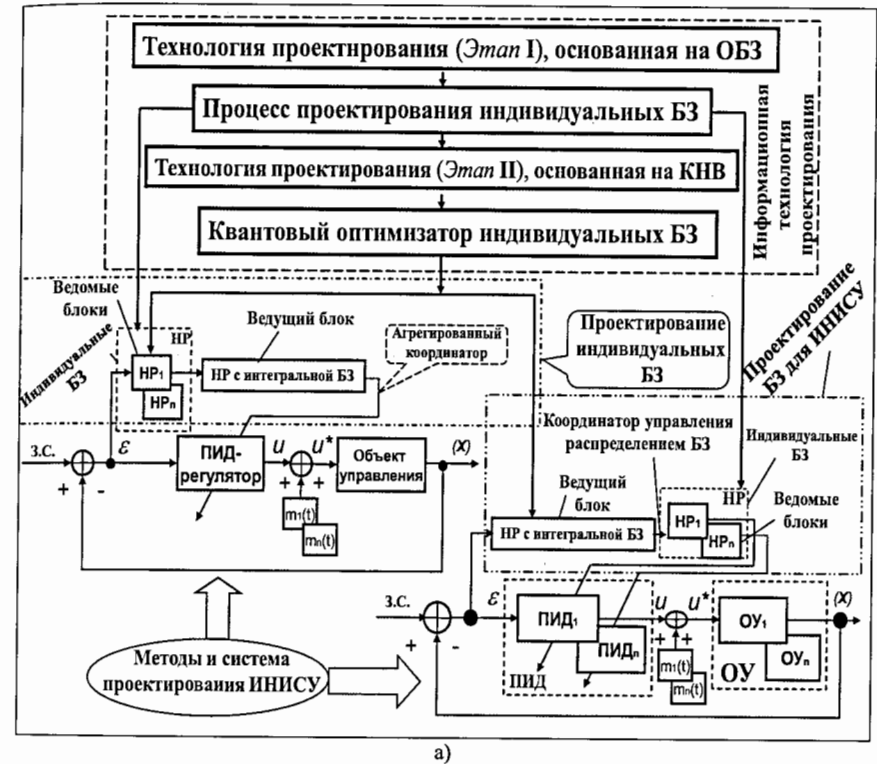


Рис. 1.23. Структура информационной технологии проектирования робастных ИСУ (а) и информационных потоков в алгоритме процессов проектирования (б)

Процесс проектирования робастных БЗ на основе информационной технологии, представленной на рис. 1.23, а, включает структуры ИСУ.

Более конкретно структуры робастных автономных ИСУ, основанных на разработанной технологии проектирования (см. рис. 1.23, б), показаны на рис. 1.24.

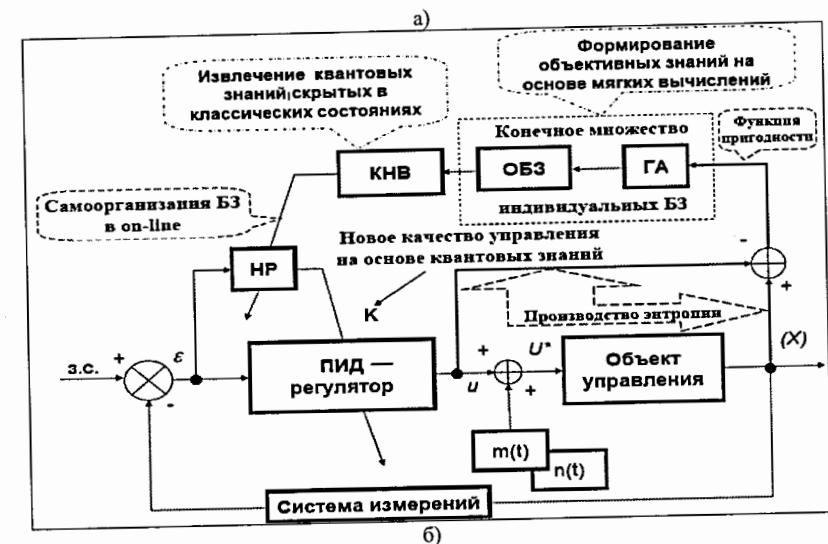
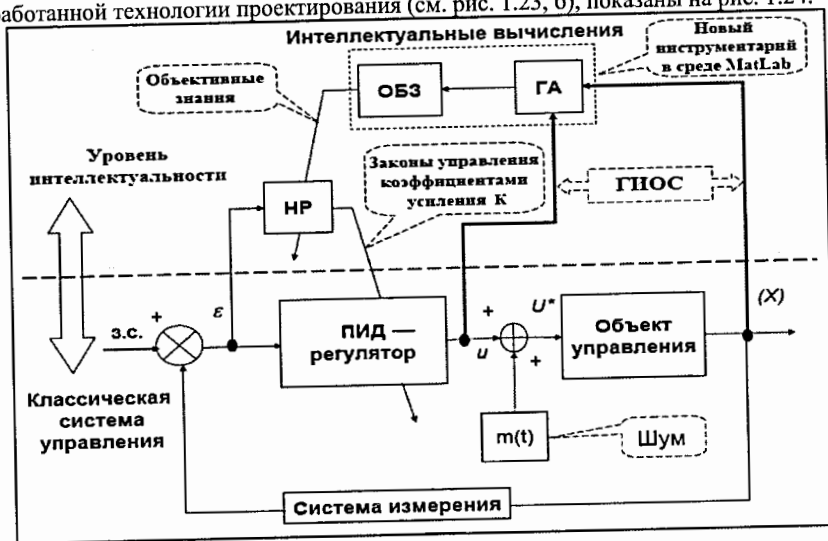


Рис. 1.24. Структуры ИСУ с оптимизаторами БЗ (ОБЗ) на интеллектуальных вычислениях: а) структура ИСУ с ОБЗ на мягких вычислениях; б) структура ИСУ с ОБЗ на квантовых вычислениях

Отметим некоторые особенности обозначений на рис. 1.24.

Двусторонняя стрелка «производство энтропии» на рис. 1.24, б означает процесс вычисления производства энтропии сигналами X и u , что эквивалентно наличию блока вычисления «производство энтропии» в обеих связях. Этот процесс был подробно описан выше. Производство энтропии рассматривается в ГА как одна из компонент функции пригодности (критерий минимума обобщенной энтропии) и является термодинамической величиной. Поэтому в сумматоре на рис. 1.24 выполняется корректная операция с физически однородными переменными (в соответствии с законами термодинамики открытых систем).

Пример применения данной операции рассмотрен ниже в главе 5.

В модели КНВ на рис. 1.24, б осуществляется извлечение квантовых знаний, скрытых в классических состояниях, полученных на выходе блока «формирование объективных знаний на основе мягких вычислений». В непредвиденных ситуациях управления КНВ на основе реакций продукционных правил робастных БЗ, спроектированных НР, формирует и реализует в реальном времени законы управления с учетом нелинейных физических и информационных ограничений на условия функционирования ОУ.

В результате с помощью КНВ уровень робастности ИСУ проектируется в законах управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора, включающих отмеченные особенности. В качестве инструментария моделирования продукционных правил БЗ используются технологии мягких и квантовых вычислений. Разработанный программный инструментарий новых интеллектуальных вычислений (unconventional computational intelligence) реализует принцип самоорганизации БЗ на основе квантового подхода и осуществляет реализацию термодинамического критерия оптимального соотношения качеств управления, таких как устойчивость, управляемость и робастность.

Ниже иллюстрируется возможность эффективного применения технологии квантовых вычислений, в частности, для решения таких алгоритмически неразрешимых задач классическими методами, как проектирование глобальной робастности ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления. Под классическими методами подразумеваются методы рекуррентной стохастической оптимизации и др., входящие, например, в промышленное программное обеспечение поддержки системы инженерных расчетов типа MATLAB/SIMULINK.

На рис. 1.25 показана структура алгоритмической поддержки интеллектуальных вычислений, реализованных в MATLAB/SIMULINK.



Рис. 1.25. Структура алгоритмической поддержки интеллектуальных вычислений

На рис. 1.26 показана укрупненная структура применения квантовых интеллектуальных вычислений в программной среде Quantum MATLAB toolkit.

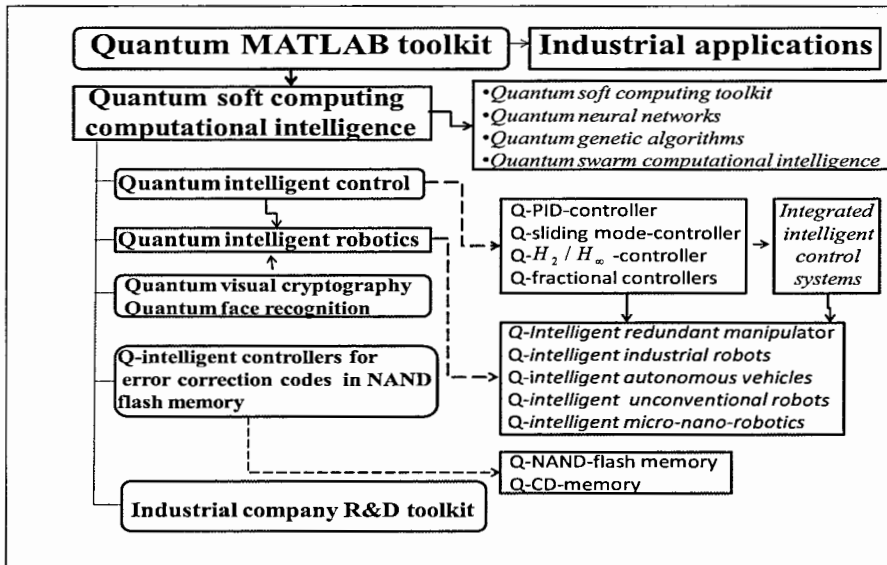


Рис. 1.26. Обобщенная структура инструментария Quantum MATLAB toolkit и его промышленного применения

Программная поддержка оптимизации дробных регуляторов, спроектированных Ninteger v. 2.3 Fractional control toolbox for MATLAB, осуществляется на основе ОБЗ на мягких вычислениях. Аналогично, согласно схеме на рис. 1.20, осуществляется оптимизация других видов регуляторов.

Структура блока «Quantum soft computing computational intelligence» для раздела «Quantum computational intelligence» отображена на рис. 1.27.



Рис. 1.27. Структура блока «Quantum computational intelligence» на рис. 1.26

Подчеркнем, что введенный в данной книге КА является новым квантовым поисковым алгоритмом. Решение задачи проектирования робастного управления ОУ (локально или глобально неустойчивым и существенно нелинейным) с векторным критерием качества управления рассматривается в данной книге в качестве примера (Benchmark) эффективного использования разработанной информационной технологии проектирования робастных ИСУ.

Следует отметить, что за последние 15 лет существенно возросла сложность структур самих ОУ и уровни неопределенности и информационного риска, в которых приходится функционировать ОУ. Для достижения цели, поставленной перед ОУ, необходимо повышать уровень интеллектуальности САУ, с помощью которого можно скомпенсировать указанные неопределенности и ошибки аппроксимации в описании нелинейных моделей ОУ за счет спроектированной робастной БЗ. В результате требуется адекватный инженерный инструментарий проектирования робастных ИСУ.

В MATLAB/SIMULINK требуемый инструментарий отсутствует, а существующий инструментарий на базе ННС типа ANFIS не справляется даже с известным классом Benchmark. Многолетний опыт применения инструментария MATLAB/SIMULINK и типа AFM (Adaptive Fuzzy Module, ST Microelectronics) показал их неработоспособность, а спроектированные БЗ для нечетких регуляторов не обладали свойством робастности в непредвиденных ситуациях управления³².

В результате был разработан соответствующий инструментарий на основе технологии мягких и квантовых вычислений, позволяющий проектировать робастные БЗ для различного уровня структурной сложности ИСУ. Технология мягких вычислений и ее применение к задачам проектирования робастного интеллектуального управления изложена ниже.

Заключение

Таким образом, в данной книге рассматриваются решения двух проблем.

Первая проблема связана с физическим обоснованием и разработкой математической модели КА управления самоорганизацией знаний и ролью аналогов физических (квантовых и термодинамических) эффектов в реализации процесса гарантированного достижения качества управления на основе технологии квантовых мягких вычислений.

При этом основное внимание уделяется описанию качественных особенностей биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации, основные компоненты которой описываются квантовыми операторами и составляют содержание разработанной модели КА управления процессом самоорганизации. Рассматривается задача робастного управления в непредвиденных ситуациях на основе квантовых стратегий принятия решений в виде инструментария КНВ как частного случая разработанного обобщенного КА управления самоорганизацией.

Решение второй проблемы демонстрирует результаты применения технологии проектирования робастных БЗ в структуре ИСУ (см. рис. 1.23 и 1.24). На конкретных примерах применения структур ИСУ, представленных на рис. 1.24, показаны особенности проектирования робастных БЗ для непредвиденных ситуаций управления и в условиях информационного риска.

Синергетический эффект квантовой самоорганизации БЗ в условиях непредвиденных ситуаций, открытый ранее³³, основан на извлечении скрытой квантовой информации в классических состояниях (дополнительный информационный ресурс) законов управления коэффициентами усиления исполнительных автоматических устройств, которые формируют оптимальную управляющую силу (с минимальными потерями полезного ресурса). Разработанная технология проектирования позволяет использовать данный дополнительный информационный ресурс для повышения уровня робастности ИСУ.

При этом установлен новый (для классической логики управления) квантовый «парадокс»: две БЗ, спроектированные для двух разных ситуаций управления и не

³² Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Проектирование робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. ТиСУ. 2006. № 5. С. 69 – 97.

³³ Ульянов С.В. Self-organization quantum robust control methods and systems for situations with uncertainty and risk. US Patent No. 8, 0345 874. 2011.

робастные в новой непредвиденной ситуации управления, с помощью квантового нечеткого вывода дают возможность спроектировать робастную БЗ, которая позволяет ИСУ достичь цели управления³⁴.

Эффективность разработанной технологии проектирования продемонстрирована на примерах, рассмотренных ниже в данной книге. Дополнительную информацию о квантовых вычислениях заинтересованный читатель может найти в [22 – 41].

Контрольные вопросы к главе 1

1. Виды интеллектуальных вычислений.
2. Структуры интеллектуальных систем управления.
3. Роль корректности моделей ОУ при проектировании БЗ.
4. Особенности технологии мягких вычислений.
5. Особенности технологии дробных вычислений.
6. Особенности технологии квантовых вычислений.
7. Структура информационной технологии проектирования робастных ИСУ.
8. Структура робастных ИСУ на основе ОБЗ на мягких вычислениях.
9. Структура робастных ИСУ на основе ОБЗ на квантовых вычислениях.
10. Структура алгоритмической поддержки интеллектуальных вычислений.
11. Структура блока “Quantum computational intelligence” в MATLAB.

Рекомендуемая литература к главе 1

1. Blencowe M. Quantum electromechanical systems // Physics Reports. 2004. V. 395, No. 2. P. 159 – 222.
2. Poot M., van der Zant H.S.J. Mechanical systems in the quantum regime // arXiv: 1106.2060 v2 [cond-mat. mes-hall]. – 2011.
3. You J.Q., Nori F. Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits // Nature. 2011. V. 474. P. 589 – 597.
4. Xiang Z.L., Ashhab S., You J.Q., Nori F. Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems // arXiv:1204.2137v2 [quant-ph] – 2012.
5. Shapiro M., Brumer P. Quantum control of bound and continuum state dynamics // Physics Reports. 2006. V. 425, No. 2. P. 195 – 264.
6. Borzi A., Stadler G., Hohenester U. Optimal quantum control in nanostructures: Theory and application to a generic three-level system // Physical Review. 2002. V. A66, No. 5.
7. Петров Б.Н., Гольденблат И.И., Уланов Г.М., Ульянов С.В. Теория моделей процессов управления: Информационные и термодинамические аспекты. М.: Наука, 1978.
8. Гольденблат И.И., Ульянов С.В. Введение в теорию относительности и ее приложения в новой технике. М.: Физматгиз, 1979.
9. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. Проблемы управления релятивистскими и квантовыми динамическими системами: Информационные и термодинамические аспекты. М.: Наука, 1982.

³⁴ Litvinseva L.V., Ulyanov S. V. Quantum fuzzy inference for knowledge base design in robust intelligent controllers // J. of Computer and Systems Sciences Intern. 2007. V. 46, No. 6. P. 908 – 961.

10. Ульянов С.В. Физические модели интеллектуальных процессов управления: Квантовые, релятивистские и информационно-термодинамические аспекты. Автореф. диссерт. на соиск. учен. степ. д.ф.-м.н. М.: ИФТП АН СССР, 1992.
11. Фрадков А.Л. О применении кибернетических методов в физике // УФН. 2005. Т. 175, № 2. С. 113 – 138.
12. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S. et al. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum feedback control models – Physical limits, information bounds, and information-disturbance trade-off. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. V. 81. 2006 (<http://www.qcoptimizer.com/>).
13. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S. et al. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum optimal control and filtering – Stability, robustness, and self-organization models in nanotechnologies. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. V. 82. 2007 (<http://www.qcoptimizer.com/>).
14. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum computation and quantum information. Cambridge: University Press, 2000.
15. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum probability, physics of quantum information and information geometry, quantum computational logic and quantum complexity Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. V. 83. 2005 (<http://www.qcoptimizer.com/>).
16. Benenti G., Casati G., Strini G. Principles of quantum computation and information. Singapore: World Scientific, V. I. 2004; V. II. 2007.
17. Janzing D. Computer science approach to quantum control. Habilitation: Univ. Karlsruhe (TH) Publ. Germany, 2006.
18. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления. // А и Т. 1990. № 11.
19. Бутковский А.Г., Самойленко Ю.И. Управление квантовыми системами. М.: Физматгиз, 1984.
20. Krotov V.F. The quantization property of probability distributions of the characteristics of dynamic systems observed in the presence of random disturbances // Automation and Remote Control. 2003. V. 64, No. 1. P. 76 – 94.
21. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S. et al. Quantum information and quantum computational intelligence: Applied quantum soft computing in AI, computer science, quantum games and self-organization, informatics and design of intelligent wise robust control. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. V. 86. 2007 (<http://www.qcoptimizer.com/>).
22. Kitaev A.Yu., Shen A.H., Vyalı M.N. Classical and quantum computation. N.Y.: AMS, 2002.
23. Brylinski F.K., Chen G. (Eds). Mathematics of quantum computation. Computational Mathematics Series. CRC Press Co, 2002.
24. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S. and Ulyanov S.S. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum decision making and search algorithms. Note del Polo Ricerca, Università degli Studi di Milano (Polo Didattico e di Ricerca di Crema). V. 84 & 85. Milan, 2005.
25. Stenholm S., Suominen K.-A. Quantum approach to informatics. Wiley- Interscience. J. Wiley&Sons, Inc., 2005.

26. Marinescu D.C., Marinescu G.M. Approaching quantum computing. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
27. Benenti G., Casati G., Strini G. Principles of quantum computation and information. Singapore: World Scientific. V. I. 2004; V. II. 2007.
28. Janzing D. Computer science approach to quantum control. Habilitation: Univ. Karlsruhe (TH) Publ. Germany, 2006.
29. Jaeger G. Quantum Information: An overview. N.Y.: Springer Verlag, 2007.
30. Kaye P., Laflamme R., Mosca M. An introduction to quantum computing. N.Y.: Oxford University Press, 2007.
31. McMahon D. Quantum computing explained. Wiley Interscience. A J. Wiley Sons, Inc., 2008.
32. Lanzagorta M., Uhlmann J. Quantum computer science. Morgan & Claypool Publ. Series: SYNTHESIS LECTURES ON QUANTUM COMPUTING (Lecture #2), 2009.
33. Nakahara M., Ohmi T. Quantum computing: From Linear Algebra to Physical Realizations. Taylor & Francis, 2008.
34. Chen G., Kauffman L., Lomonaco S. J. Mathematics of Quantum Computation and Quantum Technology. N.Y.: Chapman Hall/CRC (Applied Mathematics and Nonlinear Science Series), 2008.
35. Chen G., Church D.A., Englert B.-G., Henkel C., Rohwedder B., Scully M.O., Zubairy M.S. Quantum Computing Devices: Principles, Designs, and Analysis. N.Y.: Chapman Hall/CRC (Applied Mathematics and Nonlinear Science Series), 2008.
36. McMahon D. Quantum computing explained. N.J.: John Wiley & Sons, 2008.
37. Yanofsky N.S., Mannucci M.A. Quantum Computing for Computer Scientists. Cambridge University Press, 2008.
38. Chen G., Diao C. Mathematical Theory of Quantum Computation. N.Y.: Chapman Hall/CRC (Applied Mathematics and Nonlinear Science Series), 2009.
39. Холево А.С. Квантовые системы, каналы и информация. М.: МЦНМО, 2010.
40. Batty M., Braunstein S.L., Duncan A.J., Rees S. Quantum algorithms in group theory // [http:// arXiv: quant-ph/0310133v1](http://arXiv:quant-ph/0310133v1), 21 Oct 2003. 52 p.
41. Quantum Algorithms: Shor's algorithm, Grover's algorithm, Quantum logic, Quantum algorithm, Quantum Fourier transform, Deutsch-Jozsa algorithms. Books LLC, 2010.

Приложение к главе 1

Линейная алгебра в квантовых вычислениях и гильбертово пространство квантовых состояний (необходимые сведения)

В данной книге используются следующие обозначения и результаты.

1. Если $Z = a + i \cdot b$, то Z^* является комплексно-сопряженным, если выполняется условие $Z^* = a - i \cdot b$.

2. Вектор $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix}$ называется «кет-вектор» и $\langle\psi| = [c_1^*, c_2^*, \dots, c_n^*]$ называется «бра-вектор».

3. $\langle \varphi | \psi \rangle$ определяет внутреннее произведение векторов $|\varphi\rangle$ и $|\psi\rangle$. При этом в квантовых вычислениях эта операция определена на комплексном пространстве C^n , а не в пространстве R^n действительных чисел. Например, если $|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} 2 \\ 6i \end{bmatrix}$, $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix}$, то $\langle \varphi | \psi \rangle = [2, -6i] \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix} = 6 - 30i$.

4. Два вектора ортогональны, если и только если $|\varphi\rangle \neq 0$, $|\psi\rangle \neq 0$ и $\langle \varphi | \psi \rangle = 0$. Например, векторы $|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ и $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ортогональны, так как $[1^*, 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0$. Аналогично векторы $|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ и $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ ортогональны, т. е. выполняется следующее условие: $[1^*, 1^*] \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = 1 \times 1 + 1 \times (-1) = 0$.

4. $|\varphi\rangle \otimes |\psi\rangle$ определяет тензорное произведение и часто определяется как $|\varphi\rangle |\psi\rangle$.

$$\text{Например, } |\varphi\rangle |\psi\rangle = \begin{bmatrix} 2 \\ 6i \end{bmatrix} \otimes \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 \times 3 \\ 2 \times 5 \\ 6i \times 3 \\ 6i \times 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6 \\ 10 \\ 18i \\ 30i \end{bmatrix}.$$

Тензорное произведение является обобщением билинейной операции произведения матриц $A \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \times a & A \times b \\ A \times c & A \times d \end{pmatrix}$ и имеет следующие свойства:

$$(a) \text{ Ранг}(A \otimes B) = \text{Ранг}(A) + \text{Ранг}(B);$$

$$(b) \text{ Размерность}(A \otimes B) = \text{Размерность}(A) \times \text{Размерность}(B).$$

Таким образом, с помощью тензорного произведения можно экспоненциально расширить рабочее пространство вычислений и сформировать базис для параллельных вычислений.

5. A^* - матрица, комплексно-сопряженная матрице A . Например, если

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 6i \\ 3i & 2+4i \end{bmatrix}, \text{ то } A^* = \begin{bmatrix} 1 & -6i \\ -3i & 2-4i \end{bmatrix}.$$

6. A^T - матрица, транспонированная к матрице A . Например, если

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 6i \\ 3i & 2+4i \end{bmatrix}, \text{ то } A^T = \begin{bmatrix} 1 & 3i \\ 6i & 2+4i \end{bmatrix}.$$

7. A^\dagger - эрмитова сопряженная матрица (присоединенная) к матрице A . Отметим, что $A^\dagger = (A^T)^*$. Например, если $A = \begin{bmatrix} 1 & 6i \\ 3i & 2+4i \end{bmatrix}$, то $A^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & -3i \\ -6i & 2-4i \end{bmatrix}$.

8. $\| |\psi\rangle \|$ - норма вектора $|\psi\rangle$: $\| |\psi\rangle \| = \sqrt{\langle \psi | \psi \rangle}$, и используется для нормирования $|\psi\rangle$, т. е. $|\psi\rangle / \| |\psi\rangle \|$.

9. $\langle \varphi | A | \psi \rangle$ - внутреннее произведение $|\varphi\rangle$ и $A|\psi\rangle$ или внутреннее произведение $A^*|\varphi\rangle$ и $|\psi\rangle$.

10. $|\varphi\rangle \langle \psi|$ - внешнее произведение $|\varphi\rangle$ и $\langle \psi|$. Например,

$$|0\rangle \langle 1| = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0^* & 1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \times 0^* & 1 \times 1^* \\ 0 \times 0^* & 0 \times 1^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

и определяется как линейный оператор A , действующий следующим образом: $(|\varphi\rangle \langle \psi|)(|w\rangle) = |\varphi\rangle \langle \psi | w \rangle = \langle \psi | w \rangle |\varphi\rangle$. Допустим, что $|w\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. Имеем $|1\rangle \langle 1| w \rangle = |1\rangle \langle 1| (\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) = \beta|1\rangle$.

11. Проектор P на подпространство $V_s = \{|00\rangle, |01\rangle\}$ векторного пространства $V = \{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$ определяется как

$$P(\alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle + \alpha_{10}|10\rangle + \alpha_{11}|11\rangle) = \alpha_{00}|00\rangle + \alpha_{01}|01\rangle.$$

Оператор P проецирует вектор из V в подпространство V_s . Проектор P представляется в виде внешнего произведения. В заданном подпространстве, натянутом на ортонормальные векторы $\{|u_1\rangle, |u_2\rangle, \dots, |u_n\rangle\}$, проектор определяется в виде суммы внешних произведений $P = \sum_{i=1}^n |u_i\rangle \langle u_i|$. Каждая компонента $|u_i\rangle \langle u_i|$ эрмитова и сам оператор P эрмитов: $P^\dagger = P$, $P^2 = P$, а $Q = I - P$ называется ортогональным дополнением. Если использовать проектор $M_m = P$ для измерения, то вероятность результата измерения m определяется как $\text{pr}(m) = \langle \psi | M_m^\dagger M_m | \psi \rangle = \langle \psi | M | \psi \rangle$.

12. Коммутатор и антикоммутатор, устанавливающие отношения между двумя операторами A и B , определяются как $[A, B] = AB - BA$ и $\{A, B\} = AB + BA$ соответственно. Операторы A и B коммутируют, если $[A, B] = 0$, и антикоммутируют, если $\{A, B\} = 0$.

Глава 2. Оптимизатор баз знаний в структуре ИСУ

Рассматривается программный инструментарий¹, который основан на технологиях мягких вычислений и стохастического моделирования, и его применение для извлечения, обработки знаний и формирования баз знаний (БЗ) в интеллектуальных системах управления (ИСУ). Основные результаты формируются на основе процессов обучения с помощью нового оптимизатора баз знаний, и проводится сравнение с методом на нечеткой нейронной сети (ННС) и генетическом алгоритме (ГА). В частности, инструментарий мягких вычислений, основанный на стохастическом моделировании объекта управления (ОУ), использует новый физический критерий качества управления. Этот критерий базируется на принципах термодинамики необратимых процессов в виде минимума скорости производства энтропии как в ОУ, так и в самой системе управления (минимум потерь полезной обобщенной работы), включая также и критерий «минимума ошибки управления». С помощью стохастического моделирования создается ансамбль выборочных траекторий «рандомизированного» поведения ОУ, а с помощью принципов нечеткого моделирования на основе мягких вычислений осуществляется качественный анализ и извлечение знаний из выборочной траектории с целью формирования БЗ нечеткого регулятора (НР) в соответствии с заданным функционалом качества (функции пригодности ГА). Таким образом, робастность законов управления достигается за счет введения векторного критерия пригодности генетического алгоритма (ГА), содержащего в качестве одной из компонент физический принцип минимума производства энтропии, как в ОУ, так и в интеллектуальном регуляторе.

Проведен структурный анализ ИСУ и описаны взаимосвязи с традиционными задачами теории систем управления. На основе анализа результатов моделирования типовых структур ИСУ показано, что применение ННС не гарантирует (в общем случае) достижения требуемой точности аппроксимации обучающего сигнала (ОС), полученного от ГА и расположенного в контуре глобальной интеллектуальной обратной связи (ГИОС) структуры ИСУ. В результате при существенном изменении внешних условий повышается уровень чувствительности 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 используется оптимизатор баз знаний (ОБЗ) на мягких вычислениях, позволяющий устранить отмеченные недостатки. Использование ОБЗ приводит к повышению уровня робастности структуры ИСУ. Рассматривается структура новой версии ОБЗ, дается описание основных особенностей функциональной работы, этапы процессов технологии проектирования робастных БЗ НР. Приводятся рекомендации по развитию и эффективному применению ОБЗ в процессах проектирования робастных БЗ, позволяющие повысить эффективность функционирования ИСУ в условиях неопределенности изменения ситуации управления. Основное внимание сконцентрировано на описании конкретных результатов проектирования БЗ и моделирования ИСУ сложными, существенно-нелинейными ОУ со случайно изменяющейся структурой и изменяющимися задающими сигналами (целями управления). Основной целью работы в этом случае

является выявление уровней робастности процессов управления, поддерживающих требуемый уровень надежности и точности процессов управления в условиях неопределенности информации в процессах принятия решений. С этой целью рассмотрим прежде всего эволюцию типовых структур ИСУ, их особенности, достоинства и недостатки с точки зрения технологии проектирования и применения ИСУ.

2.1. Особенности технологии проектирования и эволюция структур робастных ИСУ

Одна из основных задач технологии проектирования ИСУ заключается в том, чтобы разработанная (выбранная) структура обладала требуемым уровнем качества управления, заданным уровнем робастности и спроектированный уровень качества управления был оптимальным (поддерживал требуемый уровень надежности и точности управления в условиях неопределенности информации). При этом одной из приоритетных и трудно решаемых задач технологии проектирования ИСУ является построение робастных БЗ, позволяющих функционировать ИСУ в различных условиях неопределенности информации. Ядро технологии проектирования робастных БЗ НР составляют новые типы вычислений и процессов моделирования [1 - 4].

Применение структур ИСУ, основанных на новых типах вычислений (таких как мягкие вычисления, квантовые вычисления и т. п.), в последние годы привлекает все большее внимание исследователей. Проведенные многочисленные исследования показывают, что они обладают следующими достоинствами: 1) сохраняют основные преимущества традиционных систем управления (такие как устойчивость, управляемость, наблюдаемость и т. п.), что составляет основу для технологии проектирования ИСУ; 2) имеют оптимальную (с точки зрения заданного критерия качества управления) БЗ, а также возможность ее коррекции и адаптации к изменяющейся ситуации управления; гарантируют достижимость требуемого качества управления на основе спроектированной БЗ; 3) являются открытыми системами, т. е. позволяют вводить дополнительные критерии качества управления и ограничения на качественные характеристики процесса управления.

В свою очередь, одной из основных задач современной теории управления является разработка и проектирование систем автоматического управления (САУ), отвечающих трем основным качествам управления: устойчивость, управляемость и робастность. Перечисленные качества управления обеспечивают требуемую 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 слабоформализованных факторах, описывающих цели управления.

Решение данной задачи осуществляется в три этапа: определяют условия устойчивости ОУ при фиксированных условиях его работы во внешней среде; формируется закон управления, обеспечивающий устойчивость работы ОУ при заданной точности управления (по заданному критерию оптимального управления); проверяется чувствительность динамического поведения ОУ на разные классы случайных возмущений и помех. Данные этапы проектирования рассматриваются современной теорией управления как относительно независимые, и основной проблемой проектирования САУ является определение оптимального взаимоотношения между этими тремя качествами управления.

¹ Ульянов С.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. и др. Информационная технология проектирования робастных баз знаний нечетких регуляторов. Ч.1. // Системный анализ в науке и образовании. 2010. № 3.

Рассмотрим конкретный пример структурного моделирования взаимосвязи указанных выше этапов проектирования на нижнем (исполнительном) уровне САУ.

Пример 1. Как известно, основной принцип построения САУ использует биологический механизм глобальной отрицательной обратной связи (ГООС). На рис. 2.1 показана традиционная САУ, основанная на принципе ГООС (см. также позицию 1 в табл. 2.1).

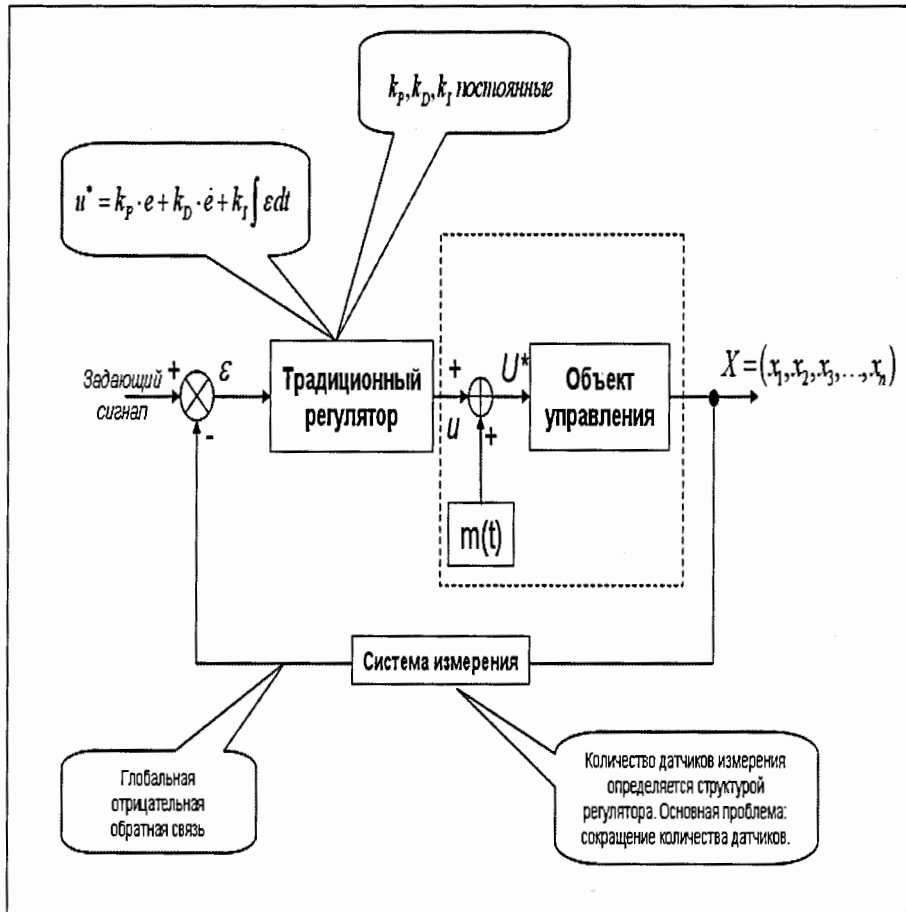
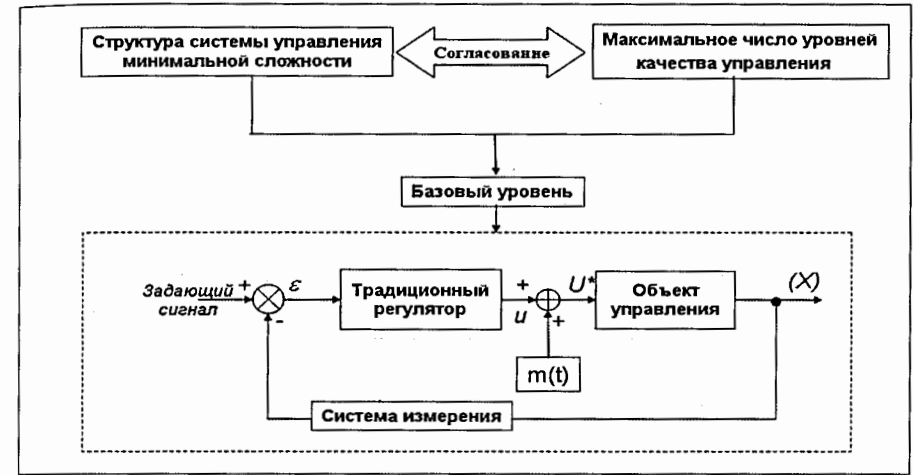


Рис. 2.1,а. Структура САУ, основанной на принципе глобальной отрицательной обратной связи (ГООС) и методе компенсации (минимума) ошибки управления (ПИД-регулятор): структура САУ с ПИД-регулятором и ее основные динамические характеристики



б)

Рис. 2.1,б. Структура САУ, основанной на принципе глобальной отрицательной обратной связи (ГООС) и методе компенсации (минимума) ошибки управления (ПИД-регулятор): взаимоотношения между качественными характеристиками и сложностью процессов управления (приведены соотношения между уровнями качества управления, сложности управления и обоснование базового уровня)

В соответствии с законами автоматического регулирования и теории управления отношение между выходом линейного динамического ОУ и задающим сигналом (цели управления) определяется следующим уравнением:

$$X(i\omega) = \frac{1}{1 + \underbrace{\Phi_1(i\omega)\Phi_2(i\omega)}_{\text{Устойчивость}}} \cdot \underbrace{\Phi_1(i\omega)\Phi_2(i\omega)}_{\text{Управляемость}} \cdot Y, \quad (2.1)$$

где $\Phi_1(i\omega)$ – передаточная функция регулятора, $\Phi_2(i\omega)$ – передаточная функция ОУ, Y – задающий сигнал, X – выходной сигнал ОУ.

Нетрудно видеть, что формула (2.1), описывающая отношение вход/выход в структуре САУ, требует исследования одновременно двух критериев качества управления: *устойчивости* и *управляемости*. Следовательно, принцип ГООС содержит в себе два указанных выше критерия качества управления. Именно поэтому робастность рассматривалась как третий независимый критерий качества управления, проектирование которого осуществлялось после установления уровней устойчивости и управляемости.

Приведенный пример одновременно указывает на жесткость структуры САУ, для которой в процессе проектирования трудно установить уровень интеллектуальности и, как следствие, уровень робастности.

Для робастных структур САУ может быть доказан физический принцип управления, позволяющий объединить и найти в аналитическом виде соответствие между требуемым уровнем устойчивости, управляемости и робастности управления.

Это определяет необходимый уровень интеллектуальности САУ в зависимости от сложности конкретной проблемы управления.

Пример 2. Кратко рассмотрим основные физические принципы процессов управления, позволяющие устанавливать взаимосвязь между качественными характеристиками динамического поведения ОУ и исполнительным устройством САУ: устойчивостью, управляемостью и робастностью управления. Для этой цели используем информационный и термодинамический подходы, объединяющие однородным условием критерии динамической устойчивости (функция Ляпунова), управляемости и робастности. Рассмотрим динамический ОУ, описываемый (в общем виде) уравнением

$$\frac{dq}{dt} = \varphi(q, t, S(t), u(t)), \quad (2.2)$$

где q – вектор обобщенных координат, описывающий динамическое поведение ОУ, u – управляющая сила (выход исполнительного устройства САУ), t – время, $S(t)$ – производство энтропии ОУ и регулятором. Необходимые и достаточные условия асимптотической устойчивости динамической системы, описываемой уравнением (2.2), определяются физическими ограничениями на вид функции Ляпунова, которая имеет два важных свойства: это строго положительная функция от обобщенных координат, т. е. $V > 0$ (условие 1); полная производная по времени от функции Ляпунова является неположительной функцией $\frac{dV}{dt} \leq 0$ (условие 2).

Согласно условиям (1) и (2) в качестве обобщенной функции Ляпунова выберем следующую функцию:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i^2 + \frac{1}{2} S^2, \quad (2.3)$$

где $S = S_p - S_c$ – производство энтропии в открытой системе «ОУ + регулятор»; S_p – производство энтропии в ОУ, S_c – производство энтропии в регуляторе (в исполнительном устройстве САУ). Введение энтропийных характеристик в уравнение (2.3) возможно в силу скалярного свойства энтропии как функции времени, $S(t)$.

Первое условие выполняется автоматически. Потребуем выполнения второго условия $\frac{dV}{dt} \leq 0$. В этом случае полная производная от функции Ляпунова, описанной в

(2.3), с учетом (2.2) имеет вид

$$\frac{dV}{dt} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n 2\dot{q}_i q_i + \frac{1}{2} 2S \cdot \dot{S} = \sum_{i=1}^n \dot{q}_i q_i + S\dot{S} = \sum_{i=1}^n q_i \cdot \varphi(q, t, S(t), u) + (S_p - S_c) (\dot{S}_p - \dot{S}_c).$$

Таким образом, имеем

$$\underbrace{\frac{dV}{dt}}_{\text{стабильность}} = \underbrace{\sum_{i=1}^n q_i \cdot \varphi(q, t, S(t), u)}_{\text{управляемость}} + \underbrace{(S_p - S_c) \cdot (\dot{S}_p - \dot{S}_c)}_{\text{робастность}} \leq 0 \quad (2.4)$$

На рис. 2.2 показана взаимосвязь между функцией Ляпунова и производством энтропии в ОУ и в САУ.



Рис. 2.2. Термодинамический критерий качества робастного управления

Уравнение (2.4) описывает физический закон качества управления и объединяет в аналитической форме различные меры качества управления типа *устойчивости, управляемости и робастности*, поддерживающие требуемую надежность и точность управления. Следовательно, взаимосвязь между устойчивостью по Ляпунову и робастностью, описанной уравнением (2.4), является основным физическим законом для проектирования САУ. Этот закон является основой для прикладной технологии проектирования БЗ робастных ИСУ (с различными уровнями интеллектуальности [1, 2]) с использованием технологий мягких вычислений.

Примечание. Практическое применение физического закона процессов управления (2.4) к традиционным задачам, таким как оценки точности (грубости) линеаризации моделей ОУ, наблюдаемости параметров процессов управления и др., рассмотрено в [1]. 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 динамического поведения физического ОУ (см. главу 4). В этом случае имеем обобщение модели «черного ящика» ОУ.

Отметим одну особенность динамического поведения ОУ с диссипацией (2.2) в виде накопления энтропии в процессе движения замкнутой (в термодинамическом смысле) системы.

Пример 3. Допустим, что динамическая система обладает кинетической энергией T_k и потенциальной энергией U и динамическое поведение описывается обобщенными уравнениями Лагранжа в виде

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T_k}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial T_k}{\partial q_i} = \frac{\partial U}{\partial q_i} + Q_i(q_i, \dot{q}_i, S),$$

$$\frac{d_i S}{dt} = \sigma = \frac{1}{T} \sum_i \dot{q}_i Q_i(q_i, \dot{q}_i, S), \quad (2.5)$$

$S = F(q, T)$ (термодинамическое условие связности),

$$\sum_i \dot{q}_i Q_i(q_i, \dot{q}_i, S) > 0 \text{ (идентично).}$$

Уравнения (2.5) описывают случай, когда тепловой обмен за счет взаимодействия с внешней средой отсутствует, и $Q_i(q_i, \dot{q}_i, S)$ описывают неконсервативные силы, включающие диссипативные силы как частный случай. Производство энтропии осуществляется в этом случае только за счет механического движения. В частном случае, когда диссипативные силы зависят линейно от энтропии S как $Q(q, \dot{q}, S) = (k + k_1 S) \dot{q}$, уравнения движения динамической системы с одной степенью свободы из (2.5) записываются в виде

$$\ddot{q} + (k + k_1 S) \dot{q} + k_0 q = A \sin k_0 t,$$

$$\frac{d_i S}{dt} = \frac{1}{T} (k + k_1 S) \dot{q}^2, \quad S_0 = c_q \ln T + \alpha_k q. \quad (2.6)$$

Из (2.6) следует, что динамическая система обладает нелинейной нестационарной структурой.

На рис. 2.3 показаны результаты моделирования накопления энтропии в динамической системе (2.6) в процессе движения.

Результаты моделирования на рис. 2.3 показывают высокую чувствительность термодинамического поведения системы к изменению энтропийного параметра и влияние на динамическое поведение системы (2.6). При этом устойчивое динамическое поведение системы (2.6) достигается за счет повышения накопления производства энтропии, что необходимо учитывать при формировании БЗ и при оценке надежности систем².

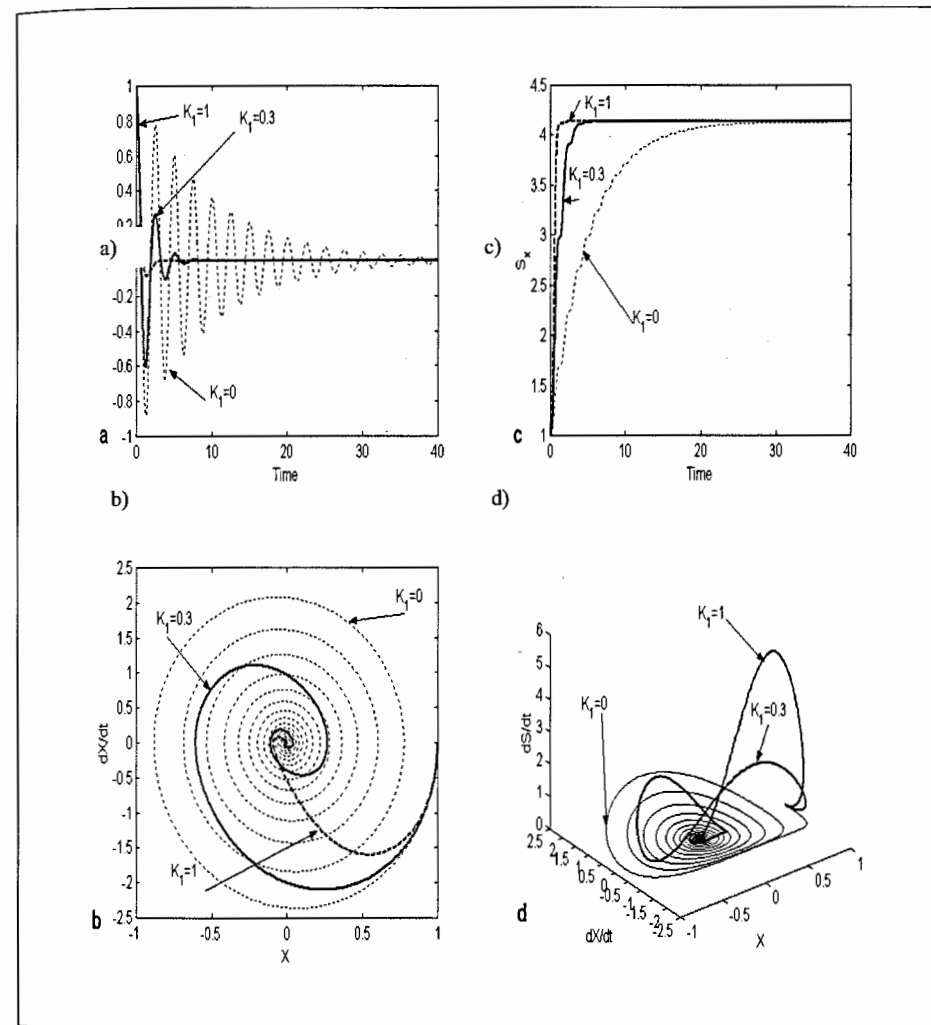


Рис.2.3. Динамическое (a,b) и термодинамическое (c,d) поведение нелинейной системы (2.6) с различными параметрами диссипации k_1

На рис. 2.4 и 2.5 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.

² Использование энтропии как скалярного параметра в уравнениях механического движения впервые использовано в [5] и повторено позже через 10 лет [6].

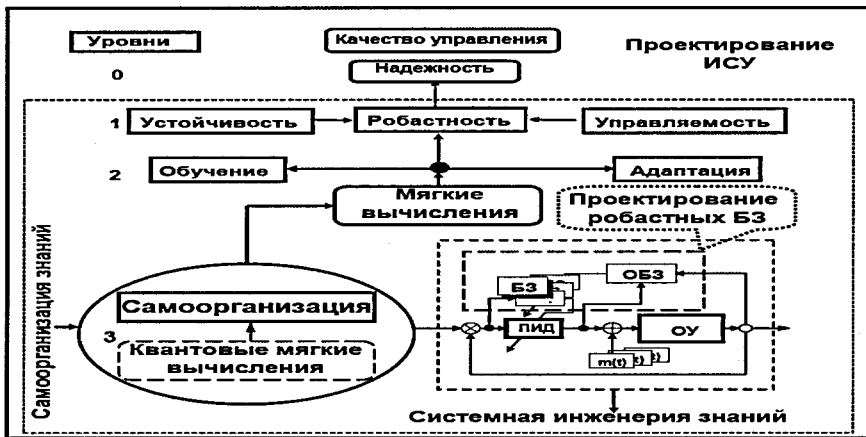


Рис. 2.4. Взаимоотношение между типами и иерархическими уровнями критериев качества управления



Рис. 2.5. Взаимоотношение между критериями качества управления, видами интеллектуальных вычислений и моделирования в технологии проектирования робастных БЗ НР

На рис. 2.6 показаны основные компоненты и их взаимосвязи в информационной технологии проектирования (ИТП), основанной на новых видах вычислений (мягких и квантовых вычислениях).

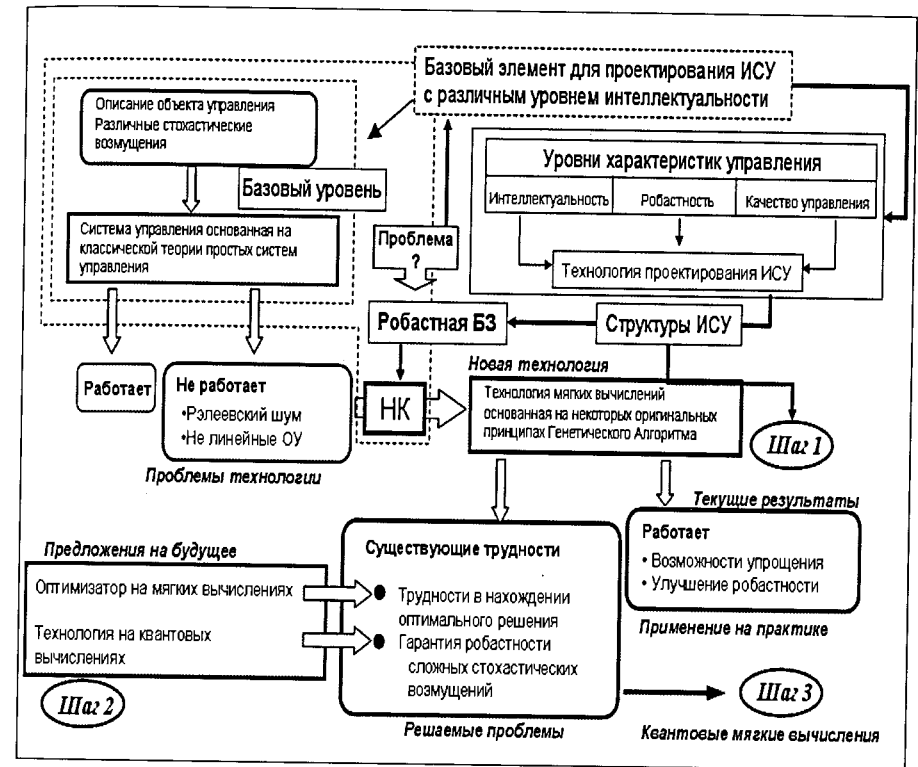


Рис. 2.6. Процесс разработки и создания информационной технологии проектирования интегрированной ИСУ

Ключевым пунктом данной ИТП является использование метода извлечения объективного знания о процессе управления независимо от субъективного опыта экспертов и проектирование объективных БЗ НР, являющихся главной составной частью робастной ИСУ. Выходным результатом применения данной ИТП является робастная БЗ НР, позволяющая ИСУ функционировать при различных видах и типах информационной неопределенности.

В заключение данного раздела сделаем следующие выводы:

1) введенный физический закон интеллектуального управления (2.4) определяет основы процессов проектирования робастных БЗ ИСУ (с различными уровнями интеллектуальности), основанных на технологии мягких вычислений; 2) мягкие вычисления создают возможность разработать универсальный аппроксиматор в виде нечеткой САУ, который извлекает информацию из данных моделирования динамического поведения ОУ и исполнительного устройства в самой САУ; 3) технология мягких вычислений гарантирует целенаправленное проектирование соответствующего уровня робастности за счет оптимального проектирования общего количества продукционных правил и типов функций принадлежности в БЗ, реализуя оптимальный аппроксиматор слабоструктурированных ОУ.

2.2. Структурный анализ ИСУ

Задачи управления физическим экспериментом с существенно нелинейными и глобально неустойчивыми ОУ исследовались при наличии различных типов стохастического возмущения на ОУ (в качестве ОУ использовалось множество типовых существенно нелинейных осцилляторов). С помощью разработанной системы стохастического моделирования определялись предельные возможности классических САУ, основанных на использовании исполнительного устройства САУ в виде традиционного ПИД-регулятора (см. табл. 2.1, позиция 1). В результате проведенного исследования был установлен следующий факт: классические САУ, основанные на ПИД-регуляторе с постоянными коэффициентами усиления, часто не справляются с задачей управления в случае глобально неустойчивых и существенно нелинейных ОУ, находящихся под воздействием негауссовского (например, рэлеевского) стохастического шума, а также в условиях временных задержек в каналах измерения.

Этот факт объясняется следующими обстоятельствами. Классические САУ основаны на принципе ГООС и методе компенсации ошибки управления. Однако в сложных ОУ (упомянутых выше) недостаточно иметь результат оптимизации только по одному критерию качества управления типа минимума ошибки управления.

Поэтому на практике проектирования ИСУ сложными ОУ возникает следующая проблема: *как ввести в систему управления другие, дополнительные критерии качества управления?* К таким критериям относятся, например, минимум производства энтропии в ОУ и/или минимум производства энтропии в самой системе управления (учитывающие тепловые потери, потери полезной работы в объекте и системе управления) или другие более сложные, векторные критерии качества управления.

Примечание. Смежные вопросы построения физической теории управления и новых видов обратных связей рассматривались в работах А.А. Красовского, С.В. Емельянова, Ю.И. Самойленко, А.Г. Бутковского, Л.И. Розоноэра, Р. Поплавского, А.М. Цирлина, А.П. Фрадкова и мн. др. Мы ограничиваемся рассмотрением взаимоотношений между уровнями качества законов управления на основе соотношений (2.4).

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 отправной точкой к развитию ИСУ, основанных на идеях, близких к использованию стратегий управления, используемых человеком-экспертом в сложных ситуациях [7, 8].

2.2.1. Поколения и эволюция типовых структур ИСУ

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

Для моделирования «человекомашинных» стратегий управления на первом этапе проектирования ИСУ стали использоваться так называемые мягкие вычисления, в основе которых лежит теория нечетких множеств и нечеткого вывода [1, 2].

Так, например, представленная на рис. 2.1 структура преобразуется в экспертную систему управления последовательным наращиванием составляющих

блоков в классической структуре САУ (в данном случае введением блока нечеткого вывода) (см. табл. 2.1, позиция 2) [4] и является примером первого поколения ИСУ.

Таблица 2.1.

Эволюция процесса проектирования структур робастных ИСУ и взаимосвязь с классической теорией управления

Структуры систем управления и эволюция развития	Уровни качества управления	Преимущества	Предельные возможности
<p>Позиция 1. Базовый элемент САУ</p>	<p>Устойчивость Управляемость Точность управления</p>	<ul style="list-style-type: none"> - простота моделирования и физической реализации (min сложность); - простота при НВ-реализации; - при минимальной сложности ОУ минимально обеспечивает устойчивость и управляемость; - гарантирует необходимые условия качества управления, но не достаточные 	<ul style="list-style-type: none"> - при изменении внешних условий или сложности ОУ не обеспечивает достаточные условия устойчивости и управляемости (отсутствие требуемого уровня робастности); - жесткая (неадаптивная) структура; - не обладает способностью к обучению и самоорганизации
Интеллектуальные системы управления, основанные на знаниях			
<p>Позиция 2. Базовый элемент ИСУ</p>	<p>Устойчивость Управляемость Точность управления Частичная адаптация</p>	<ul style="list-style-type: none"> - простота и эффективность привадежности управления сложными ОУ; - легко проектируется и реализуется современными технологиями СБИС; - высокая надежность в эксплуатации; - используется в построении робастных БЗ 	<ul style="list-style-type: none"> - набор 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; - требует большого количества времени для построения логических правил нечеткого вывода

Таблица 2.1.

Эволюция процесса проектирования структур робастных ИСУ и взаимосвязь с классической теорией управления (продолжение)

Структуры систем управления и эволюция развития	Уровни качества управления	Преимущества	Предельные возможности
<p>Позиция 3. 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>
<p>Позиция 4. Интеллектуальная обратная связь</p>	<p>Устойчивость Управляемость Точность управления Адаптация Обучение Частичная самоорганизация</p>	<p>- обратная интеллектуальная связь позволяет извлекать объективные знания и строить 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. 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; - 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>

Таким образом, первое поколение ИСУ представляло собой нечеткие экспертные системы (ЭС) с различными глубинными 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 стохастических 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]. Поэтому использование ЭС в качестве инструментария извлечения знаний и формирования БЗ (как основы технологии проектирования ИСУ) не привело к ожидаемому существенному успеху (хотя имеется много примеров промышленного внедрения) 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 с использованием технологий так называемых мягких вычислений, объединяющие в единую цепочку «ГА – ННС – 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 формированию 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 представлена путем введения в структуру ИСУ первого поколения блока, включающего в себя ГА и ННС (см. табл. 2.1, позиция 3).

В дальнейшем второе поколение ИСУ стало использовать новый вид обратной связи, называемой глобальной интеллектуальной обратной связью (ГИОС) [1], представленной в табл. 2.1 (позиция 4). Ее использование дает возможность извлекать объективные знания непосредственно из самого динамического поведения ОУ и исполнительного устройства САУ. Контур ГИОС включает ГА для получения информации об оптимальном сигнале управления (исходя из динамического и термодинамического поведения самого ОУ и ПИД-регулятора) и ННС, аппроксимирующей данный оптимальный сигнал управления с помощью заданной структуры нейронной сети.

Основным блоком в структуре ИСУ (см. табл. 2.1, позиция 5) является система моделирования оптимального сигнала управления (СМОСУ) с помощью ГА и критерия качества управления, заданного в виде одной из составляющих вектор-функции пригодности ГА. Выходом СМОСУ является 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 рассматривается как шаг 1 на рис. 2.6 и подробно описан в [2]. Основной проблемой, решаемой ИСУ второго поколения с ГИОС, является наличие возможности достижения требуемого уровня робастности на заданном классе как параметрических, так и внешних случайных возмущений различной вероятностной природы (с различными функциями плотности распределения вероятностей).

Путем моделирования поведения ОУ из множества выбранных типовых существенно-нелинейных осцилляторов было проведено исследование предельных возможностей шага 1. В результате установлено, что в случае неустойчивых и существенно-нелинейных ОУ, а также при воздействии на них ролеевского стохастического шума возможно достижение определенного уровня робастности для частных классов случайных возмущений. Однако в общем случае не удастся построить робастную БЗ, используя только шаг 1 технологии построения БЗ ИСУ (см. рис. 2.6).

Анализ результатов моделирования САУ на базе первого этапа технологии показал, что основным недостатком данного этапа является неоптимальный выбор структуры ННС, аппроксимирующей ОС. Как правило, в системах проектирования БЗ ИСУ такого типа построение соответствующей структуры ННС возложено на опытного человека-эксперта. 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 является 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 некоторого управляющего сигнала входными компонентами могут являться ошибка управления и ее производная (скорость ошибки управления), а выходным компонентом – 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 соответствует некоторая лингвистическая переменная, описывающая сигнал с помощью соответствующего (этой лингвистической переменной) терм-множества. Мощность терм-множества и параметры 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 является определение требуемого соотношения между точностью описания (аппроксимации) ОС и необходимым уровнем робастности всей структуры ННС.

Указанные проблемы решаются на втором этапе технологии построения БЗ ИСУ с помощью программных средств инструментария, названного ОБЗ (см. ниже).

2.2.2. Структурный анализ ИСУ с использованием ОБЗ

С помощью случайного поиска и методологии естественного отбора (на основе ГА) были промоделированы различные варианты робастных БЗ. Сформированные робастные БЗ позволяют осуществлять управление сложными ОУ в условиях неопределенности информации о внешних возмущениях 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.

Такой подход позволяет: 1) осуществить принцип проектирования оптимальной ИСУ с максимальным уровнем надежности и управляемости сложным ОУ в условиях неопределенности исходной информации; 2) 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 [4]. Робастность ИСУ, полученная на основе такого подхода, требует минимума исходной информации как о поведении ОУ, так и о внешних возмущениях.

Система моделирования и проектирования структур ИСУ разработана на основе ОБЗ типа «ГА – ОБЗ – нечеткий ПИД-регулятор» (см. табл. 2.1, позиция 5).

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

За счет введения и взаимодействия ГООС и ГИОС *реализован принцип неразрушения нижнего уровня управления* в соответствии с иерархией (приоритетом) уровней качества управления (см. рис. 2.5). Тем самым было определено узкое место в структуре ИСУ, которым является процесс формирования и проектирования БЗ НР. Для решения данной задачи была разработана технология проектирования БЗ под обоснованную единую структуру ИСУ (см. рис. 2.6) [1, 7].

Как следует из табл. 2.1 (позиция 5), достоинства данного структурного уровня ИСУ заключаются в том, что ГИОС позволяет осуществить построение БЗ НР на основе объективного извлечения знаний из динамического поведения ОУ и самого НР. При этом за счет использования соответствующей функции пригодности ГА (типа скорости производства энтропии как физического критерия оптимизации и т. д.) появляется возможность оптимизировать структуру самой БЗ.

ГИОС дает возможность 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 ОУ.

Кроме того, за счет обучения возможно снизить требования к необходимым энергозатратам 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, позволяющий формировать БЗ НР для увеличения количественных мер и частных критериев качества управления. Рассмотрим структуру ОБЗ для формирования и проектирования робастных структур ИСУ.

2.3. Технология проектирования робастных процессов управления в условиях непредвиденных ситуаций на основе ОБЗ

Структура ОБЗ на мягких вычислениях подробно описана в [1 – 4] и кратко - в приложении. В данном разделе рассмотрим некоторые практические особенности методики применения ОБЗ в процессах технологии проектирования робастных БЗ.

2.3.1. Общие положения

Оптимизатор баз знаний (ОБЗ) - это инструментальное программное средство для автоматического проектирования и создания нечетких моделей, которые являются универсальными аппроксиматорами слабоструктурированных ОУ. ОБЗ использует образцы векторов «вход - выход» для создания и оптимизации моделей нечетких систем управления.

Работа с ОБЗ включает следующие важные шаги:

- 1) создание обучающего сигнала;
- 2) определение формы функций принадлежности;
- 3) создание базы правил;
- 4) оптимизация базы правил;
- 5) тонкая настройка модели.

ОБЗ - это приложение для работы на платформах Win 32, поддерживает Windows 2000 и Windows XP и выше. Оптимизация с помощью MATLAB работает с версиями 7.0 и выше. Для более новых версий необходимо выполнить: MATLAB option: File->Preferences->General->MAT-files->Ensure backward compatibility.

Создание обучающего сигнала. Первое меню ОБЗ позволяет создать новую модель обучающего сигнала или загрузить предварительно созданную модель из файла. В случае создания новой модели система предложит в режиме диалога ввести параметры модели, включая модель вывода, количество входных и выходных переменных, количество нечетких множеств для каждой переменной и т. д. После того как модель создана или загружена, предлагается основное меню, с помощью которого можно просмотреть параметры модели, провести оптимизацию или поправить параметры модели вручную.

Определение формы функций принадлежности и оптимизация. На первом этапе определяется форма представления функции принадлежности лингвистических переменных для входных и выходных переменных. ОБЗ предлагает для определения формы функций принадлежности использовать uniform distribution или оптимизационный генетический алгоритм 1 (ГА₁). Uniform distribution-метод распределяет лингвистические переменные на интервалы изменения сигнала в соответствии с функцией распределения сигнала, и пользователь выбирает форму

функций. ГА₁ подбирает наилучшую возможную комбинацию количества лингвистических переменных, форму функции принадлежности и коэффициент пересечения множеств.

Создание базы правил. Основная часть модели - это база правил. Она хранит информацию о том, какой выход должен быть активирован для данного входа. ОБЗ поддерживает два типа баз правил - полную базу правил и базу LBRW. Правила полной базы правил содержат все варианты нечетких множеств для входящих переменных. Количество правил в полной базе данных равно произведению числа нечетких множеств входных переменных. Эта база чрезвычайно велика и требует существенно большего времени на оптимизацию. База LBRW хранит не все правила, а только правила, отобранные по правилу отбора наиболее влиятельных правил. LBRW отбирает правила, которые вносят наиболее значимый вклад в выход. Этот алгоритм позволяет обеспечить высокую скорость оптимизации. Сокращение числа правил с помощью алгоритма LBRW обеспечивает более высокую скорость оптимизации без потери точности модели. После того как была создана база правил, она должна быть заполнена фактическими данными. Это достигается на заключительном этапе создания модели - оптимизации базы правил. ОБЗ использует ГА оптимизации (ГА₂) для настройки параметров базы данных.

Точная настройка модели. Качество модели, созданной во время предыдущих этапов, может быть по-прежнему недостаточно. В целях повышения качества моделей используется алгоритм (ГА₃). Он изменяет формы функций принадлежности и оптимизирует модель выхода с фиксированным числом членов функций и структуры базы данных. Алгоритм обратного распространения ошибок может быть использован для улучшения выходов модели, но для точной настройки параметров базы данных возможно также использование классических градиентных методов оптимизации.

Обучающий сигнал. Для того чтобы выполнять различные алгоритмы оптимизации, ОБЗ требует наличие обучающего сигнала, который представляет образцы входных значений переменных и соответствующих им значений выходных переменных. ОБЗ позволяет загружать сигнал данных из файлов MATLAB и из текстовых файлов. Текстовые файлы обрабатываются на основе данных языка, который определяет символы для ввода десятичной точки, разделителей тысяч и т. д. По умолчанию в ОБЗ используются стандартные настройки Windows этих параметров. Если эти параметры не совпадают с форматом файла, то могут быть изменены в любой момент. После изменений параметры сохраняются в модели и будут использоваться для дальнейшей обработки данных. Это влияет на чтение и запись текстовых данных, файлы и файлы моделей.

2.3.2. Методика проектирования БЗ

Рассмотрим работу основных блоков технологии проектирования робастных БЗ.

Описание интерфейса. Основной модуль ОБЗ - это приложение Win 32 scowin.exe. Оно может быть использовано в Windows 95, 98, NT, Me, 2000 и XP и выше. Во время работы программа создает временные файлы в текущей директории с расширением «mms».

Основное меню. Основное меню показано на рис. 2.7.

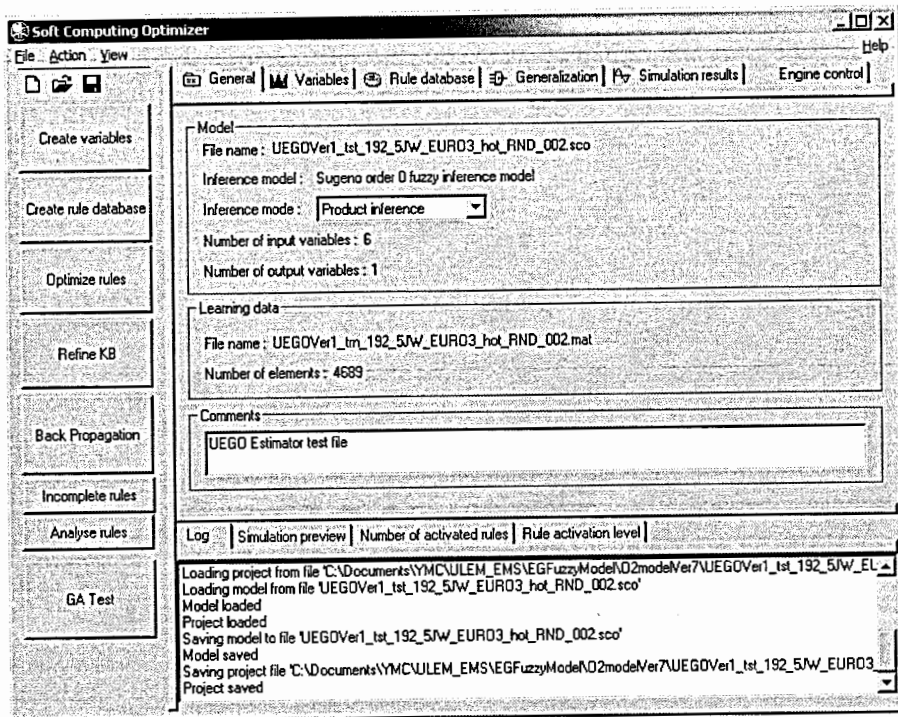


Рис. 2.7. Основное меню ОБЗ

Окно ОБЗ разделено на три части. В левой части окна расположены кнопки команд, которые активизируют основные этапы проектирования. Правая часть окна выводит параметры модели. Она организована в виде страничек, каждая из которых показывает различные свойства модели. Имеется возможность переключаться между страничками с помощью закладок. Верхняя часть состоит из пяти страничек: General, Variables, Rule database, Generalization и Simulation results.

- General выводит основную информацию, такую как имя файла, тип вывода и т. д.;
- Variables выводит входы и выходы и их функции принадлежности;
- Rule database (база правил) выводит состояние базы правил;
- Generalization позволяет выводить и корректировать параметры объединения в случае, если используется не одна база правил;
- Simulation results выводит графически выходы модели.

В нижней части меню расположены четыре странички с закладками. Log выводит лог-информацию в виде сообщений во время создания модели.

Остальные закладки в графическом виде выводят:

- Simulation preview - обучающий сигнал и выходы модели;
- Number of activation rules - граф правил, активированных для каждого сигнала;

- Rule activation level - максимальный уровень активации правил для каждого обучающего сигнала.
- Набор инструментов ОБЗ (toolbar). Набор инструментов ОБЗ расположен вверху экрана (рис. 2.8).

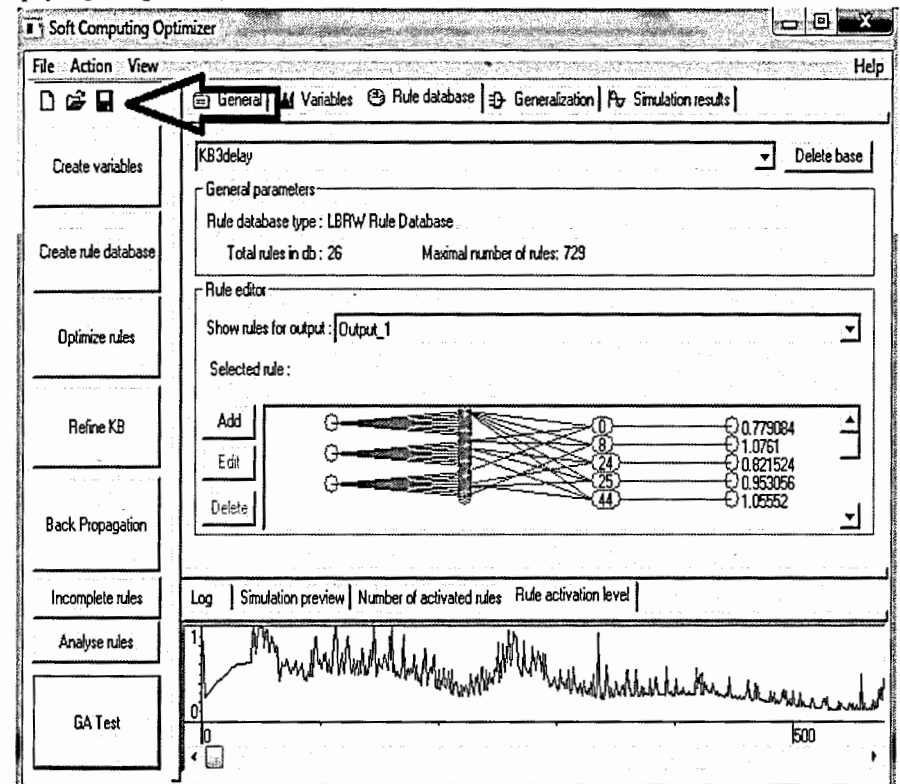


Рис. 2.8. Инструментарий ОБЗ

Три кнопки инструментов позволяют выполнить быстрый доступ к меню работы с файлом.

Меню ОБЗ. ОБЗ имеет стандартное меню (рис. 2.9), для работы с которым можно пользоваться одним кликом левой кнопки мышки или с клавиатуры, набирая ALT+ указанную на меню букву.

File Action View

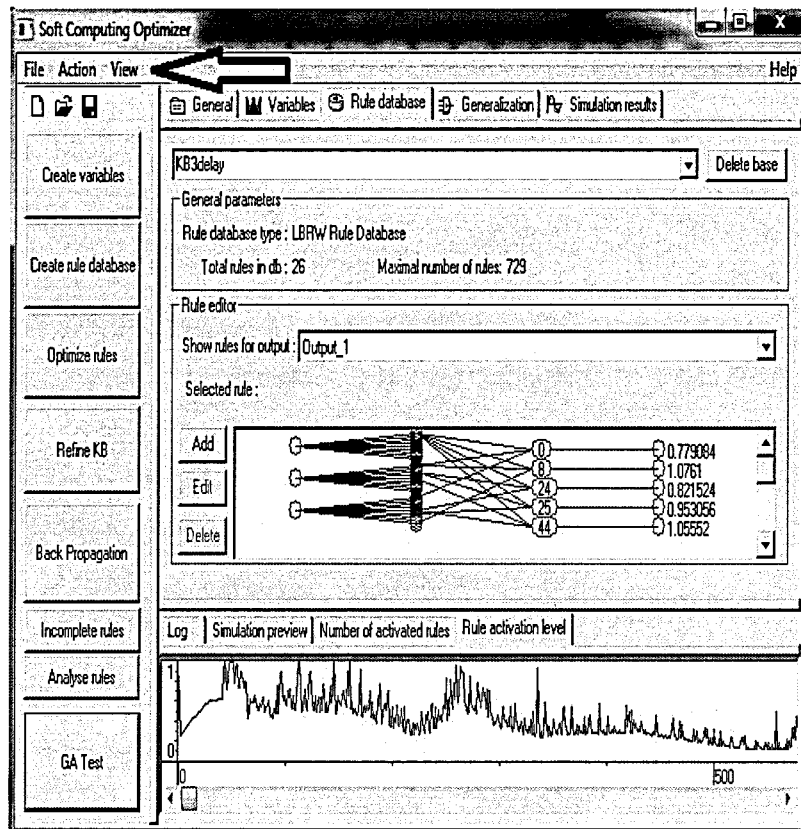


Рис. 2.9. Стандартное меню ОБЗ

FILE меню. Работа с файлами проекта осуществляется с помощью FILE Menu:

- New закрывает текущую и запускает новую модель;
- Open открывает существующую модель из файла;
- Load Teaching Signal выбирает файл с обучающим сигналом;
- Save сохраняет модель в выбранный существующий файл;
- Save As сохраняет модель в новый указанный файл;
- Export экспортирует модели в другие форматы;
- Number Format определяет формат обучающего сигнала;
- Exit закрывает ОБЗ.

ACTION меню. Это меню повторяет кнопки команд и выполняет следующие действия:

- Generate Variables создает переменные;
- Create Rule Database создает базу правил;
- Optimize Rule Database оптимизирует базу правил с помощью ГА₂;

- Refine KB оптимизирует базу правил с помощью ГА₃;
- Back propagation оптимизирует базу правил с помощью алгоритма обратного распространения ошибки;
- GA Test запускает абстрактную оптимизацию;

VIEW меню. Это меню позволяет переключаться между страничками ОБЗ:

- Project properties - страничка основных свойств;
- Variables display - переменные;
- Rule Database - база правил;
- Generalization - страничка объединения баз;
- Simulation Results - результаты моделирования;
- Log display - логи и сообщения;
- Simulation preview - предварительные результаты;
- Number of activated rules - количество активированных правил;
- Rule activation level - активационный уровень правил.

Диалоги. При выборе команды, имеющей параметры, ОБЗ показывает диалоговое окно. Диалоговое окно может содержать поля, в которые можно ввести текст, числа или выбрать несколько элементов. Типичное диалоговое окно имеет кнопку ОК, которая используется для заполнения всех полей, чтобы активировать команду, и кнопку отмены, которой можно прервать выполнение команды. Если действие требует много параметров, то будет использоваться Wizard диалог (мастер). Этот диалог состоит из последовательности диалоговых окон, которые будут направлять через все шаги операции. Три кнопки будут доступны для навигации. Кнопка NEXT>> подтверждает, что успешно завершили заполнение текущей страницы, хотите перейти к следующей странице или выполнить команду, если дополнительных параметров не требуется. Кнопку <<НАЗАД следует использовать для возврата к одной из предыдущих страниц, если хотите изменить некоторые параметры. CANCEL прерывает команду.

Файлы ОБЗ. ОБЗ сохраняет файлы в 2 формата: model file (с .sco extension) и project file (.sop extension). Во время сохранения сохраняются оба типа файлов.

Model file включает в себя всю информацию по модели.

Project file содержит всю информацию по проекту, включая model file и teaching signal file.

ОБЗ может сохранить результаты оптимизации. Эти файлы имеют разрешение .st и называются state file.

Этапы проектирования. Рассмотрим кратко программную реализацию процесса проектирования робастных БЗ.

Этап 1. Создание новой модели. Выберите ФАЙЛ -> СОЗДАТЬ НОВЫЙ (рис. 2.10).

Выбор модели нечеткого вывода. Пользователь конкретизирует тип нечеткой модели вывода (Сугено, Мамдани и т. д.), операцию нечеткого "И" (произведение или минимум), (и) число входных и выходных переменных (рис. 2.11).

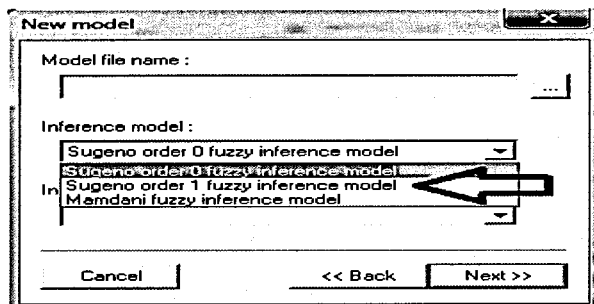


Рис. 2.10. Выбор новой модели нечеткого вывода

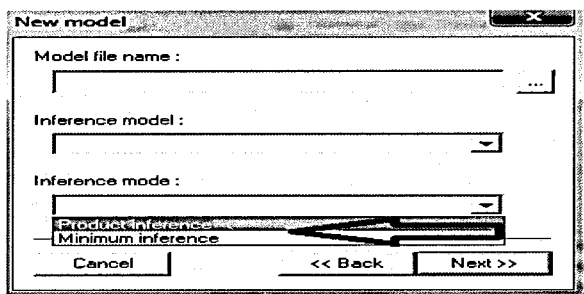


Рис. 2.11. Выбор типа нечеткого вывода

Нажатием NEXT>> осуществляется переход к следующей странице (рис. 2.12).

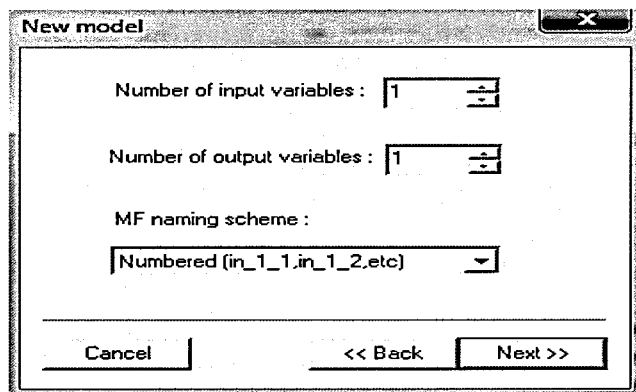


Рис. 2.12. Переход к странице выбора параметров

Выбор количества входных и выходных переменных и нажатие NEXT>> для перехода в следующее меню (рис. 2.13).

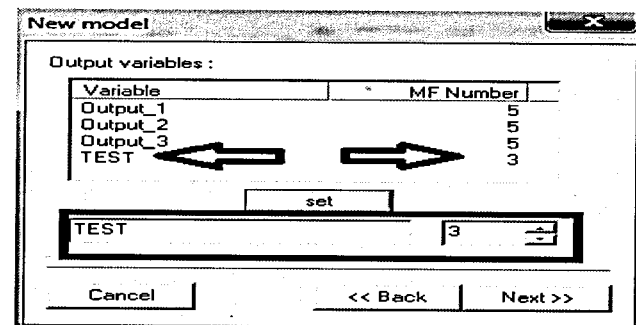


Рис. 2.13. Выбор количества входных и выходных переменных

Меню позволяет переименовывать сигналы и назначать количество функций принадлежности.

NEXT>> для перехода в следующее меню.

Загрузка обучающего сигнала. Обучающий сигнал, который представляет образцы входных значений переменных и соответствующих им значений выходных переменных, может быть загружен из файлов MATLAB и из текстовых файлов (рис. 2.14).

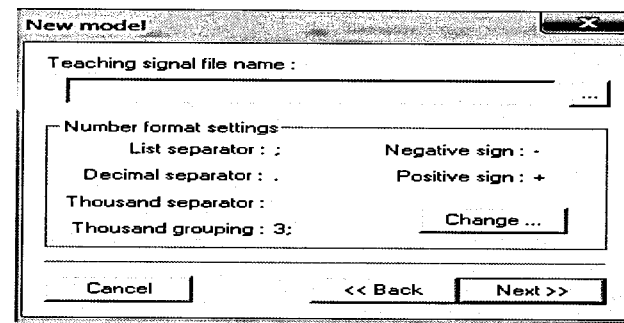


Рис. 2.14. Меню выбора обучающего сигнала и настроек экспорта

Текстовые файлы обрабатываются на основе данных языка, который определяет символы для ввода десятичной точки, разделителей тысяч и так далее. По умолчанию в ОБЗ используются стандартные настройки Windows этих параметров. Если эти параметры не совпадают с форматом файла, то могут быть изменены. После изменений параметры сохраняются в модели и будут использоваться для дальнейшей обработки данных. Это влияет на чтение и запись текстовых данных, файлы и файлы моделей.

NEXT>> для окончания создания модели и вывода сообщения в Log page.

Просмотр параметров модели. Параметры модели можно просмотреть на вкладке (рис. 2.15):

- имя файла;
- модель вывода;
- тип вывода;
- количество входов/выходов;
- имя файла teaching signal;
- количество образцов teaching signal в файле.

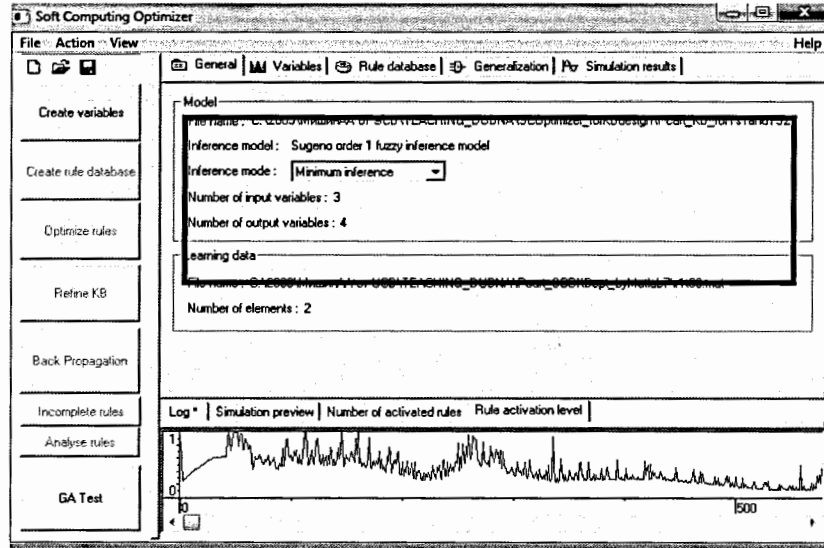


Рис. 2.15. Окно просмотра параметров модели

Этап 2. Создание переменных. Рассмотрим особенности этапа создания переменных.

Создание лингвистических переменных. С помощью генетического алгоритма (ГА₁) определяется оптимальное число функций принадлежности для каждой входной лингвистической переменной, а также выбирается оптимальная форма представления их функций принадлежности (треугольная, гауссовская и т. д.). В качестве критерия оптимальности той или иной конфигурации лингвистических переменных используется максимум совместной информационной энтропии и минимум информации о сигналах в отдельности, которые имеют вид

$$H_{X_i|X_k}^{(j,l)} = H \left(x_j \left| x_i = \mu_{X_i}^j, x_k = \mu_{X_k}^l \right. \right) = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N [\mu_{X_i}^j(x_i(t)) * \mu_{X_k}^l(x_k(t))] \log \left[\mu_{X_i}^j(x_i(t)) * \mu_{X_k}^l(x_k(t)) \right], \quad (2.7)$$

$$H_{X_i}^j = -p_{X_i}^j \log \left(p_{X_i}^j \right) = -p \left(x_i \left| x_i = \mu_{X_i}^j \right. \right) \log \left[p \left(x_i \left| x_i = \mu_{X_i}^j \right. \right) \right] = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mu_{X_i}^j(x_i(t)) \log \left[\mu_{X_i}^j(x_i(t)) \right] \quad (2.8)$$

соответственно. Здесь * – выбранная операция нечеткого «И»; $X_i, i=1, \dots, m$ – набор лингвистических переменных, соответствующих компонентам ОС; $\mu_{X_i}^j, i=1, \dots, m, j=1, \dots, l_{X_i}$ – терм-множество, соответствующее i -й компоненте ОС; $x(t) = (x_1(t), \dots, x_m(t))$ – компоненты ОС; N – число компонентов ОС.

Создание переменных с помощью алгоритма оптимизации ГА₁. Используется Create Variables или выбирается Action/Generate Variables меню (рис. 2.16). Во время создания ОБЗ предложит выбрать метод создания переменных. При работе с методом ГА₁ будет предложено установить фильтр, этот алгоритм позволяет удалить лишние шумы и двигаться дальше: Next>>.

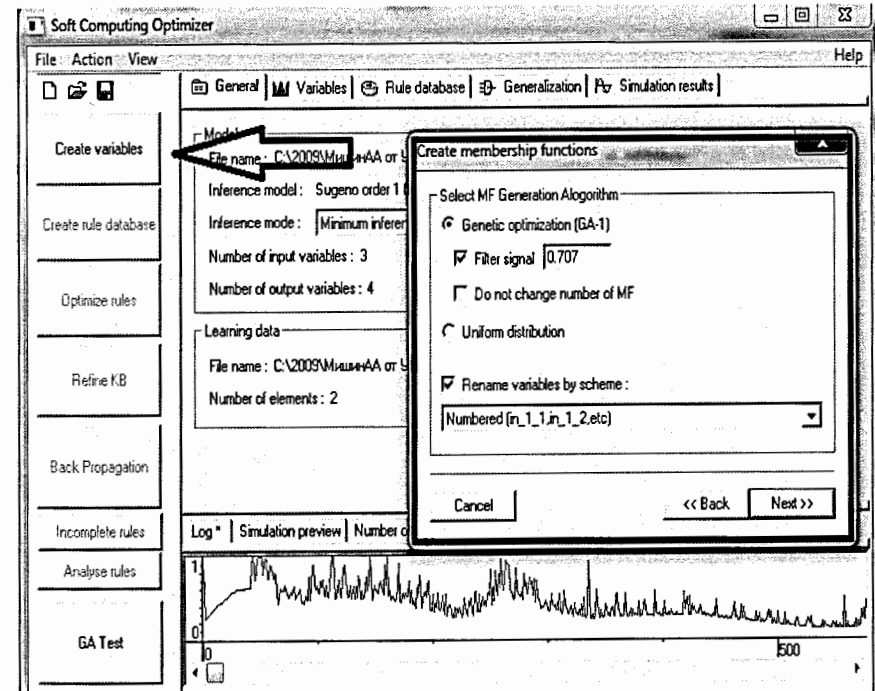


Рис. 2.16. Создание переменных с помощью алгоритма оптимизации

Следующий диалог предлагает ввести параметры оптимизации ГА (рис. 2.17).

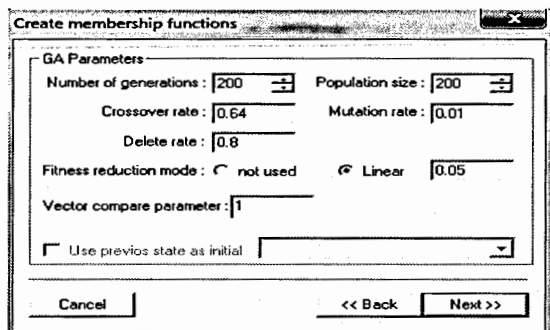


Рис. 2.17. Окно ввода параметров оптимизации

Используется оператор NEXT>> для перехода в следующее меню, где выбираются переменные, которые должны быть оптимизированы (рис. 2.18).

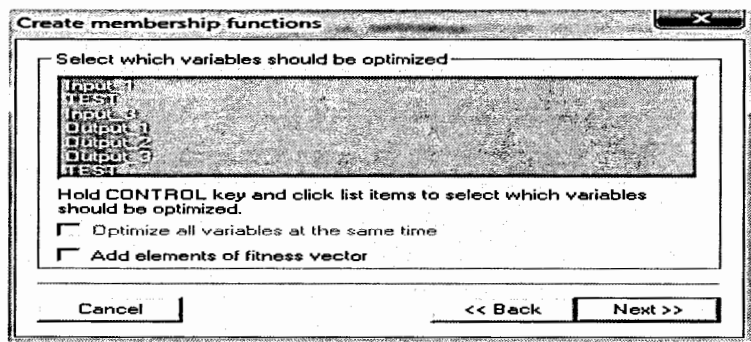


Рис. 2.18. Выбор переменных функций принадлежности

Оператор NEXT>> для создания переменных (рис. 2.19).

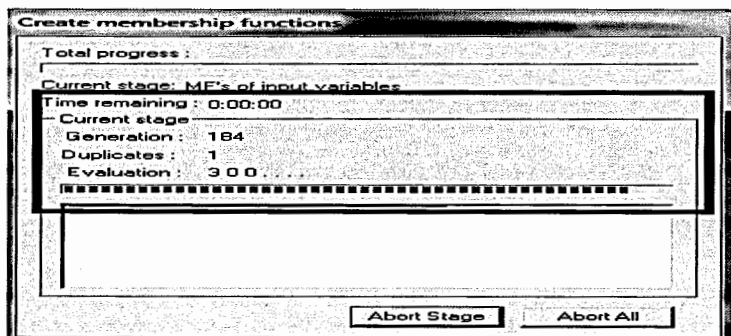


Рис. 2.19. Создание переменных функций принадлежности

Следующий диалог будет выводить стадию процесса создания переменных. Можно выбрать Abort Stage, если хотите прервать процесс в текущий момент. ОБЗ установит значения на наиболее оптимальных из уже выбранных. Выбор Abort All останавливает оптимизацию и возвращает в главное меню ОБЗ.

Этап 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:

$$R_{total_fs}^l \geq TL, \quad (2.9)$$

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

$$R_{total_fs}^l = \sum_{k=1}^N R_{fs}^l(t_k), \text{ и } R_{fs}^l(t_k) = \prod [\mu'_{j_1}(x_1(t_k)), \mu'_{j_2}(x_2(t_k)), \dots, \mu'_{j_n}(x_n(t_k))], \quad (2.10)$$

где t_k – моменты времени, $k=1, \dots, N$; $\mu'_{j_k}(x_k), k=1, \dots, n$ – функции принадлежности входных переменных, l – индекс правила в БЗ; символ «Π» обозначает операцию нечеткой конъюнкции (в частности, может интерпретироваться как произведение или минимум);

(2) «максимальный» критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют условию

$$\max_i R_{fs}^l(t) \geq TL. \quad (2.11)$$

База правил создается управлением Create rule database command или Action/Create rule database меню (рис. 2.20).

Возможны следующие режимы:

- Add new: создать новую базу и добавить ее к старой, старая база останется неизменной;
- Recreate current: заменить базу;
- Copy current: сделать копию.

Также можно ввести имя базы.

ОБЗ поддерживает два типа баз правил – полную базу правил и базу LBRW. Правила полной базы правил содержат все варианты нечетких множеств для входящих переменных. Количество правил в полной базе данных равно произведению числа нечетких множеств входных переменных. Эта база чрезвычайно велика и требует существенно большего времени на оптимизацию.

База LBRW хранит не все правила, а только правила, отобранные по критерию отбора наиболее влиятельных правил. LBRW отбирает правила, которые вносят наиболее значимый вклад в выход. Этот алгоритм позволяет обеспечить высокую скорость оптимизации. Сокращение числа правил с помощью алгоритма LBRW обеспечивает более высокую скорость оптимизации без потери точности модели.

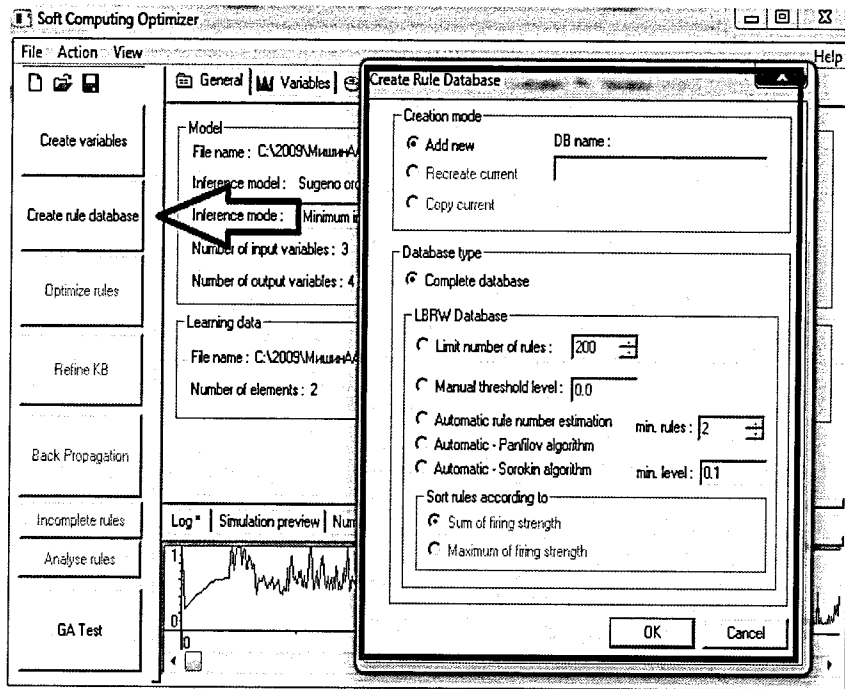


Рис. 2.20. Создание базы правил

Этап 4. Оптимизация базы правил. После того как была создана база правил, она должна быть заполнена фактическими данными. Это достигается на заключительном этапе создания модели - оптимизации базы правил. ОБЗ использует генетический алгоритм оптимизации (ГА₂) для настройки параметров базы данных. С помощью генетического алгоритма (ГА₂) оптимизируются правые части правил БЗ, определенной на этапе (шаге) 3. Критерием качества на этом этапе выступает минимум ошибки аппроксимации ОС (обучающего сигнала):

$$E = \sum_{p=1}^N E^p, \quad E^p = 1/2 \left(F(x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p) - d^p \right)^2, \quad (2.12)$$

где F – выход ИСУ, d – целевое состояние ОУ согласно ОС. На данном этапе находится решение, близкое к глобальному оптимуму (минимум ошибки аппроксимации ОС). С помощью следующего этапа это решение может быть локально улучшено. Чтобы начать оптимизацию, нажмите Optimize rules или Action/Optimize rule database меню (рис. 2.21).

Используется teaching signal source для ГА₂. Complete - значит использовать полностью teaching signal файл. Для больших моделей это может вызвать замедление оптимизации. Для ускорения выберите Optimized. Применяется NEXT>> для перехода genetic algorithm parameters (рис. 2.22).

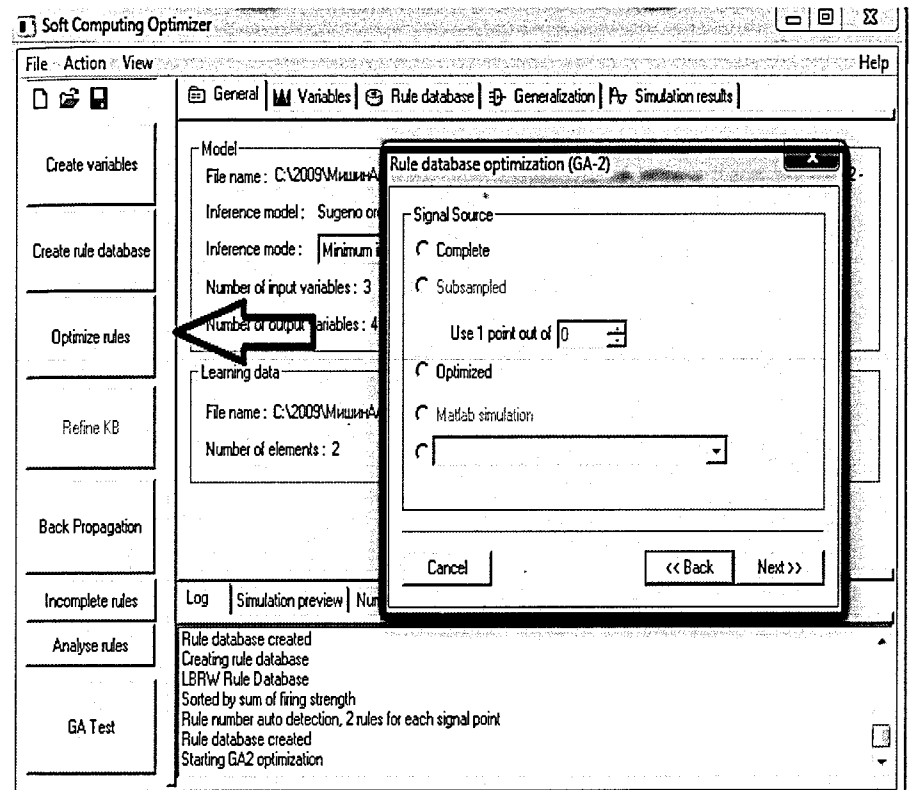


Рис. 2.21. Оптимизация баз правил с помощью ГА₂

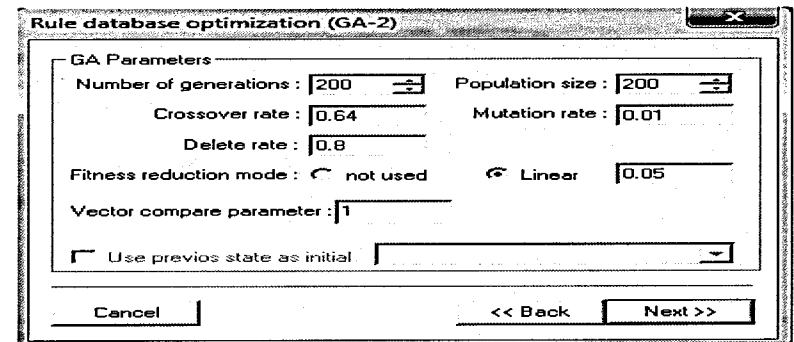


Рис. 2.22. Выбор параметров ГА₂
Изменяются соответствующие параметры, используется оператор NEXT>> (рис. 2.23).

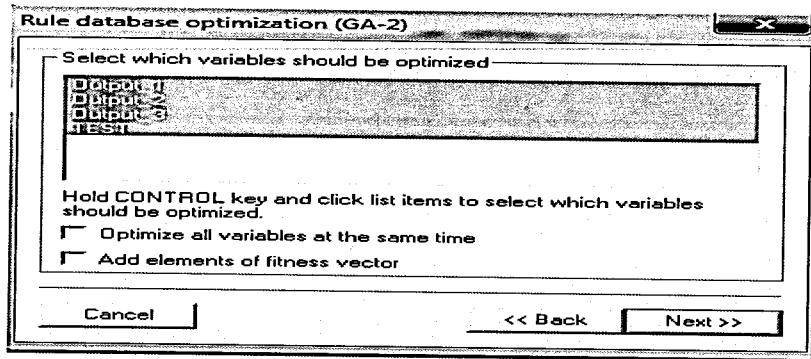


Рис. 2.23. Изменение параметров ГА₂

Оптимизация по всем параметрам происходит по умолчанию, но можно выбрать нужные параметры перед началом оптимизации. Следующий диалог выводит стадию процесса создания переменных. Выбирается Abort Stage, если необходимо прервать процесс в текущий момент. ОБЗ установит значения из уже выбранных, наиболее оптимальные. Выбор Abort All останавливает оптимизацию и возвращает в главное меню ОБЗ. После завершения устанавливается следующий диалог (рис. 2.24).

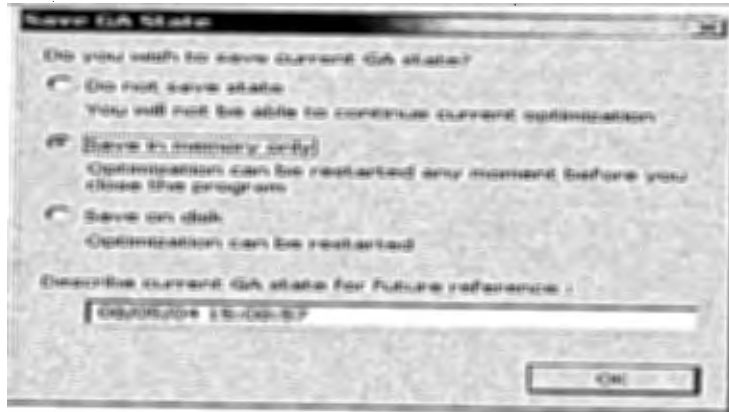


Рис. 2.24. Процесс завершения оптимизации ГА₂

Диалог позволяет сохранить результаты расчета.

Этап 5. Настройка базы правил. С помощью генетического алгоритма (ГА₃) 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. В качестве таких функций может выступать как минимум ошибки аппроксимации ($E = \sum_p E^p$), так и максимум

совместной информационной энтропии ($H_{X_i}^j$). Кроме того, может происходить настройка БЗ с помощью других оптимизационных алгоритмов, таких как алгоритм обратного распространения ошибки. Используется Refine KB или Action/Refine KB меню (рис. 2.25).

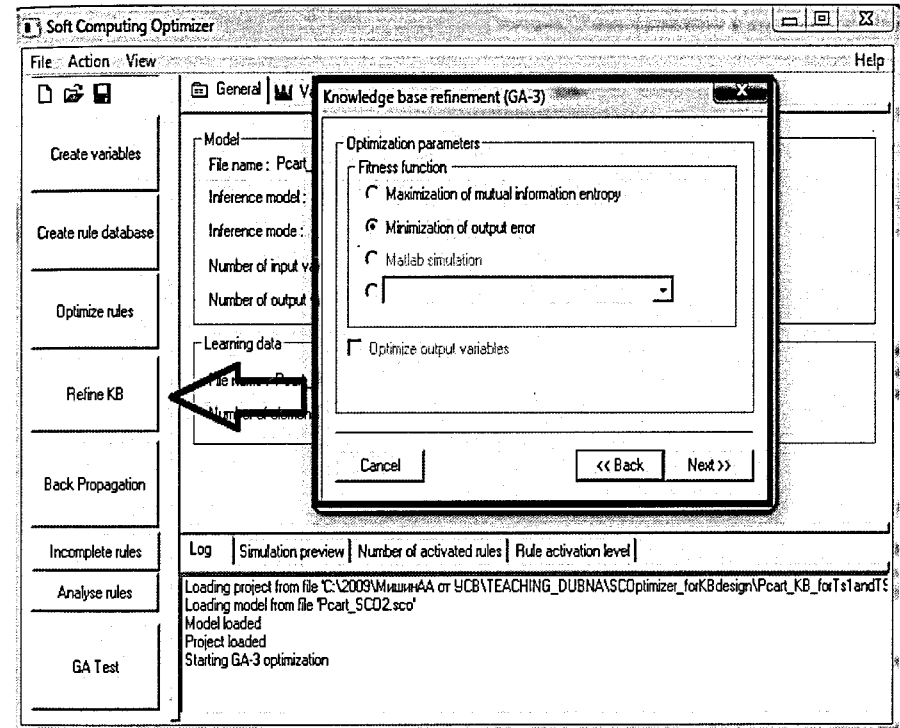


Рис. 2.25. Меню для работы ГА₃

Используется диалог, предлагающий 3 варианта:

- Maximization of mutual information entropy: ОБЗ оптимизирует параметры функций принадлежности, не изменяя количество переменных;
- Minimization of output error: минимизация ошибки;
- Matlab simulation: использование MATLAB/SIMULINK для вычисления функции пригодности.

Используется первый вариант и оператор NEXT>> (рис. 2.26).

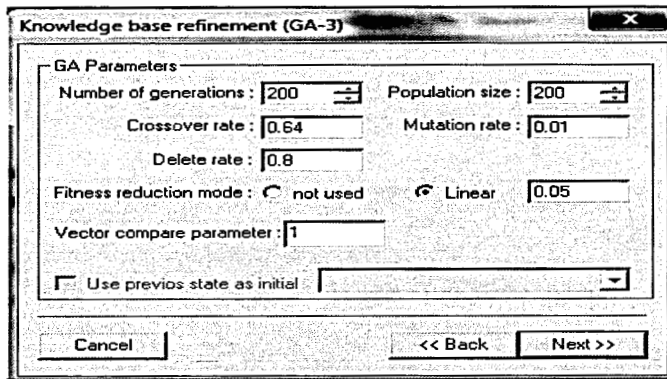


Рис. 2.26. Окно диалога для выбора параметров ГА₃

Устанавливаются параметры оптимизации и используется NEXT>> (рис. 2.27).

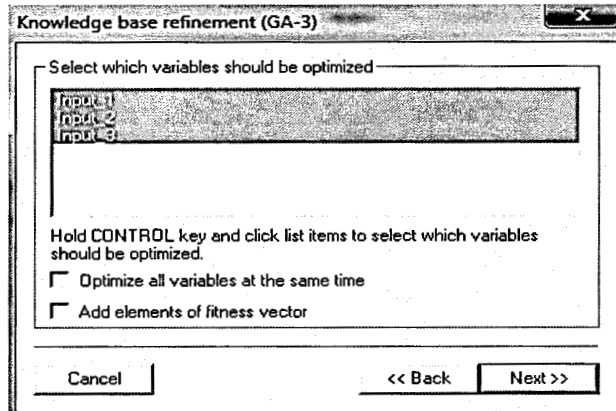


Рис. 2.27. Установка параметров оптимизации

Оптимизация осуществляется по всем параметрам по умолчанию. Используется оператор NEXT>> для оптимизации (рис. 2.28).

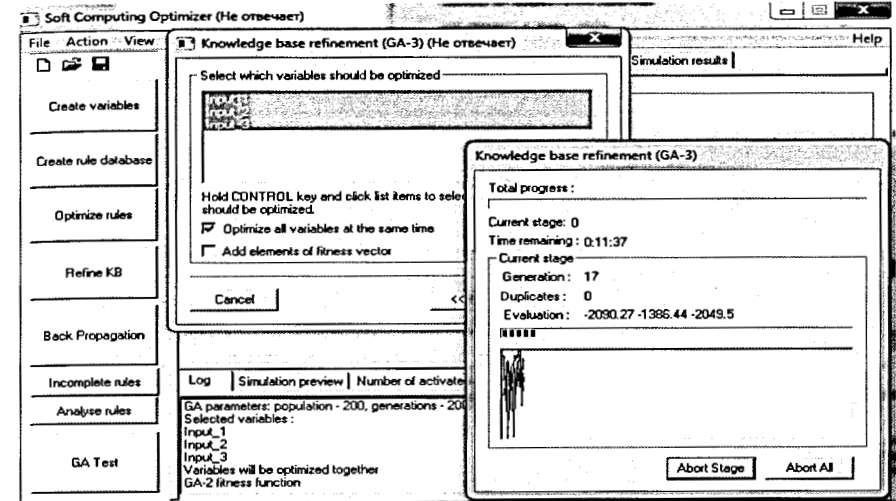


Рис. 2.28. Процесс оптимизации ГА₃

Следующий диалог будет выводить стадию процесса создания переменных. Можно выбрать Abort Stage, если необходимо прервать процесс в текущий момент. Выбор Abort All останавливает оптимизацию и возвращает в главное меню ОБЗ.

Использование MATLAB/SIMULINK для оптимизации. MATLAB/SIMULINK используется для вычисления функции пригодности во время создания модели. ОБЗ взаимодействует с MATLAB следующим образом. Когда для ГА требуется вычисление функции пригодности, MATLAB запускает соответствующий расчет, определенный пользователем. MATLAB вычисляет функции пригодности на основе выходов модели и возвращает в ОБЗ. Для интеграции необходимо выполнить следующие действия в указанном диалоге (рис. 2.29).

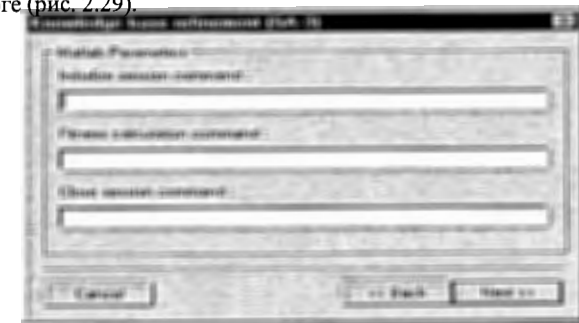


Рис. 2.29. Интеграция в ГА₃

На рис. 2.30 – 2.33 показаны результаты формирования и работы баз правил.

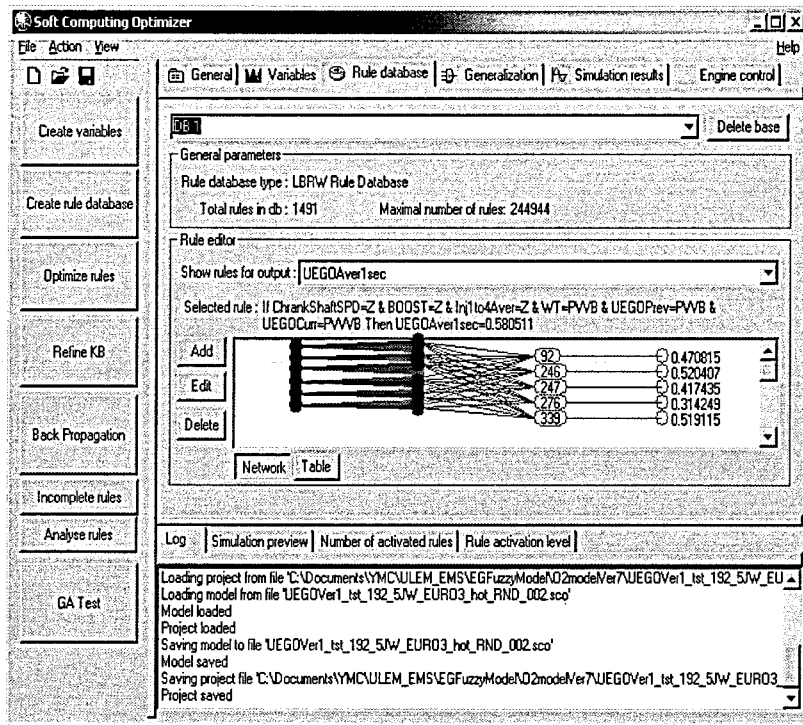
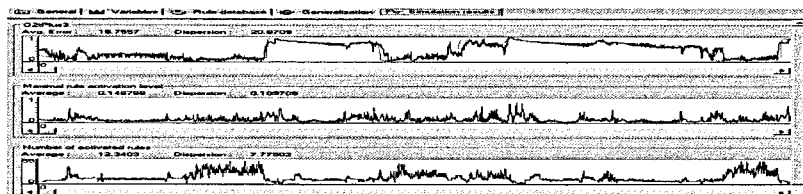
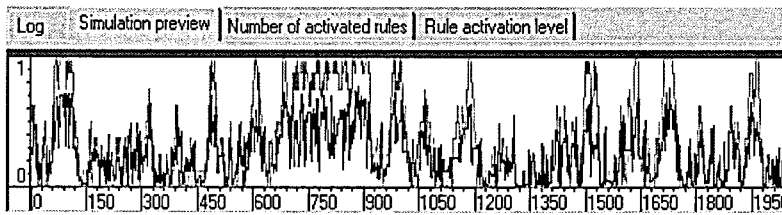


Рис. 2.30. Результат формирования и работы баз правил



а) Результаты моделирования



б) Предварительные результаты
Рис. 2.31. Результат работы баз правил

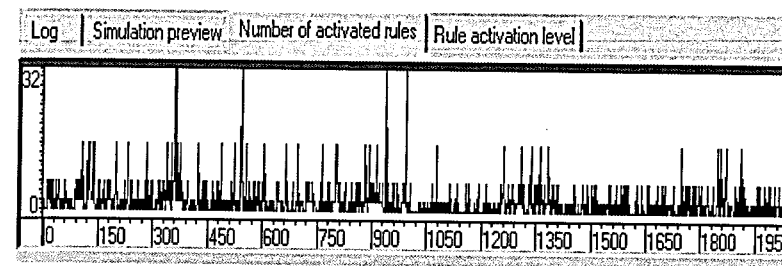


Рис. 2.32. Количество активированных правил

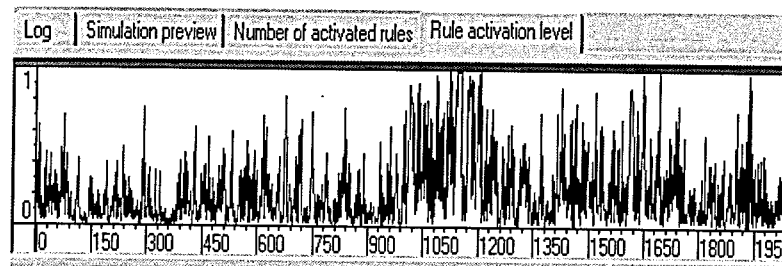


Рис. 2.33. Порог активации правил

2.4. Перспективы развития программной системы

Как отмечалось, за счет интеграции с системой MATLAB ОБЗ позволяет вводить дополнительные критерии качества управления, не изменяя исходного кода программных модулей системы. В силу отмеченных выше преимуществ ОБЗ составляет основу для первого этапа технологии проектирования ИСУ. Разработанный ОБЗ может работать на одном пространстве решений (*в силу предельных возможностей* ГА). Для глобальной оптимизации на множестве пространств решений требуется разработать новый вид вычислений, позволяющий объединить множества пространств решений в одно с помощью квантового оператора суперпозиции. Таким новым видом вычислений являются *квантовые вычисления*. В этом случае квантовый оптимизатор, использующий методы квантовых вычислений, в качестве исходной информации использует частные БЗ, спроектированные на основе ОБЗ. Это означает, что ОБЗ позволяет создавать основу для реализации второго этапа технологии, использующего квантовые вычисления. С этой целью в архитектуре ОБЗ предусмотрен программно-встраиваемый интерфейс с блоком квантовых вычислений (см. рис. 2.34).

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

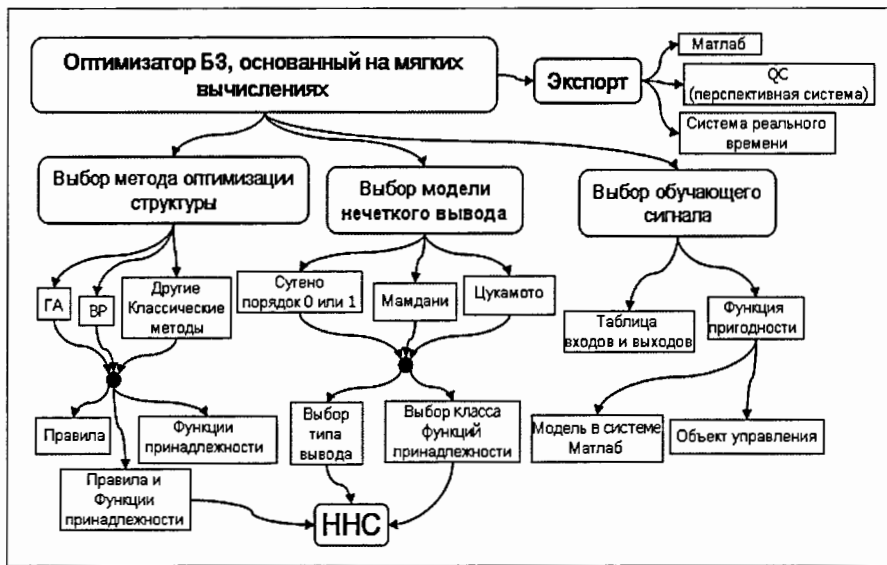


Рис. 2.34. Архитектура ОБЗ

2.5. Система стохастического нечеткого моделирования робастных ИСУ

Рассмотрим методологию объединенного стохастического и нечеткого моделирования САУ на основе ОБЗ с целью проверки робастности и оценки предельных, структурных возможностей ИСУ. Модели физических ОУ имеют следующие особенности: 1) обладают локальной и глобальной динамической неустойчивостью; 2) имеют существенно нелинейные перекрестные связи по обобщенным координатам, которые влияют на динамику и устойчивость ОУ; 3) работают в непредвиденных ситуациях управления. В качестве непредвиденных ситуаций управления рассматриваются модели управления в условиях неопределенности информации о внешних возмущениях или о параметрах ОУ, а также при наличии времени задержки в контурах управления и измерительной системы. В данном разделе приведены примеры промышленного применения робастных ИСУ в реальных ОУ. Даны практические рекомендации повышения уровня робастности ИСУ за счет использования новых видов вычислений и имитационного моделирования.

2.5.1. Методология стохастического нечеткого моделирования

Нечеткое моделирование робастных БЗ на основе ОБЗ основано на процессе извлечения информации за счет исследования индивидуальных информативных траекторий, описывающих динамическое поведение ОУ при воздействии на него 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, моделирующего внешнюю среду, должен быть представительной информативно значимой выборочной траекторией случайного процесса, позволяющего исследовать индивидуальные траектории 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 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 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. 2.35 приведена обобщенная структура системы стохастического нечеткого моделирования, которая использовалась для оценки робастности и предельных возможностей структур ИСУ моделями ОУ с указанием основных факторов, влияющих на чувствительность и надежность точности управления.

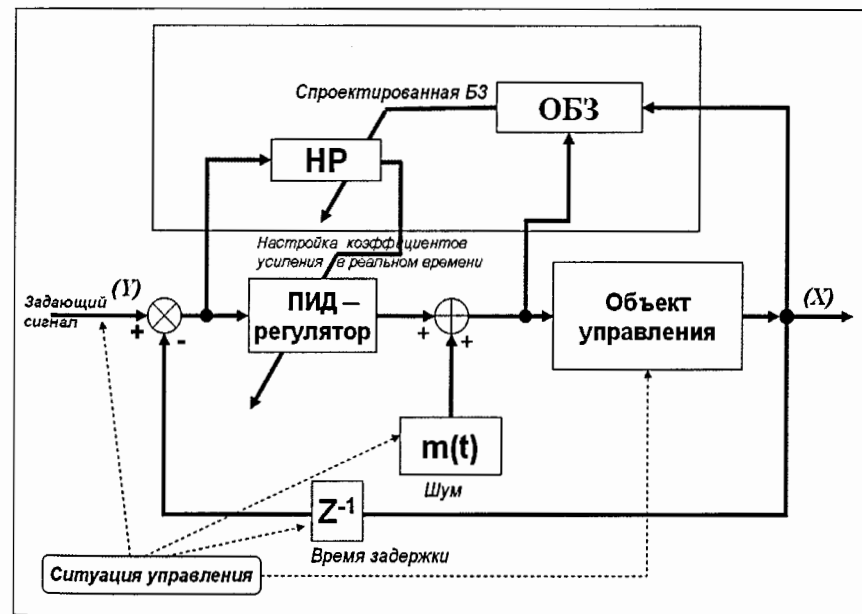


Рис. 2.35. Обобщенная система стохастического нечеткого моделирования с непредвиденными ситуациями управления

Моделирование разработанной модели ИСУ и ОУ осуществлялось в системе MATLAB/SIMULINK, показанной на рис. 2.36.

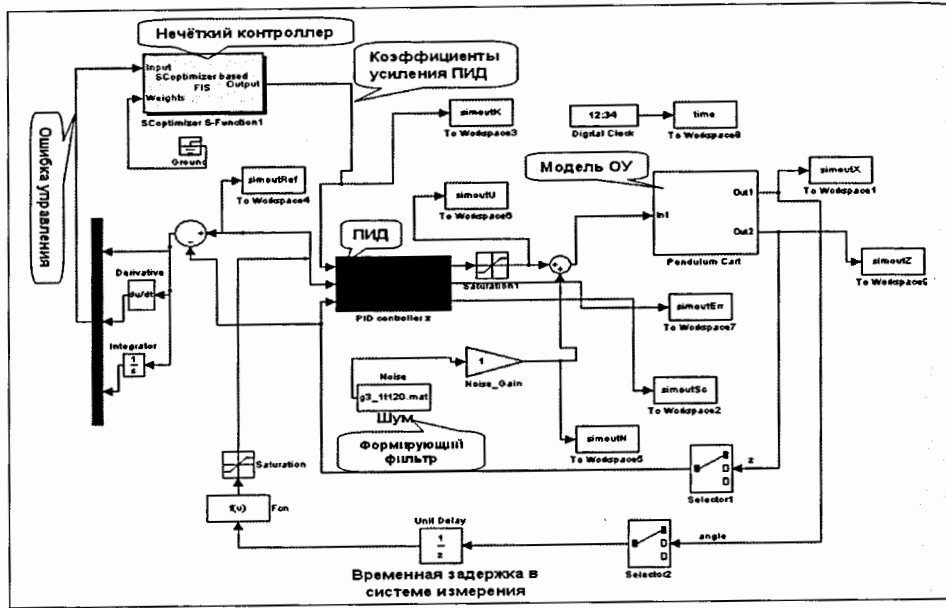


Рис. 2.36. Модель системы управления в MATLAB/SIMULINK

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 случайных процессов от соответствующих формирующих фильтров показаны на рис. 2.37.

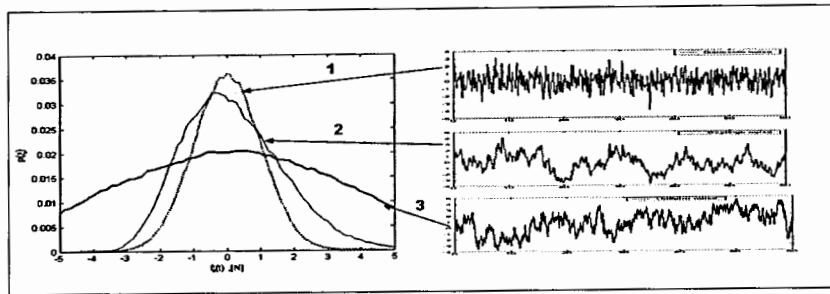


Рис. 2.37. Вид функций плотности распределения вероятностей и результаты моделирования выходных случайных процессов от соответствующих формирующих фильтров: 1 – гауссовский случайный процесс; 2 – рэлеевский случайный процесс; 3 – равномерно распределенный случайный процесс

Варируя структуру формирующих фильтров, параметры в моделях ОУ, время задержки в канале измерения ошибки управления, вид задающего сигнала (цель управления), можно моделировать непредвиденные ситуации управления и оценить 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 рассматриваются результаты моделирования динамического поведения типовых ОУ (Benchmarks): 1) перевернутый маятник, установленный на каретке перемещения и обладающий глобальной динамической неустойчивостью, и 2) существенно-нелинейный осциллятор, обладающий локальной и глобальной динамической неустойчивостью по части обобщенных перекрестных координат ОУ и представляющий собой самостоятельный интерес для задач робототехники и механики (например, стробоскопический робот-манипулятор со сложной нелинейной динамикой поведения).

2.5.2. Моделирование робастных законов управления для интеллектуальных нечетких ПИД-регуляторов на основе ОБЗ: сравнение с предшествующими поколениями САУ и ИСУ

Приведем сравнение результатов управления стохастическим движением ОУ, полученных на основе разработанной системы стохастического нечеткого моделирования. Рассмотрим для примера три варианта проектирования САУ: 1) на основе классических ПИД-регуляторов; 2) на основе традиционных мягких вычислений (с помощью структуры ННС, выбранной вручную, и метода построения БЗ на основе алгоритма обратного распространения ошибки (см. приложение) и 3) на основе разработанного инструментария ОБЗ.

Пример 3: Система “перевернутый маятник – каретка перемещения”. Математическая модель движения динамической системы “перевернутый маятник – каретка перемещения” описывается следующими уравнениями:

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{(u + \xi(t)) + \{a_1 \dot{z} + a_2 z\} - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m} \right) - k \dot{\theta}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}, \quad (2.13)$$

$$\ddot{z} = \frac{u + \xi(t) - \{a_1 \dot{z} + a_2 z\} + ml(\dot{\theta}^2 \sin \theta - \ddot{\theta} \cos \theta)}{m_c + m},$$

где g – ускорение свободного падения ($9,8 \text{ м/с}^2$); m_c – масса каретки, m – масса маятника; l – половина длины маятника; $\xi(t)$ – стохастическое воздействие и u – управляющая сила, действующая на каретку.

Уравнения для скорости производства энтропии в ОУ и ПИД-регуляторе имеют следующий вид:

$$\frac{d}{dt} S_{\theta} = \frac{k \dot{\theta}^2 + \frac{ml \dot{\theta}^3 \sin 2\theta}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}, \quad \frac{d}{dt} S_z = a_1 \dot{z}^2, \quad \frac{d}{dt} S_u = k_d \dot{e}^2 \quad (2.14)$$

соответственно.

Рассмотрим следующую задачу управления движением перевернутого маятника (ОУ).

Задача управления: При наличии рэлеевского стохастического шума (с несимметричной функцией распределения плотности вероятности), действующего на каретку, и при наличии времени задержки сигнала в системе измерения положения маятника (равного 0,001 с), перевести маятник из начального положения в целевое вертикальное ($\theta = 0$) и удерживать движение ОУ в заданном вертикальном положении.

Зададим следующие значения параметров:

$$m_c = 1; m = 0,1; l = 0,5; k = 0,4; a_1 = 0,1; a_2 = 5$$

и начального положения $[\theta_0; \dot{\theta}_0; z_0; \dot{z}_0] = [10; 0,1; 0; 0]$.

Введем также ограничение на силу управления: $-5,0 < u < 5,0 [N]$.

При наличии стохастических шумов, действующих на каретку, и при наличии времени задержки сигнала в системе измерения положения маятника традиционный ПИД-регулятор (с постоянными коэффициентами) так же, как и в предыдущем примере, не всегда справляется с вышеуказанной задачей управления. При значениях коэффициентов усиления ПИД-регулятора $K = [50; 50; 50]$ маятник падает.

Кроме того, определить вручную оптимальные коэффициенты усиления ПИД-регулятора для поддержания маятника в вертикальном положении является сложной комбинаторной задачей и не всегда под силу даже опытному проектировщику САУ.

Рассмотрим ИСУ, содержащую нечеткий ПИД-регулятор, управляющий движением маятника, с использованием разработанного инструментария ОБЗ. MATLAB/SIMULINK модель для разработанной ИСУ показана на рис. 2.35.

На первом шаге разработки ИСУ строится БЗ для заданной ситуации управления (так называемая обучающая ситуация), затем на следующем шаге проверяется робастность полученной БЗ в новых (непредвиденных) ситуациях управления.

На рис. 2.38 – 2.41 показаны результаты моделирования движения системы в двух случаях управления: 1) с помощью НР, БЗ которого была построена с использованием разработанного ОБЗ, и 2) с помощью классического ПИД-регулятора с коэффициентами усиления $K = [80; 15; 60]$, полученными усреднением коэффициентов усиления НР.

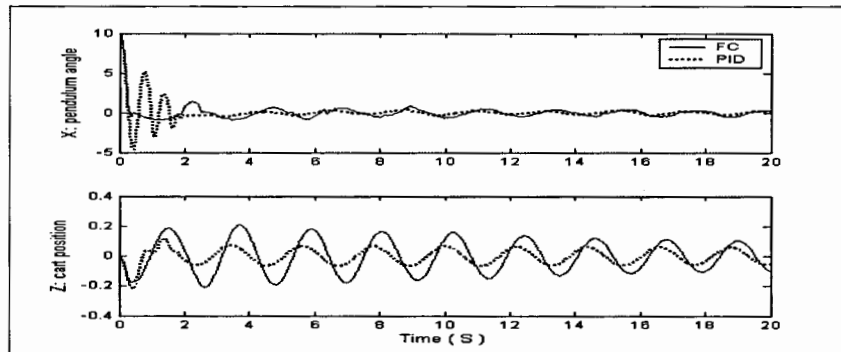


Рис. 2.38. Сравнение результатов моделирования управления ОУ с помощью НР (FC) и традиционного ПИД (PID)-регулятора

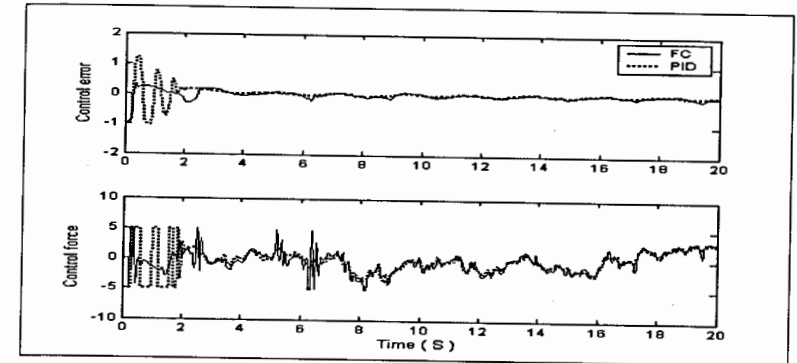


Рис. 2.39. Сравнение результатов моделирования управления ОУ с помощью НР (FC) и традиционного ПИД (PID)-регулятора

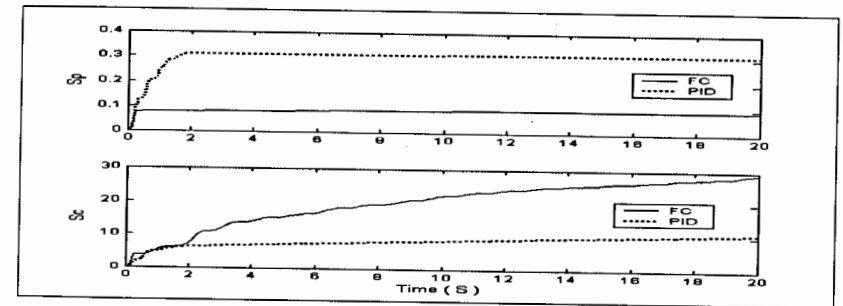


Рис. 2.40. Сравнение результатов моделирования производства энтропии в ОУ, НР (FC) и в традиционном ПИД (PID)-регуляторе

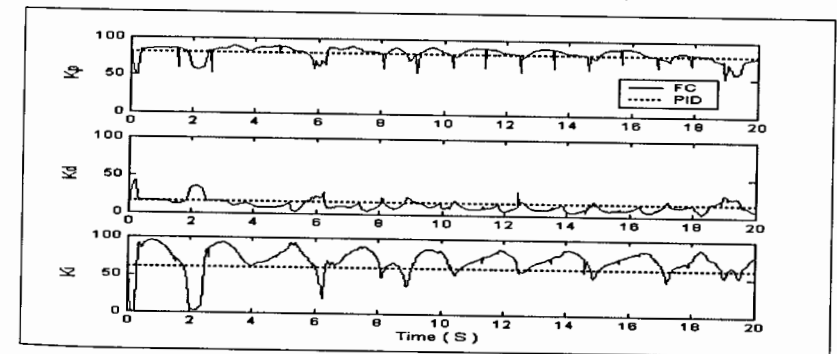


Рис. 2.41. Законы управления коэффициентами усиления нечеткого и усредненного ПИД (PID)-регулятора

Примечание. На рис. 2.38 – 2.41 использованы следующие обозначения: X – pendulum angle – угол отклонения маятника; Z – cart position – положение каретки; control error – ошибка управления; control force – управляющая сила; S_p – производство энтропии в ОУ; S_c – производство энтропии в регуляторе; K_p, K_D, K_I – коэффициенты усиления ПИД-регулятора соответственно.

Результаты моделирования показывают следующее. С точки зрения оптимизации САУ по критериям качества управления, таким как минимум ошибки управления, минимум производства энтропии в ОУ (т. е. минимум тепловых потерь, потерь полезной работы и энергии), а также с учетом ограничений на управляющую силу, ИСУ, спроектированная на основе ОБЗ, является эффективнее традиционных ПИД-регуляторов.

Исследование робастности построенной ИСУ. Исследуем теперь свойство робастности построенной БЗ НР, управляющего движением перевернутого маятника.

Рассмотрим задачу управления с новыми условиями, отличную от первоначальной задачи управления, для которой подбирался оптимальный обучающий сигнал, и сравним результаты моделирования.

Задача управления с новыми условиями:

- другой шум, воздействующий на ОУ: гауссовский шум;
- другое время задержки в системе измерения: 0,002 с.

На рис. 2.42 – 2.45 показаны результаты моделирования движения системы в новой (непредвиденной) ситуации управления. Сравнение дается для двух случаев управления: 1) с помощью НР, БЗ которого была построена с использованием разработанного ОБЗ, и 2) с помощью классического ПИД-регулятора с коэффициентами усиления $K = [80; 15; 60]$, полученными усреднением коэффициентов усиления НР.

В частности, на рис. 2.42 дано сравнение результатов движения маятника и каретки перемещения, на рис. 2.43 показано сравнение управляющей силы, на рис. 2.44 сравниваются термодинамические характеристики ОУ и регуляторов (потери полезной работы) в соответствии с уравнением (2.14) и на рис. 2.45 показаны законы управления коэффициентами усиления нечеткого и традиционного ПИД-регуляторов.

Результаты моделирования показывают: 1) построенная БЗ НР, управляющего движением перевернутого маятника, является *робастной*; 2) с точки зрения критериев качества управления, таких как минимум ошибки управления, минимум производства энтропии в ОУ и системе управления (т. е. минимум тепловых потерь и потерь полезной работы и энергии), а также с учетом минимума управляющей силы, разработанная ИСУ эффективнее традиционных ПИД-регуляторов.

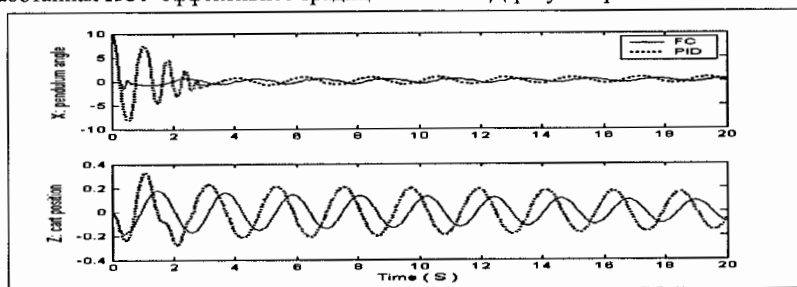


Рис. 2.42. Сравнение результатов моделирования управления ОУ с помощью НР (FC) и традиционного ПИД (PID)-регулятора (непредвиденная ситуация управления)

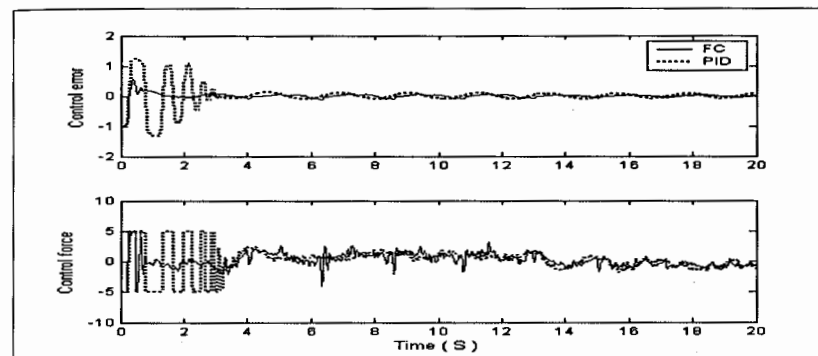


Рис. 2.43. Сравнение результатов моделирования управления ОУ с помощью НР (FC) и традиционного ПИД (PID)-регулятора (непредвиденная ситуация управления)

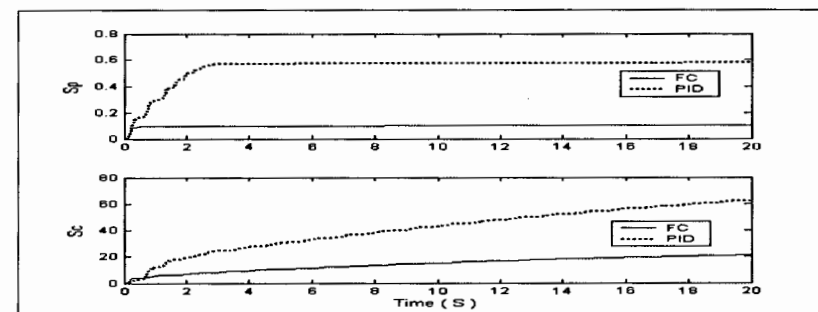


Рис. 2.44. Сравнение результатов моделирования производства энтропии в ОУ, НР (FC) и традиционном ПИД (PID)-регуляторе (непредвиденная ситуация управления)

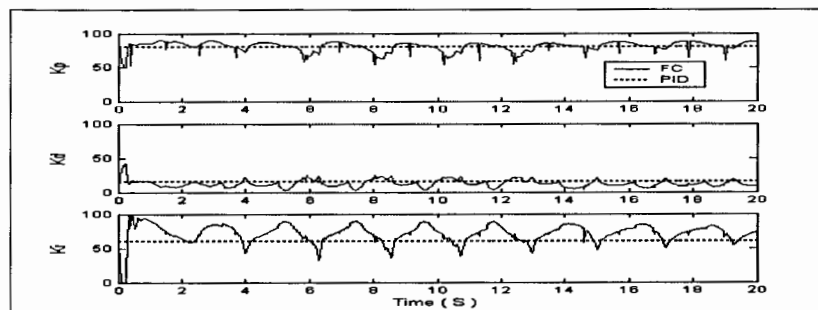


Рис. 2.45. Законы управления коэффициентами усиления нечеткого и усредненного ПИД (PID)-регуляторов (непредвиденная ситуация управления)

Пример 4: Маятник с переменной длиной. Уравнения движения маятника имеют вид

$$\begin{cases} \ddot{\theta} + 2\frac{\dot{l}}{l}\dot{\theta} + \frac{g}{l}\sin\theta = k'_p \cdot e_\theta + k'_d \cdot \dot{e}_\theta + k'_i \cdot \int e_\theta dt + \xi_1(t), \\ \ddot{l} + 2k\dot{l} - l\dot{\theta}^2 - g\cos\theta = \frac{1}{m}(k_p \cdot e_l + k_d \cdot \dot{e}_l + k_i \cdot \int e_l dt + \xi_2(t)), \end{cases} \quad (2.15)$$

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

$$\underbrace{\frac{dS_\theta}{dt} = 2\frac{\dot{\theta}}{l}\dot{\theta}; \quad \frac{dS_l}{dt} = 2k\dot{l} \cdot \dot{l}}_{\text{Объект управления}}; \quad \underbrace{\frac{dS_{\text{ПИД}(\theta)}}{dt} = k'_d \dot{e}_\theta^2; \quad \frac{dS_{\text{ПИД}(l)}}{dt} = k_i \dot{e}_l^2}_{\text{ПИД-регулятор}} \quad (2.16)$$

и рассматриваются совместно с уравнениями движения ОУ (2.15). Движение системы, описываемой (2.15), представляет собой глобально неустойчивую (по оси l) и локально неустойчивую (по оси θ) динамическую систему. При этом в модели (2.15) присутствуют перекрестные нелинейные связи, влияющие на локальную неустойчивость по обобщенной координате θ . Таким образом, модель (2.15) включает в себя локальную и глобальную неустойчивости по обобщенным координатам ОУ и является обобщением предыдущих моделей ОУ.

Замечание. Здесь и далее на рис. 2.46 – 2.50 используются следующие обозначения: X : angle ($\theta = x$) – угол; Y : length ($l = y$) – длина; Time (s) – время (секунды); Free motion – свободное движение; unstable motion – неустойчивое движение; PID – ПИД; FNN – ННС; SCO – ОБЗ; Refsignal – задающий сигнал.

Рассмотрим следующую задачу *позиционного управления*: при наличии рэлеевского стохастического шума (см. рис. 2.37, позиция 2), действующего на ОУ вдоль оси θ (максимальная амплитуда шума равна 10), а также при наличии гауссовского стохастического шума вдоль оси l (максимальная амплитуда шума равна 4) перевести маятник из начального положения в заданное положение (цель управления) и удерживать движение ОУ в заданном положении: $\theta_{ref} = 0,4$; $l_{ref} = 3,5$. Задачу управления конкретизируем 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 двух ПИД-регуляторов вдоль осей координат θ и l . В этом случае рассматривается задача *координационного* управления коэффициентами усиления двух ПИД-регуляторов, представляющая самостоятельный интерес для теории и систем управления [3, 4].

На рис. 2.46 – 2.50 показаны результаты моделирования управления движением системы в трех случаях управления: 1) с помощью двух классических ПИД-регуляторов (с коэффициентами усиления $K = \{6; 6; 6\}$), 2) на основе традиционных мягких вычислений (с помощью структуры ННС, выбранной вручную, и метода построения БЗ на основе алгоритма обратного распространения ошибки, см. приложение) и 3) на основе разработанного инструментария ОБЗ.

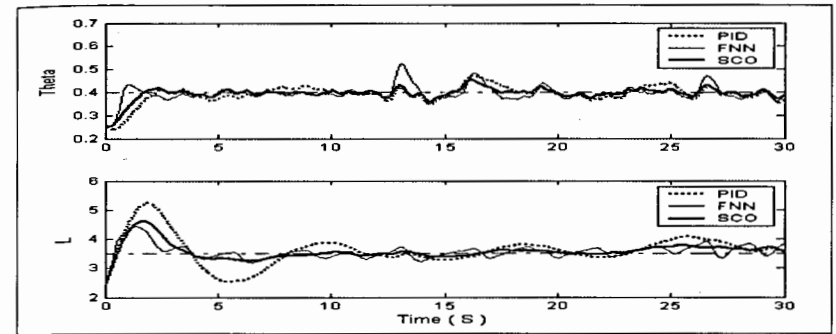


Рис. 2.46. Маятник с переменной длиной. Движение системы при стохастическом воздействии с тремя типами управления (ПИД, НР и ОБЗ)

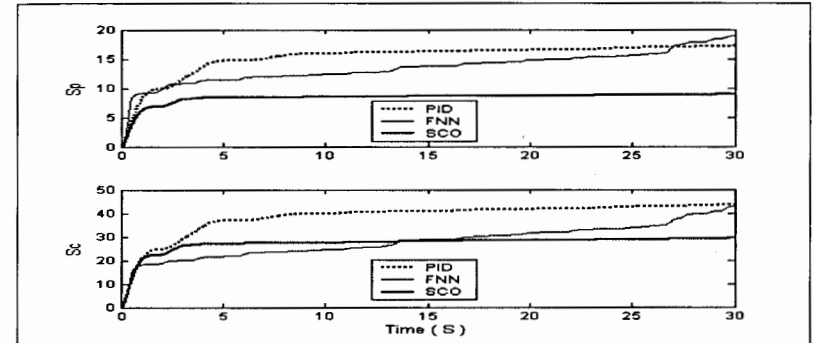


Рис. 2.47. Маятник с переменной длиной. Производство энтропии в объекте управления и в системе управления (ПИД, НР и ОБЗ)

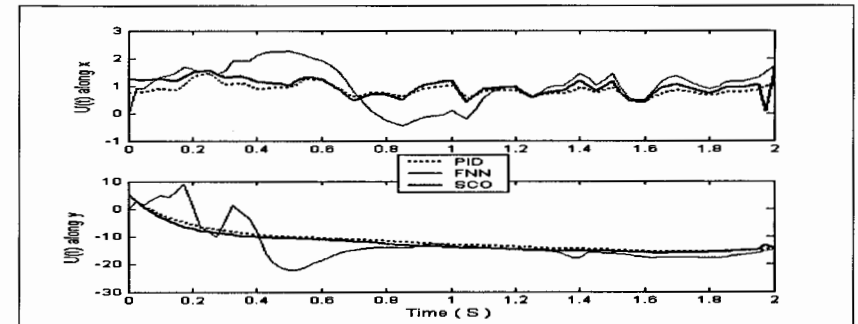


Рис.2.48. Маятник с переменной длиной. Сила управления по осям координат θ (x) и l (y)

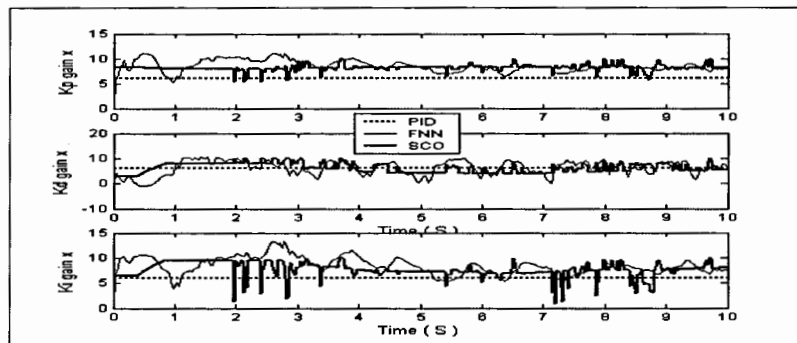


Рис. 2.49. Законы управления по оси координат θ (ПИД, НР и ОБЗ)

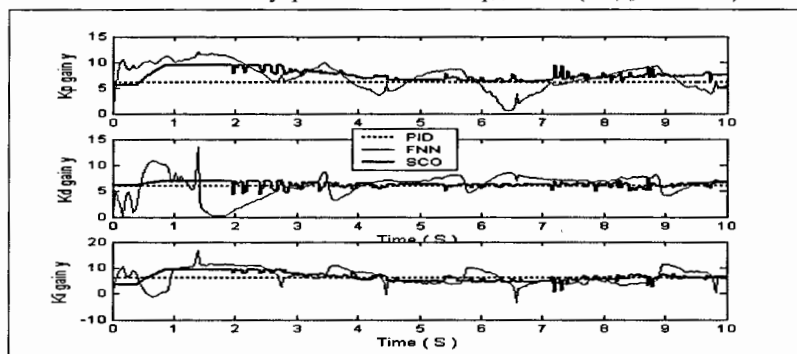


Рис. 2.50. Законы управления по оси координат l (ПИД, НР и ОБЗ)

Полученные для данного ОУ результаты моделирования позволяют сделать следующий вывод.

Разработанная на основе ОБЗ ИСУ является более эффективной, чем ИСУ, разработанная с помощью традиционных мягких вычислений, а также эффективнее традиционных 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 с минимальной сложностью.

Исследование робастности ИСУ. Исследуем теперь свойство робастности построенных БЗ для трех вышеприведенных случаев управления. Рассмотрим задачу управления с новыми условиями (непредвиденная ситуация управления), отличную от первоначальной задачи управления, для которой подбирали оптимальный обучающий сигнал (ОС), и сравним результаты моделирования для трех указанных случаев управления.

Задача управления с новыми условиями 1:

- новое начальное положение ОУ $[-0,52 (-30^\circ), 2,5] [0,01, 0]$;
- новые задающие сигналы $\theta_{ref} = 0,78 (45^\circ); l_{ref} = 5$;
- другие шумы, воздействующие на ОУ:

- гауссовский шум вдоль оси θ (максимальная амплитуда шума равна 1,5),
- рэлеевский шум вдоль оси l (максимальная амплитуда шума равна 1).

На рис. 2.51 – 2.56 показаны результаты моделирования управления движением системы в трех случаях управления в новых условиях.

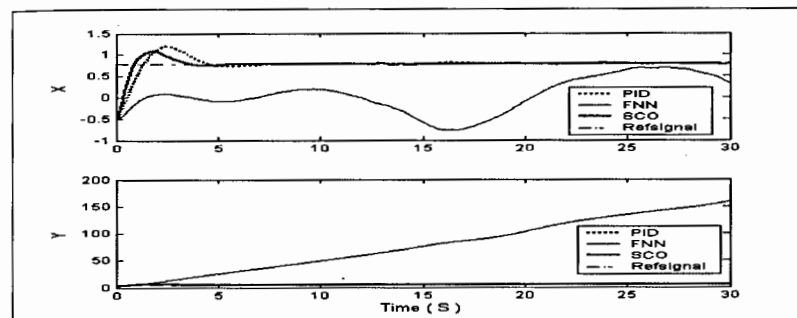


Рис. 2.51. Маятник с переменной длиной. Движение системы при стохастическом воздействии с тремя типами управления (ПИД, НР и ОБЗ). (Новая ситуация управления)

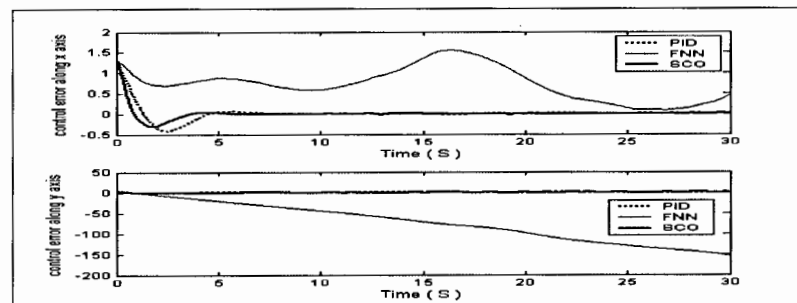


Рис. 2.52. Маятник с переменной длиной. Ошибка управления. (Новая ситуация управления)

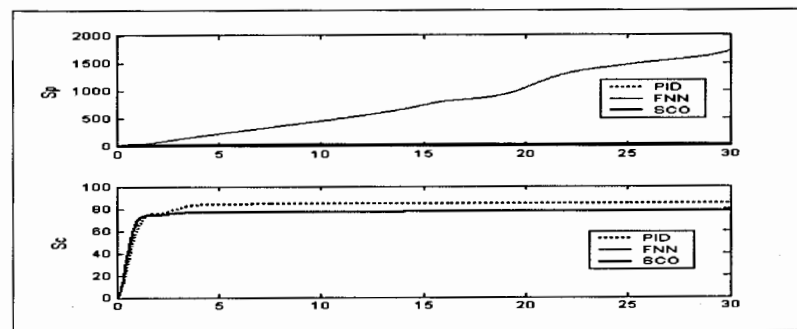


Рис. 2.53. Маятник с переменной длиной. Производство энтропии в объекте управления и в системе управления. (Новая ситуация управления)

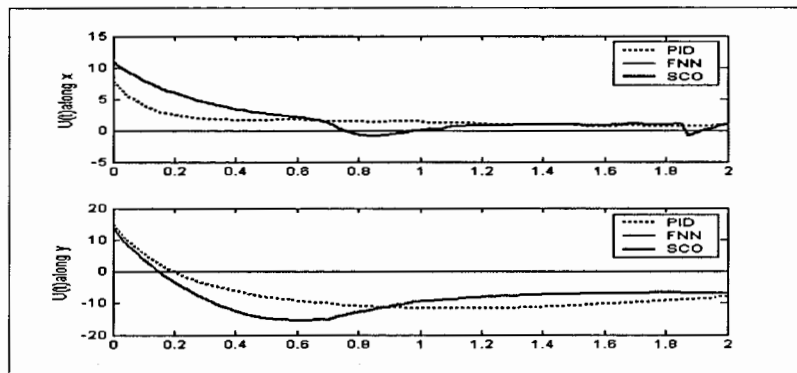


Рис. 2.54. Маятник с переменной длиной. Сила управления по осям координат θ (x) и l (y). (Новая ситуация управления)

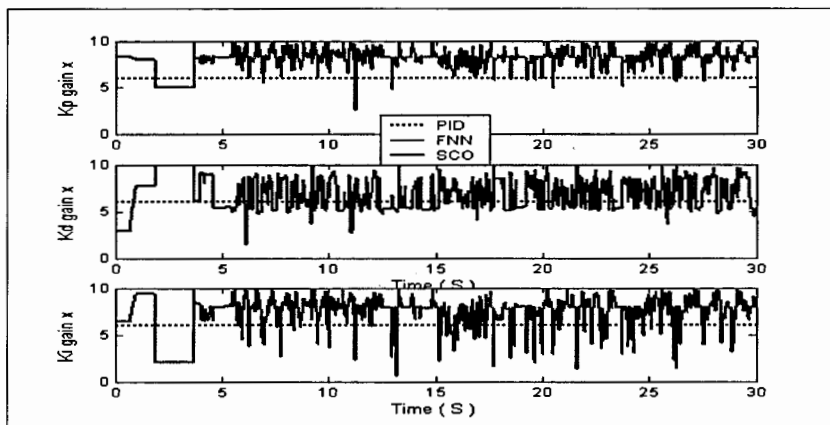


Рис. 2.55. Законы управления по оси координат θ . (Новая ситуация управления)

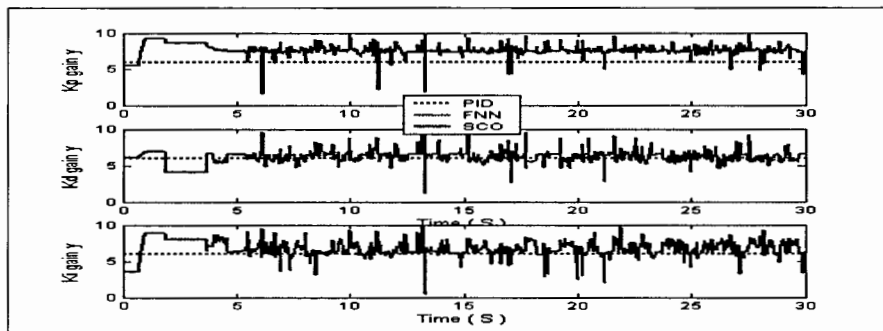


Рис. 2.56. Законы управления по оси координат l . (Новая ситуация управления)

Примечание. На рис. 2.54 – 2.57 управляющая сила и коэффициенты усиления нечеткого ПИД-регулятора, основанного на традиционном методе мягких вычислений, равны нулю. Это означает, что спроектированная с помощью ННС БЗ НК не робастна, т. е. для новых начальных данных в БЗ нет ни одного активируемого правила.

Результаты моделирования показывают, что ИСУ, спроектированная на основе ННС, не справляется с новой ситуацией управления.

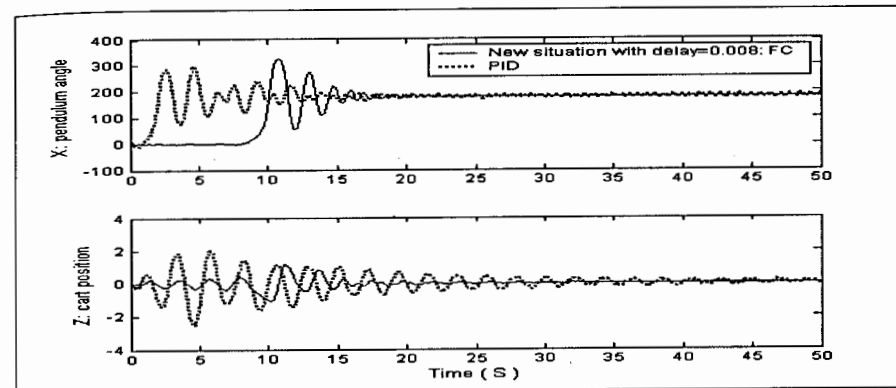


Рис. 2.57. Неустойчивое динамическое поведение ОУ в виде системы «перевернутый маятник - каретка» в новой непредвиденной ситуации управления (увеличено время задержки до 0,008 с)

Анализ полученных результатов моделирования позволяет сделать следующий вывод.

БЗ ИСУ, разработанная с помощью традиционных мягких вычислений, не является робастной. БЗ ИСУ, разработанная с помощью ОБЗ, робастна и эффективна с точки зрения заданного критерия качества управления.

2.6. 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 физический маятник без математической модели, полуактивная подвеска автомобиля, управление навигацией робота-мотоцикла, управление двигателем внутреннего сгорания [8 - 10] и др. Пример интеллектуального управления физическим экспериментом на примере автономного робота как физического прототипа модели «перевернутый маятник - каретка» рассмотрен ниже в главе 4.

Проведенные испытания показывали высокую эффективность работы ОБЗ на мягких вычислениях как на ОУ с моделью, так и с использованием экспериментальных данных, полученных с физической модели ОУ.

Нами исследованы и показаны большие возможности разработанного инструментария ОБЗ в разработке робастных БЗ ИСУ для широкого класса ситуаций управления.

Однако данный метод (см. рис. 2.34) также имеет свои ограничения, что заставляет вводить новые методы и виды вычислений (квантовые вычисления и квантовый нечеткий вывод) в инструментарий квантового ОБЗ.

Заключение

Результаты моделирования показывают 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, спроектированных на основе традиционного инструментария мягких вычислений. Разработанный метод также 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.

На основе разработанного инструментария ОБЗ рассмотрены актуальные задачи формирования БЗ для проектирования робастных НР. Решение поставленной задачи позволило рассмотреть задачу координационного управления коэффициентами усиления двух ПИД-регуляторов, представляющую самостоятельный интерес для теории и систем управления. Использование инструментария ОБЗ позволяет одновременно реализовать процесс проектирования робастных БЗ на основе алгоритмов обучения и адаптации, проводя первый этап информационной технологии проектирования робастных ИСУ.

Рекомендуемая литература к главе 2

1. Литвинцева Л.В., Панфилов С.А., Ульянов С.В. и др. Построение робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. ТИСУ. 2006. № 4.
2. Кураваки И., Литвинцева Л.В. и др. Построение робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно нелинейными динамическими системами. Ч. I // Изв. РАН. ТИСУ. 2004. № 4.
3. Ponce-Cruz P., Ramirez-Figueroa F.D. Intelligent control systems with Lab VIEW™. Berlin: Springer Verlag, 2010.
4. Ulyanov S.V. System for intelligent control based on soft computing. US patent No. 6, 415, 272. 1998.
5. Петров Г.М., Уланов Г.М., Ульянов С.В. Динамические системы со случайной и нечеткой структурами // Итоги науки и техники (ИНИТ). Сер. Техническая кибернетика. М.: Наука, 1979. С. 3 – 76.
6. Perroud M., Saucier A. Thermodynamics of dissipative systems // Helvetica Physica. 1987. V. 60. No. 8. P. 1038-1051.
7. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. и др. Программная поддержка процессов проектирования робастных баз знаний нечетких регуляторов. // Программные продукты и системы. 2004. № 4.
8. Ulyanov S.V., Hagiwara T. et al. Intelligent mechatronic control suspension system based on soft computing. US patent No. 6, 701, 236 B. 2001.

9. Fujii S., Watanabe H., Panfilov S.A. et al. Intelligent robust control system for motorcycle using soft computing optimizer. US patent No. 20050197994 A1. 2005.
10. Ulyanov S.V., Hashimoto S., Yamaguchi M. System for intelligent control of an engine based on soft computing. US patent No. 6, 609, 060 B1. 2001.
11. Ulyanov S.V., Feng M., Yamafuji K. et al. Stochastic analysis of time-variant nonlinear dynamic systems. Pt. 1: the Fokker-Planck-Kolmogorov equation approach in stochastic mechanics // Prob. Engn. Mech. 1998. V. 13, No. 3.
12. Cai G.Q., Wu C. Modeling of bounded stochastic processes // Prob. Engn. Mech. 2004. V. 19, No. 3.
13. Николаенко Н.А., Ульянов С.В. Статистическая динамика машиностроительных конструкций. М.: Машиностроение, 1977.

Глава 3. Эффективность инструментария проектирования интеллектуальных систем управления: сравнение ОБЗ с ANFIS и AFM

Рассматривается проблема оценки эффективности представленного в главе 2 инструментария – оптимизатора баз знаний (ОБЗ) на мягких вычислениях – и сравнение с известными инструментариями проектирования ИСУ типа ANFIS и AFM. Показано явное преимущество инструментария ОБЗ на мягких вычислениях перед инструментарием MATLAB и другими инструментариями проектирования робастных БЗ в процессах обучения и адаптации ИСУ сложными нелинейными ОУ в непредвиденных (нештатных) ситуациях.

3.1. Описание проблемы и постановка задач

Эффективное применение технологии мягких вычислений в задачах управления зависит от решения следующих задач:

- объективное (независимое от субъективизма эксперта) определение вида, количества функций принадлежности и их параметров в правилах БЗ;
- автоматическое определение оптимальной структуры ННС в задачах аппроксимации обучающего сигнала с требуемой ошибкой;
- обучение, адаптация и оптимизация БЗ на ННС;
- автоматическое определение необходимого и достаточного числа продукционных правил для формирования структуры продукционных правил НР как универсального аппроксиматора нечетких систем управления.

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе ОБЗ (см. главу 2) с применением технологии мягких вычислений и стохастического моделирования. В данной главе 3 рассматриваются примеры проектирования БЗ в НР для управления нелинейными ОУ.

Показано, что НР, спроектированные на традиционных инструментариях мягких вычислений, в которых структура ННС строится вручную экспертом, уступают в качестве управления и робастности НР, построенных на основе ОБЗ.

В качестве сравнения традиционных инструментариев на мягких вычислениях выбраны: Adaptive Fuzzy Modeler (AFM, ST Microelectronics) и ANFIS (*Adaptive-Neuro-Fuzzy Inference Systems*), встроенный в модуль MATLAB.

В разделе 3.2 приведено сравнение результатов моделирования на основе двух инструментариев для построения БЗ НР: инструментарий AFM и ОБЗ. В разделе 3.5 приводится сравнение результатов моделирования на основе инструментария ANFIS и ОБЗ.

Рассмотрены основные типы нелинейных ОУ: существенно нелинейные динамические системы с локальной неустойчивостью, глобально неустойчивые и неустойчивые по части обобщенных координат ОУ.

Прежде чем перейти к описанию примеров моделирования, отметим еще раз следующие ключевые моменты и результаты применения технологии мягких вычисления в проектировании ИСУ на основе БЗ в НР:

- коэффициенты усиления ПИД-регуляторов являются переменными во времени и описываются в форме законов управления;
- законы управления формируются на основе БЗ нечеткого ПИД-регулятора;
- ГА включает сложные функции пригодности, отражающие динамические, термодинамические и информационные критерии управления, которые используются для построения обучающего сигнала управления;

- автоматическое проектирование оптимальной структуры ННС;
- аппроксимация обучающего сигнала происходит на основе ННС;
- оптимизация БЗ осуществляется как на основе метода обратного распространения ошибки, так и на основе ГА со сложными (векторными) критериями качества управления.

Рассмотрим пример существенно нелинейных динамических ОУ с локальной неустойчивостью.

3.2. Нелинейный осциллятор с существенной диссипацией и локальной динамической неустойчивостью (пример 1)

Поведение рассматриваемого ОУ описывается в виде

$$\ddot{x} + [2\beta + \alpha x^2 + k_1 x^2 - 1]\dot{x} + kx = \xi(t) + u(t). \quad (3.1)$$

Уравнения для скорости производства энтропии вычисляются как

$$\frac{dS}{dt} = [2\beta + \alpha x^2 + k_1 x^2 - 1]\dot{x} \cdot \dot{x}, \quad (3.2)$$

где $\xi(t)$ – внешнее стохастическое воздействие на ОУ с заданной функцией плотности распределения случайной величины, $u(t)$ – управляющая сила и S – производство энтропии заданного динамического ОУ; α, β, k, k_1 – параметры модели.

Примечание. Физической (реологической) моделью ОУ (рис. 3.1), описанной уравнениями (3.1), является механическая часть подвески движущегося объекта (автомобиля, мотоцикла, вагона и т. п.) с повышенной нелинейной диссипацией для повышения эффекта гашения (компенсации) колебаний движущегося объекта, которая описывается обобщенным уравнением типа Дuffинга - Ван дер Поля - Халмоша - Рендэра.

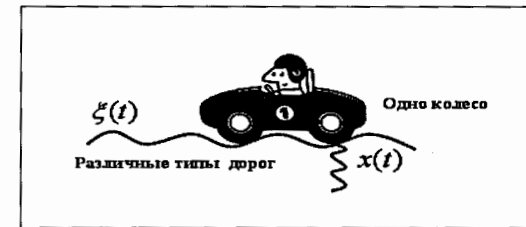


Рис. 3.1. Иллюстрация объекта управления

При малых колебаниях система (3.1) является локально неустойчивой, т. е. $[2\beta + \alpha x^2 + k_1 x^2 - 1] < 0$ и скорость производства энтропии в силу (3.2) может быть на конечном отрезке времени величиной отрицательной, т. е. $\frac{dS}{dt} \leq 0$, что создает трудности управления данной системой при задающем сигнале (цели управления) типа $x = 0$ и наличии малых случайных возмущений.

Задача управления: минимизировать вибрацию колеса ($x = 0$) на различных типах дорог (внешние стохастические шумы, действующие на динамический ОУ).

Рассмотрим задачу проектирования ИСУ, решающую поставленную задачу управления. Начнем с шагов, описанных в главе 1.

■ *Исследование свободного и стохастического движения ОУ.* На первом шаге исследуем свободное движение ОУ, его динамическое и термодинамическое поведение при различных начальных данных и различных параметрах модели в отсутствие внешних воздействий. Рассмотрим следующие параметры математической модели:

$$\beta = \{0, 1; -0, 1; 0, 5\}; \alpha = 0, 3; k_1 = 0, 2; k = 5,$$

а также следующие начальные данные: $[x_0][\dot{x}_0] = [2, 5][0, 1]$.

На рис. 3.2 показано свободное движение ОУ при разных значениях параметра β и его термодинамическое поведение.

Динамическая система, описываемая уравнениями (3.1), проявляет различное динамическое поведение в зависимости от параметра β .

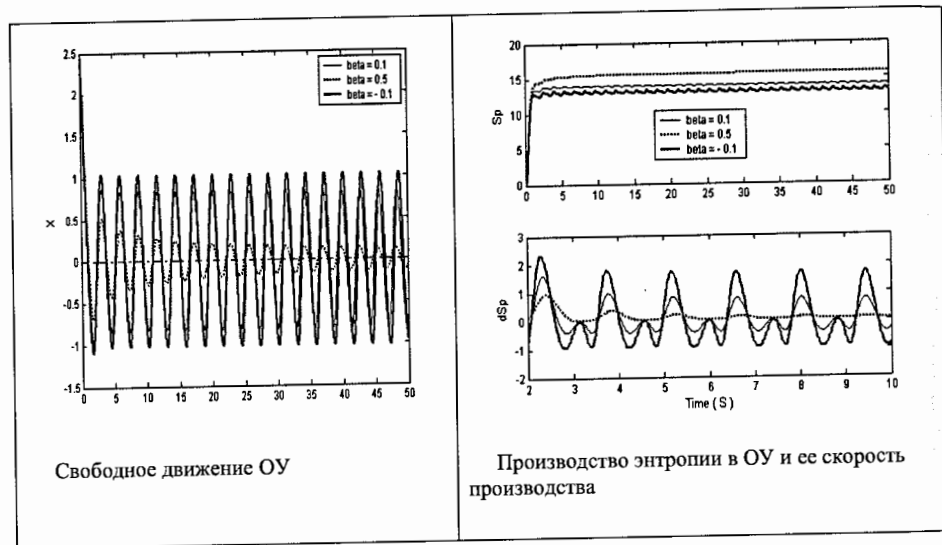


Рис. 3.2. Динамическое и термодинамическое поведение ОУ

Из результатов моделирования производства энтропии (рис. 3.2, справа) видно, что при значениях параметра $\beta = 0, 1$ и $\beta = -0, 1$ скорость производства энтропии имеет области отрицательных значений, т. е. $ds/dt \leq 0$.

Поэтому делаем следующий вывод: ОУ локально неустойчив по Ляпунову.

При $\beta > 0, 1$ движение ОУ является асимптотически устойчивым.

Рассмотрим вначале более простые ситуации управления.

■ *Управление в обучающей ситуации управления (в условиях отсутствия времени задержки в каналах измерения и отсутствия ограничений на силу управления).* Опишем типовую (обучающую) ситуацию для проектирования ОС. Параметры модели: $\beta = 0, 5; \alpha = 0, 3; k_1 = 0, 2; k = 5$. Начальные данные: $[2, 5][0, 1]$. Задающий сигнал: $x_{ref} = 0$.

Внешний шум рэлеевский (рис. 3.3).

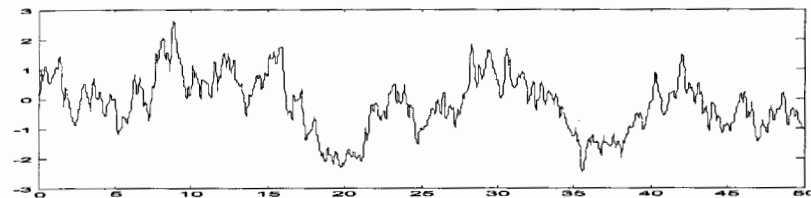


Рис. 3.3. Рэлеевский шум

■ *Проектирование интеллектуального управления.* Выберем в качестве ИСУ нечеткий ПИД-регулятор (далее просто НР). Будем строить НР с тремя входными и тремя выходными переменными. Общая структура ИСУ на основе НР показана на рис. 3.4.

Входом являются три переменные: $\{e, \dot{e}, \int e dt\}$, выходом являются также три переменные: коэффициенты усиления ПИД-регулятора $\{K_p, K_d, K_i\}$. Рассмотрим основные шаги проектирования нечеткого ПИД-регулятора.

1. *Определение пространства поиска коэффициентов усиления ПИД-регулятора.* Модель MATLAB/SIMULINK системы управления ОУ на основе ПИД-регулятора показана на рис. 3.5. Из результатов моделирования на основе классического ПИД-управления определим пространство значений коэффициентов усиления $K = [K_p, K_d, K_i]$ для заданного ОУ. Зададим область поиска $[0, 10]$ для всех трех коэффициентов усиления.

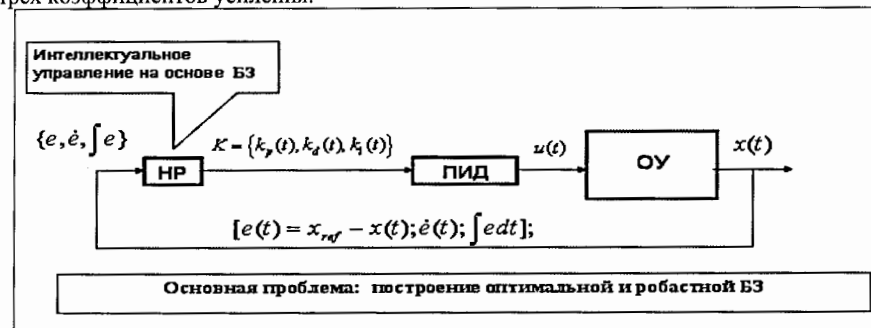


Рис. 3.4. Структура ИСУ

2. *Построение обучающего сигнала.* Для заданной типовой ситуации с помощью ГА, выбранной функции пригодности и выбранной области поиска для значений K находим близкое к оптимуму решение по управлению $K(t_i) = [K_p(t_i), K_d(t_i), K_i(t_i)]$, где t_i – моменты времени управления. Функция пригодности описывает выбранный физический критерий оптимизации; выберем основной критерий управления – *минимум ошибки управления и минимум скорости ошибки управления*. Область поиска для трех коэффициентов усиления $[0, 10]$.

На рис. 3.6 показано сравнение движения ОУ под управлением ПИД-регулятора с переменными коэффициентами усиления, найденными на основе ГА, и классического ПИД-регулятора с постоянными коэффициентами усиления $K = [10, 10, 10]$.

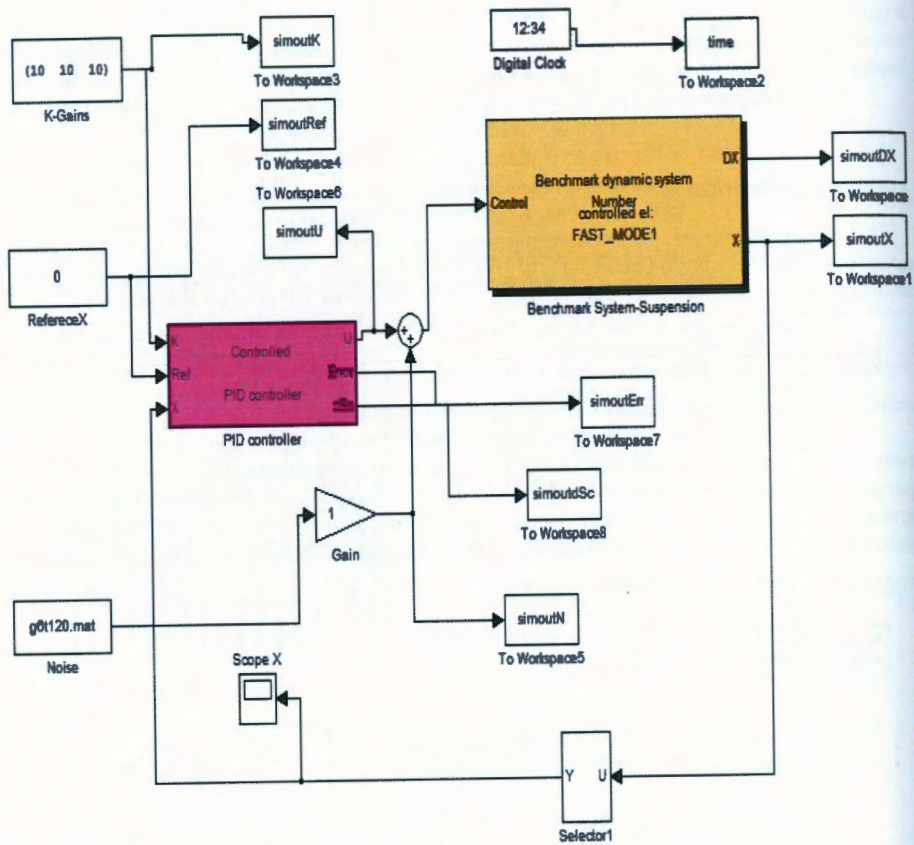


Рис. 3.5. Модель MATLAB/SIMULINK системы управления с ПИД-регулятором

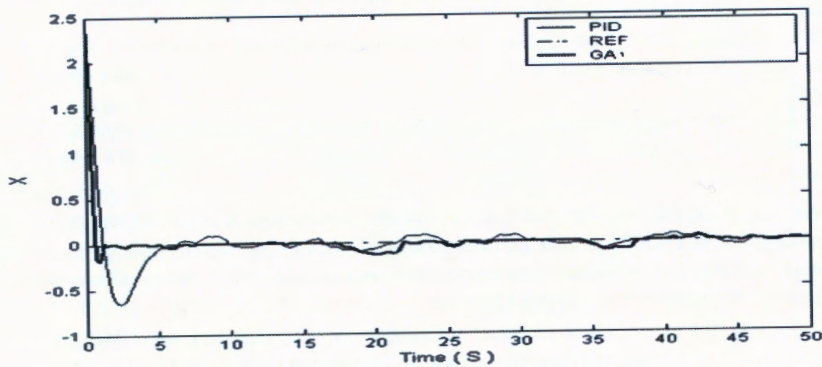


Рис. 3.6. Движение ОУ при ГА и ПИД-управлении

Примечание. На рис. 3.6 «PID» означает ПИД, «GA» означает ГА, «REF» означает задающий сигнал. Жирной линией обозначено движение ОУ под ГА-ПИД-управлением, тонкой линией – движение ОУ при традиционном ПИД-управлении.

Из результатов моделирования видно, что качество управления (минимум ошибки управления) ГА-ПИД-регулятора выше, чем при классическом ПИД-управлении (время и амплитуда перерегулирования при применении ГА в пять раз меньше, чем при применении ПИД-регулятора).

Выходом данного этапа моделирования является ОС, представляющий собой таблицу 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 является ошибка управления, ее производная и интеграл соответственно в момент времени t_i (шаг управления), а $K(t_i) = \{K_p(t_i), K_d(t_i), K_i(t_i)\}$ – коэффициенты усиления ПИД-регулятора.

3. Построение нечеткой нейронной сети. Обучающий сигнал поступает на вход следующего этапа: его аппроксимации некоторой выбранной структурой ННС, представляющей собой нечеткий регулятор, и его БЗ. Входом ННС являются три переменные: $\{e, \dot{e}, \int edt\}$, а выходом являются также три переменные: $\{K_p, K_d, K_i\}$.

Примечание. Напомним тип нечетких правил в выбранной модели Сугено 0. Само нечеткое (продукционное) правило в БЗ выглядит следующим образом (см. главу 2):

ЕСЛИ $e \in A_i$ и $\dot{e} \in B_j$ и $\int edt \in C_k$, ТО $K_p = D_{ijk}, K_d = E_{ijk}, K_i = F_{ijk}$,

где A_i, B_j, C_k – функции принадлежности, описывающие ошибку управления e , ее скорость \dot{e} и интеграл $\int edt$. Конечный результат нечеткого вывода в заданной БЗ вычисляется по следующим формулам:

$$K_p = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} D_{ijk} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)}; \quad K_d = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} E_{ijk} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)};$$

$$K_i = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} F_{ijk} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)}, \quad (3.3)$$

где $\omega_{ijk} = A_i(e) \cdot B_j(\dot{e}) \cdot C_k(\int edt)$, а « \cdot » – символ операции нечеткого умножения.

На рис. 3.7 показан пример ННС, реализующий модель нечеткого вывода Сугено 0.

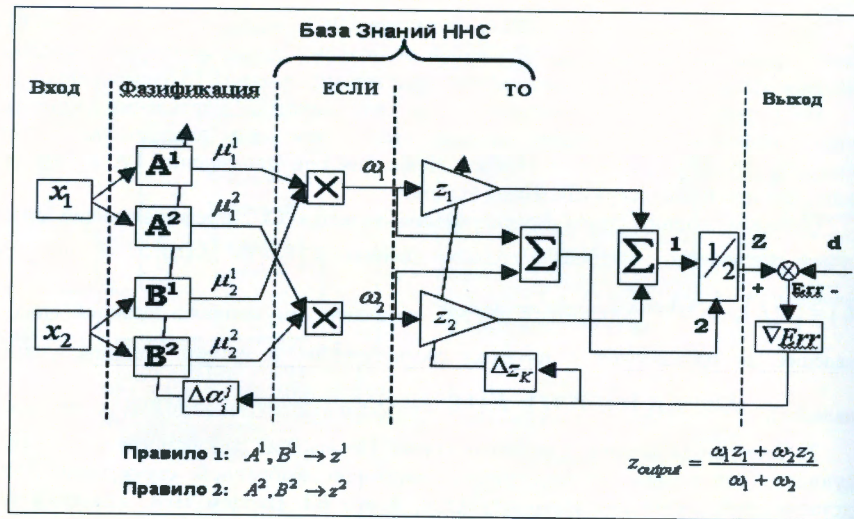


Рис. 3.7. ННС, реализующая модель вывода Сугено 0

3.3. Сравнение эффективности ОБЗ и AFM (пример 1)

Рассмотрим сравнение результатов моделирования на основе двух инструментариев для построения БЗ НР: Adaptive Fuzzy Modeler (AFM) и ОБЗ на мягких вычислениях.

■ *Построение нечеткой нейронной сети на основе инструментария AFM.* В инструментарии AFM левая часть правил строится на основе обучающего сигнала, задаваемого вручную, т. е. с помощью пользователя. Правая часть правил строится на основе обучения ННС с помощью алгоритма обратного распространения ошибки (см. главу 2).

Процесс построения БЗ на основе инструментария AFM для заданного ОУ описывается следующим образом:

- выбор «вручную» числа функций принадлежности для каждой входной переменной: 5;
- полное число нечетких правил: $5 \times 5 \times 5 = 125$;
- число активированных правил: 123.

На рис. 3.8 показано AFM-представление функций принадлежности для входных переменных.

■ *Построение нечеткой нейронной сети на основе ОБЗ.* Как отмечалось, основным недостатком традиционных средств (в том числе и AFM), основанных на мягких вычислениях, является следующее: количество, тип и параметры функций принадлежности для описания входных/выходных переменных вводятся пользователем.

ОБЗ позволяет автоматически находить количество, тип и параметры функций принадлежности, т. е. находить *оптимальную структуру* ННС.

Для рассматриваемого примера процесс построения БЗ на основе ОБЗ-инструментария описывается следующим образом:

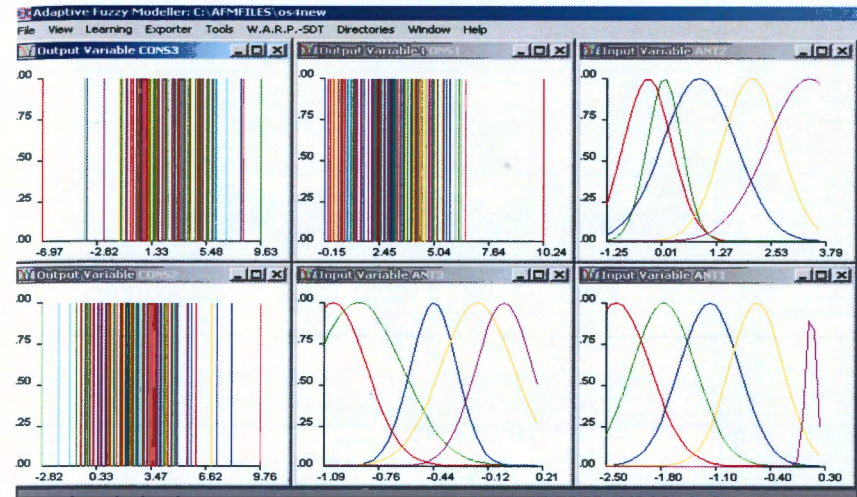


Рис. 3.8. AFM-представление функций принадлежности для входных переменных

- *создание лингвистических переменных с помощью GA₁*: число функций принадлежности для каждой входной переменной равно 6, 8, 9;
- полное число нечетких правил: $6 \times 8 \times 9 = 432$;
- *отбор правил (редукция избыточности)*: с помощью «суммарного» критерия получаемая БЗ состоит из 64 правил; с помощью «максимального» критерия получаемая БЗ состоит из 31 правила;
- *оптимизация БЗ* осуществляется с помощью GA₂;
- *обучение БЗ* осуществляется с помощью алгоритма обратного распространения ошибки;
- *тонкая настройка БЗ* осуществляется с помощью GA₃.

В зависимости от выбранного критерия отбора мы построили две базы знаний: базу знаний 1 (БЗ1) с 64 правилами и базу знаний 2 (БЗ2) с 31 правилом.

На рис. 3.9 показано представление функций принадлежности для входных переменных. На рис. 3.10, а и 3.10, б показаны структуры БЗ1 (или ННС 1) и БЗ2 (ННС 2) в инструментарии ОБЗ.

Примечание. На рис. 3.10, а и 3.10, б внизу зеленым цветом показаны обучающие сигналы, сигнал синего цвета представляет его аппроксимацию с помощью спроектированной структуры ННС.

■ *Сравнение результатов моделирования качества управления НР с БЗ1, НР с БЗ2 и классическим ПИД-регулятором.* Рассмотрим результаты моделирования движения данного ОУ в обучающей ситуации под управлением НР с выбранными БЗ и сравним с классическим ПИД-управлением.

На рис. 3.11, а показано динамическое поведение ОУ под управлением двух типов: НР с БЗ1 (64 правила) и ПИД-регулятора с коэффициентами усиления $K = [8, 6, 5]$, равными средним значениям от коэффициентов НР с выбранной БЗ1.

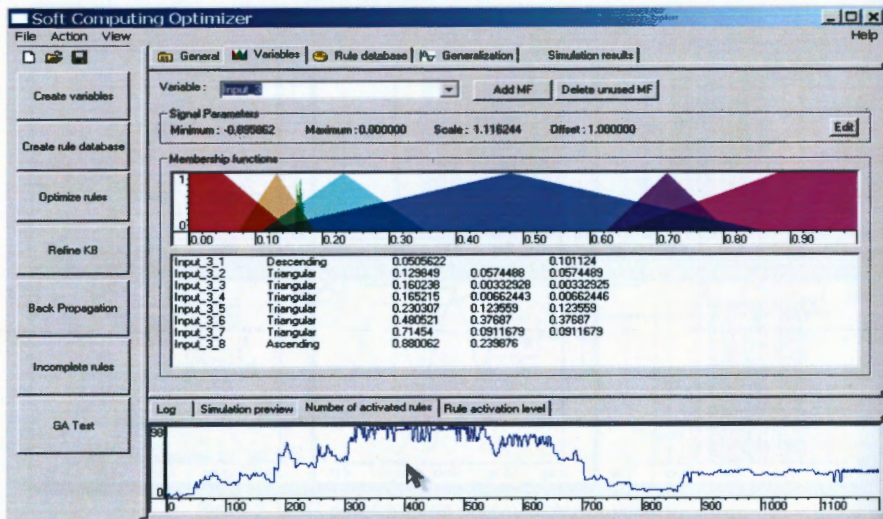


Рис. 3.9. ОБЗ-представление функций принадлежности для входных переменных

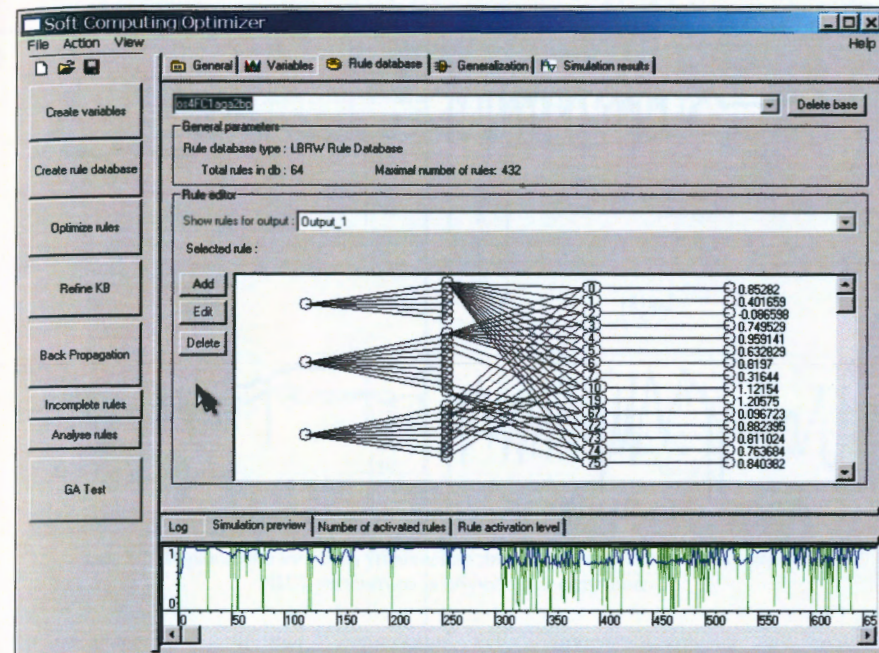


Рис. 3.10,б. База знаний 2 (БЗ2) с 31 правилом

Примечание. На рис. 3.11 «PID» обозначает ПИД, «SCO» – ОБЗ, «Ref» (от англ. Reference signal) означает задающий сигнал.

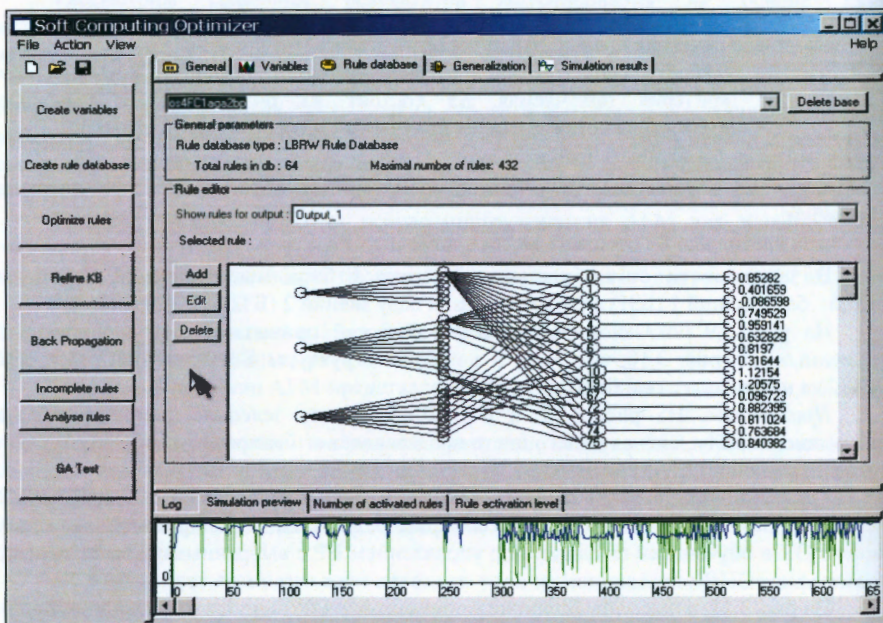


Рис. 3.10,а. База знаний 1 (БЗ1) с 64 правилами

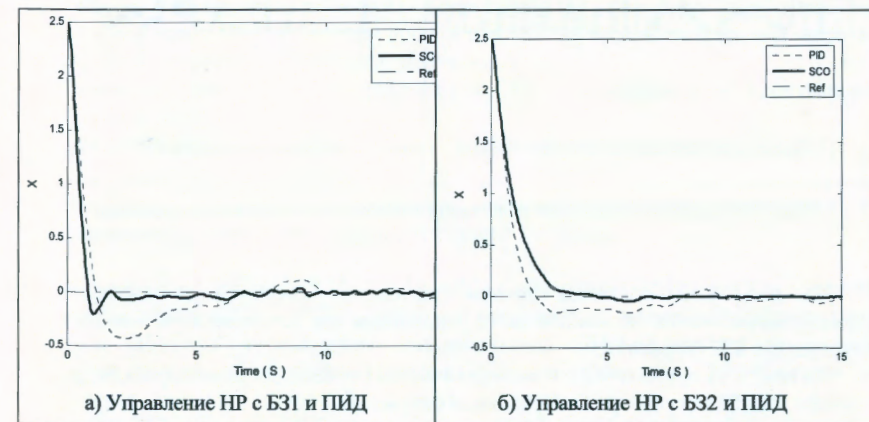


Рис. 3.11. Движение осциллятора в обучающей ситуации при двух типах управления

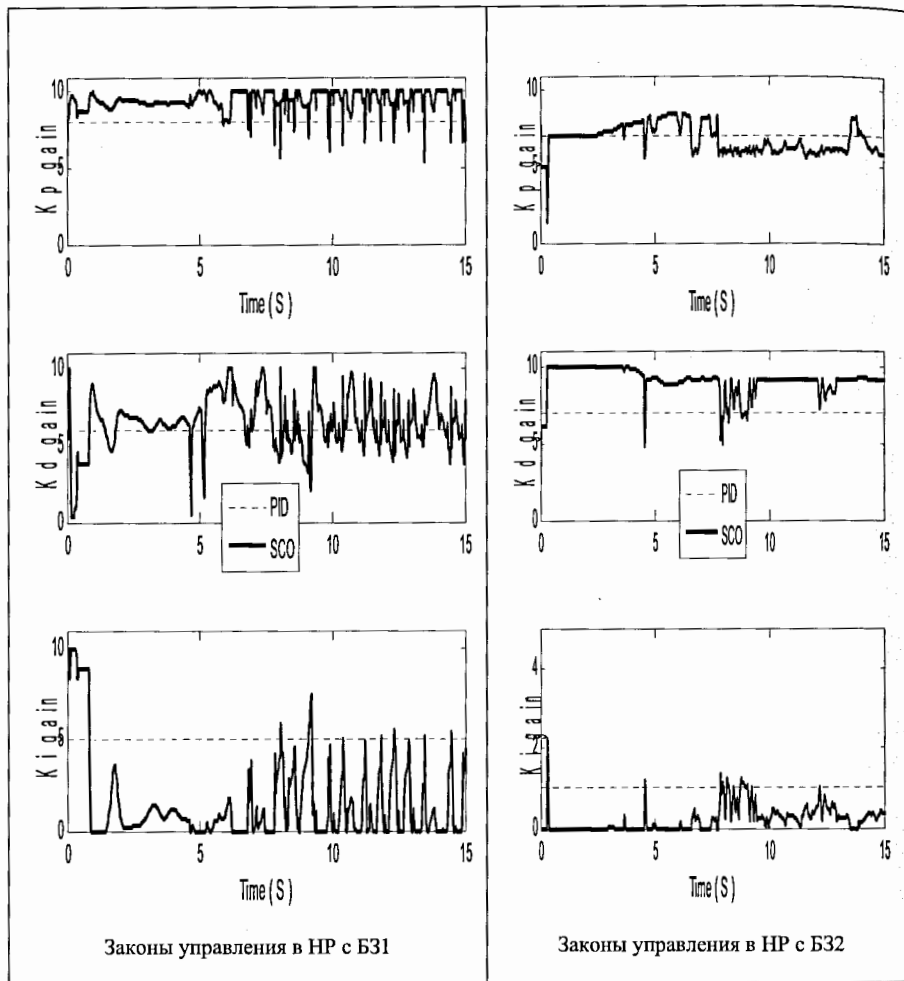


Рис. 3.12. Законы управления в ситуации самообучения системы управления

На рис. 3.12 показаны законы управления (переменные коэффициенты усиления), вычисляемые на каждом шаге управления как результат нечеткого вывода с БЗ1 (слева) и с БЗ2 (справа).

На рис. 3.13 приводится сравнение качества управления двух спроектированных баз знаний и ПИД-регулятора в обучающей ситуации.

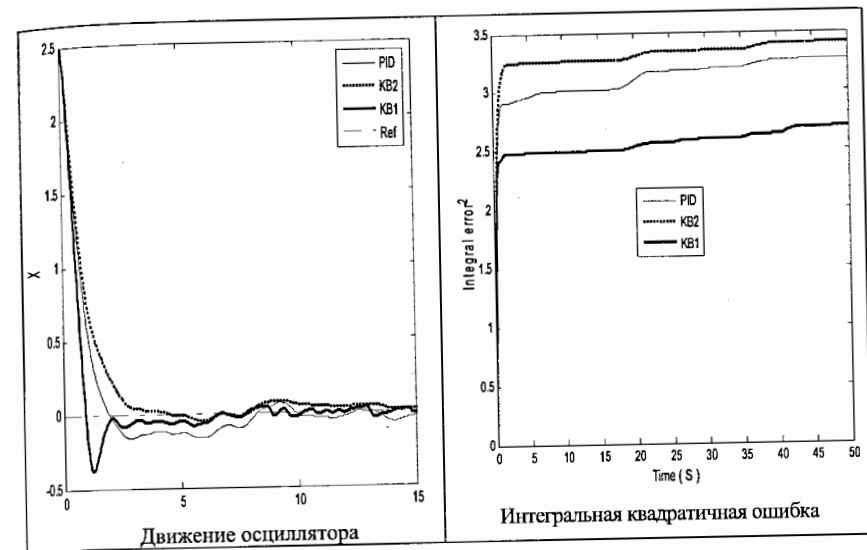


Рис. 3.13. Сравнение качества управления двух спроектированных баз знаний и ПИД-регулятора в обучающей ситуации

Сравнение качества управления НР, спроектированных с помощью инструментов AFM и ОБЗ. Рассмотрим сравнение результатов моделирования на основе двух инструментов для построения БЗ НР: Adaptive Fuzzy Modeler (AFM) и ОБЗ.

Сравним поведение рассматриваемого ОУ для следующих трех типов управления:

- на основе традиционных мягких вычислений (с помощью структуры ННС, выбранной вручную, и метода построения БЗ на основе алгоритма обратного распространения ошибки) в инструментарии AFM;
- на основе разработанного инструментария ОБЗ с оптимальной БЗ и оптимальной структурой ННС;
- на основе классического ПИД-регулятора с коэффициентами усиления $K = [5, 5, 5]$.

На рис. 3.14 – 3.16 показано сравнение качества управления трех вышеупомянутых типов управления в обучающей ситуации.

Примечание. На рис. 3.14 – 3.16 «PID» обозначает ПИД, «SCO» – нечеткий регулятор на основе ОБЗ, «FNN» – нечеткий регулятор на основе AFM. Динамическое поведение ОУ под управлением традиционного ПИД-регулятора показывается пунктирной линией, динамическое поведение ОУ под управлением НР на основе AFM показывается тонкой сплошной линией, а динамическое поведение ОУ под управлением НР на основе ОБЗ показывается жирной сплошной линией.

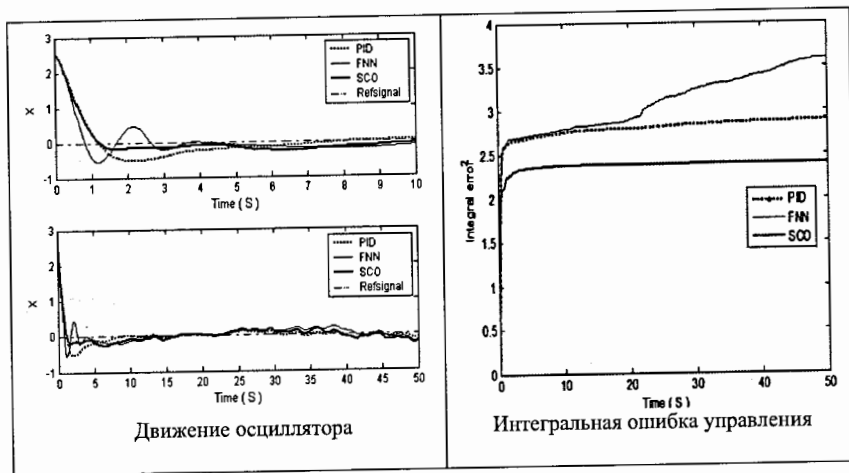


Рис. 3.14. Сравнение качества управления в обучающей ситуации

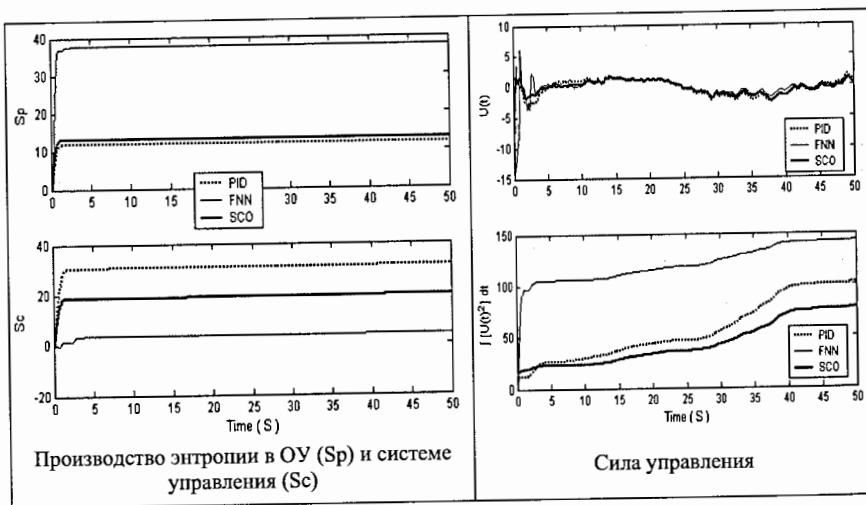


Рис. 3.15. Сравнение термодинамических характеристик и силы управления

Выводы.

- НР на основе ОБЗ имеет меньшее время переходного процесса и меньшую ошибку управления по сравнению с НР на основе АФМ и классическим ПИД-регулятором.
- С точки зрения критериев качества управления, включающего критерии минимума ошибки управления, минимума производства энтропии в ОУ и минимума силы управления, качество управления НР на основе ОБЗ лучше, чем качество управления НР на основе АФМ.

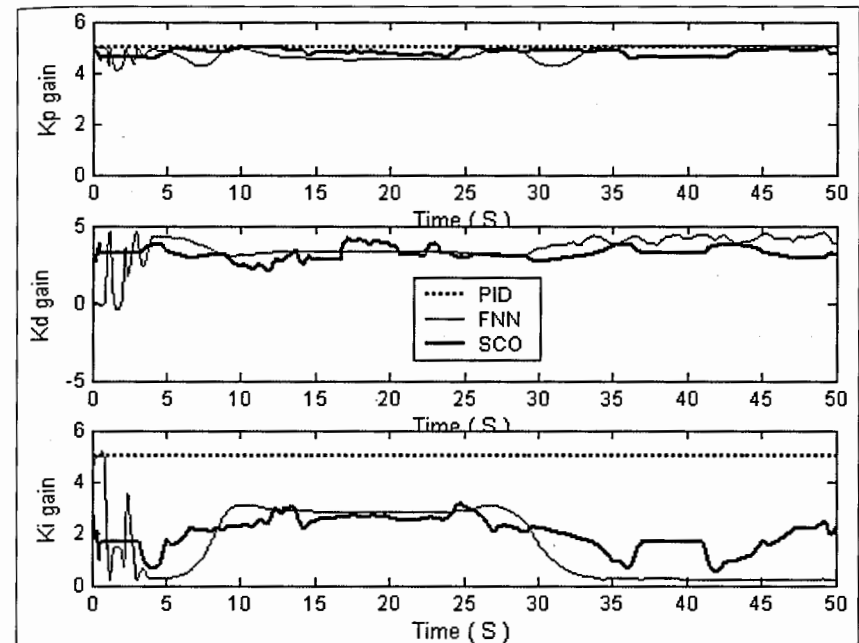


Рис. 3.16. Сравнение законов управления в обучающей ситуации

3.4. Робастность и предельные возможности построенных баз знаний и ПИД-управления (пример 1)

В реальных практических приложениях при разработке ИСУ необходимо также учитывать возможности систем измерений текущего состояния ОУ. Как правило, имеются погрешности в измерении, а также ограниченно время, необходимое для измерения состояния ОУ. Мы будем моделировать время, необходимое для измерения состояния ОУ, с помощью введения в модель блока *времени задержки в контуре измерения*.

Рассмотрим новую ситуацию, в которой учитывается фактор задержки времени в контуре измерения.

Новая ситуация:

- время задержки в контуре измерения = 0,001 с;
- ограничение на силу управления $u \leq 10$ [н];
- остальные параметры те же, что и в обучающей ситуации.

На рис. 3.17 показаны результаты сравнения поведения ОУ под управлением следующих трех типов: НР с БЗ1; НР с БЗ2 и ПИД с постоянными коэффициентами усиления $K = [7, 7, 1]$ в новой ситуации.

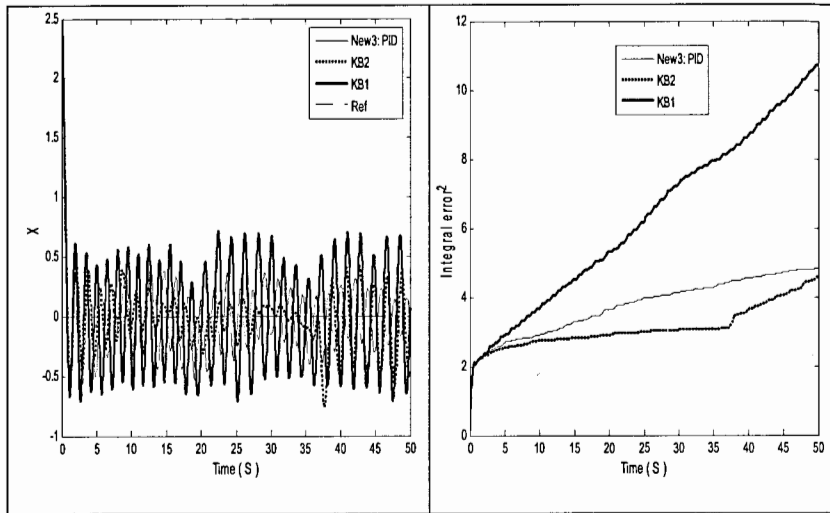


Рис. 3.17. Движение осциллятора и интегральная ошибка управления. Новая ситуация

Можно видеть, что качество управления в новой ситуации хуже из-за слишком большой ошибки управления.

Временная задержка в системе измерения является одним из критических факторов, влияющим на робастность систем управления, и должна быть включена в обучающую ситуацию. В следующем разделе рассмотрим проектирование БЗ в более сложных обучающих ситуациях.

• *Управление в условиях наличия времени задержки в каналах измерения и ограничений на силу управления.* Рассмотрим новую постановку задачи управления:

(1) перевести заданный ОУ из начального состояния $[x_0][\dot{x}_0] = [2,5] [0,1]$ в конечное состояние $x=0$ при различных внешних шумах, действующих на ОУ, при наличии времени задержки в канале измерения ошибки управления и при наличии ограничения на силу управления и

(2) провести оценку робастности спроектированного НР и сравнить его качество управления с традиционным ПИД-регулятором.

Рассмотрим две ситуации обучения (с разными внешними стохастическими шумами) и для каждой из них построим соответствующие нечеткие регуляторы (названные НР0 и НР1) и их базы знаний.

• *Проектирование БЗ НР0 в одной обучающей ситуации.* В качестве исходных параметров заданного ОУ рассмотрим $\beta = 0,1$; $\alpha = 0,3$; $k_1 = 0,2$; $k = 5$, начальные условия примем равными $[x_0][\dot{x}_0] = [2,5] [0,1]$; задающий сигнал $x_{ref} = 0$; область изменения коэффициентов усиления определена в интервале $[0, 50]$; внешнее возмущение рассмотрим как случайное воздействие с *рэлеевским законом* распределения вероятностей. Введем также ограничение на допустимую силу управления в виде

$|u| \leq 20$ [Н] и время задержки сигнала в канале измерения 0,001 с. Данную ситуацию управления обозначим TS0.

• *Проектирование БЗ НР1 в другой обучающей ситуации.* Исходные параметры заданного ОУ, начальные условия, задающий сигнал, область изменения коэффициентов усиления, ограничение на допустимую силу управления и время задержки сигнала в канале измерения примем такими же, как и в случае НР0. Однако внешнее возмущение рассмотрим в виде случайного воздействия с *гауссовским законом* распределения вероятностей. Данную ситуацию управления обозначим TS1.

С помощью инструментария ОБЗ и ОС, полученного стохастическим моделированием с использованием ГА, для заданных ситуаций обучения были спроектированы базы знаний БЗ0 для НР0 и БЗ1 для НР1 (ситуации TS0 и TS1).

На рис. 3.18 и 3.19 показаны спроектированные базы в инструментарии ОБЗ.

Для моделирования ситуации управления заданным ОУ были приняты следующие параметры: время управления равно 0,05 с, а время интегрирования и определения состояния (движения) ОУ равно 0,025 с.

• *Сравнение результатов моделирования качества управления НР0 с БЗ0, НР1 с БЗ1 и классическим ПИД-регулятором.*

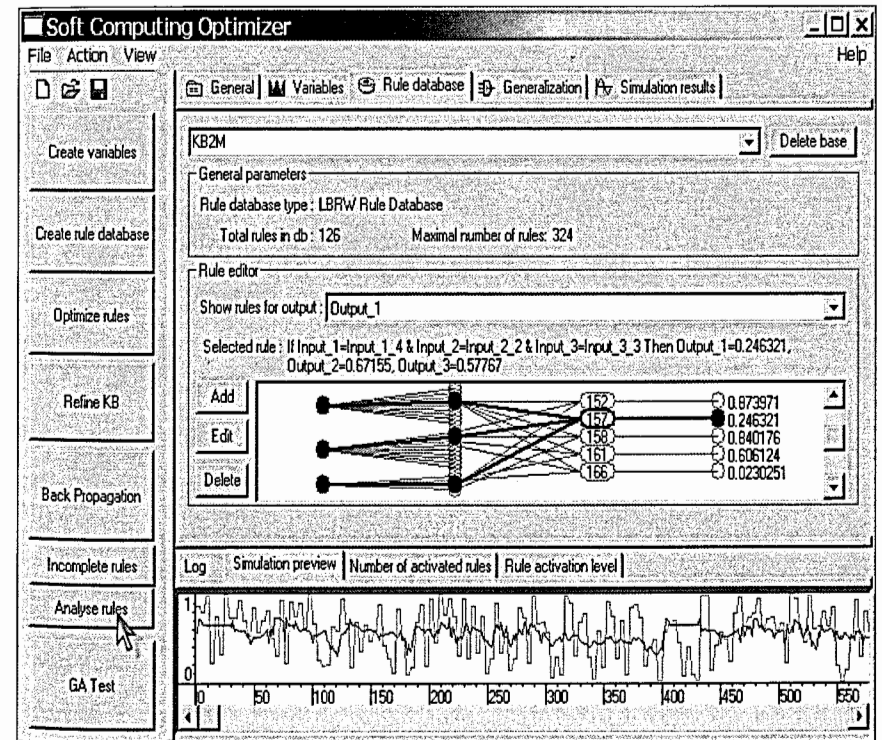


Рис. 3.18. База знаний НР0

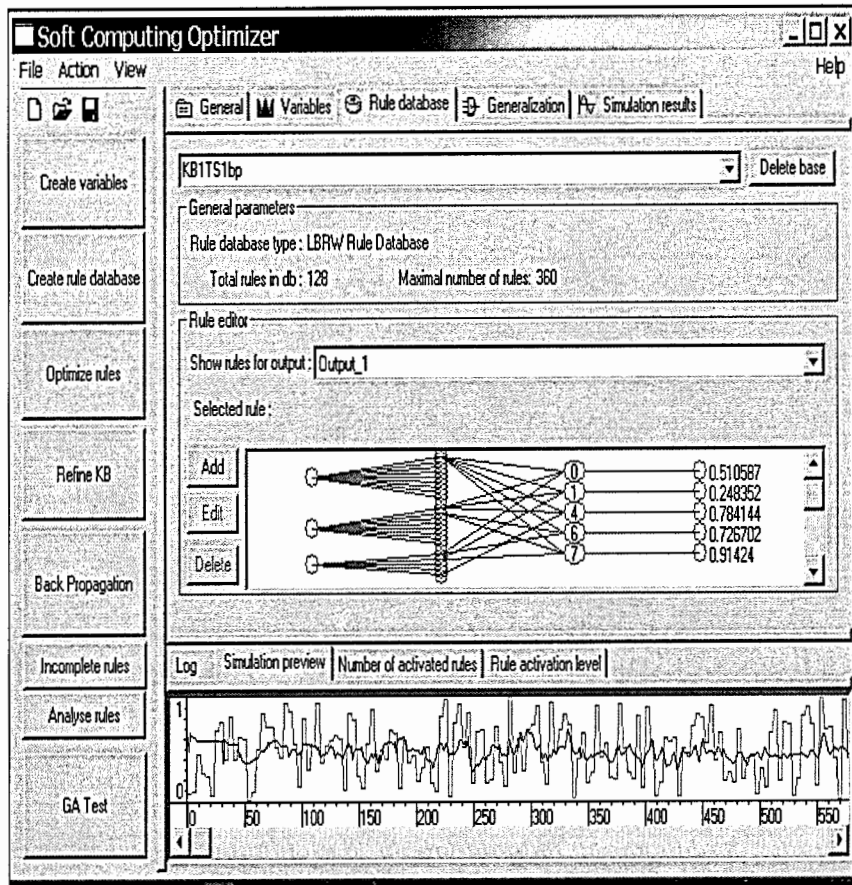


Рис. 3.19. База знаний НР1

Рассмотрим следующее сравнение поведения ОУ:

(1) в обучающей ситуации TS0 при управлении НР0 и традиционным ПИД-регулятором (обозначен как «PID average»), коэффициенты усиления которого были вычислены как средние значения от соответствующих законов управления в НР0 (рис. 3.20, слева), и

(2) в обучающей ситуации TS1 при управлении НР1 и традиционным ПИД-регулятором (обозначен как «PID average»), коэффициенты усиления которого были вычислены как средние значения от соответствующих законов управления в НР1 (рис. 3.20, справа).

На рис. 3.20 показано сравнение результатов моделирования поведения ОУ в первом и втором случае. Коэффициенты усиления «PID average» имеют значение $K = [35, 43, 7]$ для ситуации TS0 и $K = [33, 35, 15]$ для ситуации TS1.

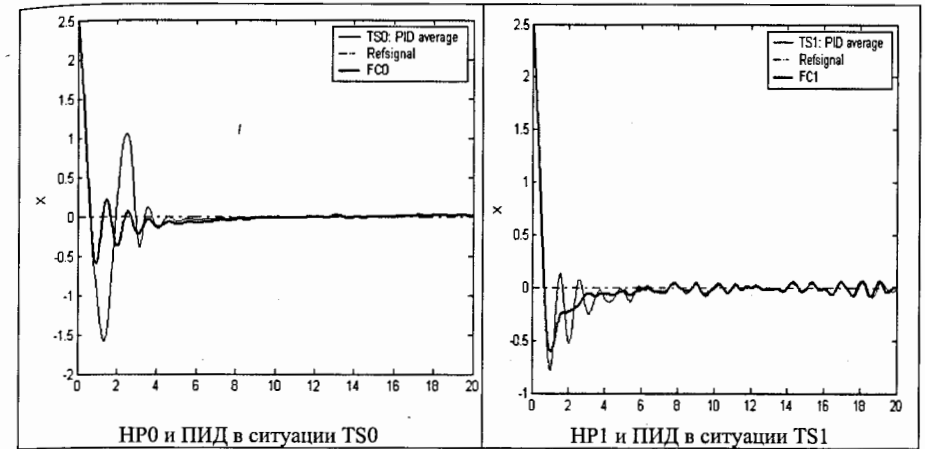


Рис. 3.20. Сравнение результатов моделирования поведения ОУ при нечетком управлении и управлении традиционным ПИД-регулятором

Вывод: В обеих ситуациях управления качество управления НР намного выше качества управления традиционных ПИД-регуляторов.

Примечание. На рис. 3.20 использовано английское обозначение НР0 как FC0 и НР1 как FC1.

• *Исследование робастности и предельных возможностей построенных БЗ и сравнение с ПИД-управлением.* Рассмотрим три смоделированных новых (непредвиденных) ситуации управления. Под «новой» ситуацией управления мы имеем в виду ситуацию, отличную от обучающей ситуации, для которой были получены обучающий сигнал и построена база знаний.

В табл. 3.1 представлены новые ситуации управления и параметры моделирования.

Будем называть в дальнейшем представленные в табл. 3.1 ситуации управления как множество элементов $\{S1, S2, S3\}$ (соответственно строкам таблицы). Рассмотрим поведение ОУ в смоделированных непредвиденных ситуациях управления.

Таблица 3.1

	Внешний шум	Задающий сигнал	Время задержки (с)	Изменение структуры ОУ	Шум в канале измерения
S1 ситуация	Равномерный (рис. 3.21)	0	0,0125	нет	Гауссовский с ампл. 0,02
S2 ситуация	Равномерный	[- 1, 1, 0]	0,001	нет	Гауссовский с ампл. 0,02
S3 ситуация	Равномерный	0	0,0125	случайное изменение параметров ОУ	Гауссовский с ампл. 0,02

Примечание. Физически ситуация S1 описывает влияние на динамику ОУ нового вида внешнего шума, времени задержки и шума в канале измерения. Ситуация S2 описывает изменение цели управления (изменяющийся во времени ступенчатый сигнал) и наличие шума в контуре измерения ошибки управления. В третьей ситуации управления S3 оценивается влияние случайного изменения параметров структуры ОУ (гауссовский параметрический шум в структуре ОУ). В этом случае параметры модели ОУ вычислялись по следующей формуле:

$$\beta = 0,1 + 0,2 \cdot \xi(t); \quad \alpha = 0,3 + 0,5 \cdot \xi(t); \quad k_1 = 0,2 + 0,5 \cdot \xi(t); \quad k = 5 + 2 \cdot \xi(t),$$

где $\xi(t)$ – гауссовский шум с амплитудой 1 (рис. 3.21).

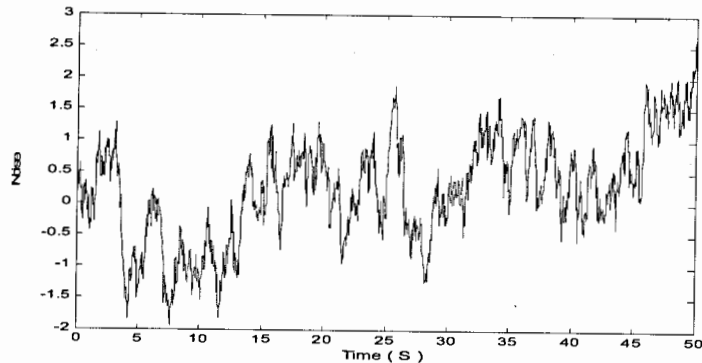


Рис. 3.21. Равномерно распределенный шум

На рис. 3.22 показано движение осциллятора и его термодинамические характеристики (производство энтропии в ОУ и в системе управления) в ситуации S1.

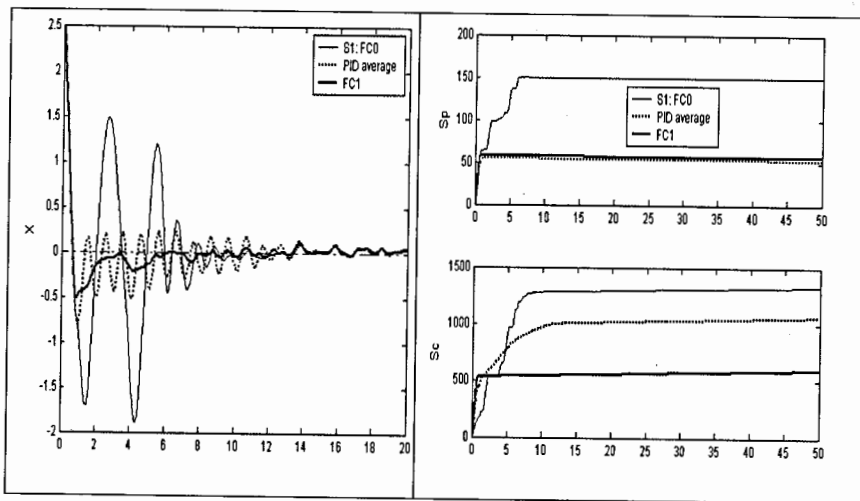


Рис. 3.22. Движение осциллятора и термодинамические характеристики. Ситуация управления S1

На рис. 3.23 представлены законы управления и сила управления для ситуаций управления S1.

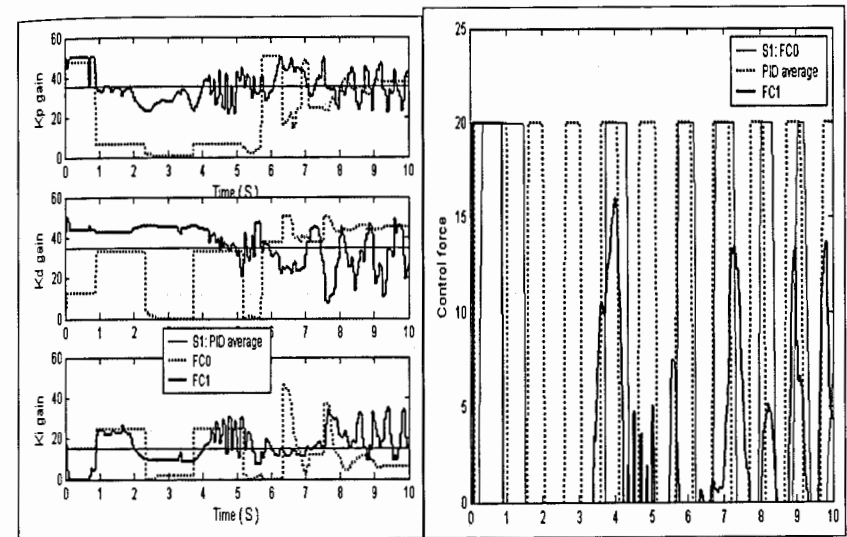


Рис. 3.23. Законы управления (слева) и управляющая сила (справа). Ситуация управления S1

На рис. 3.24 показано динамическое поведение ОУ для ситуаций управления S2 и S3 соответственно.

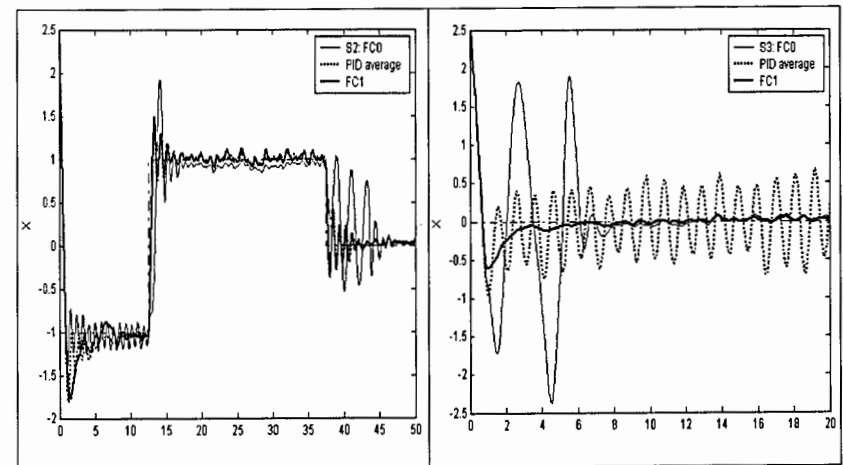


Рис. 3.24. Движение осциллятора. Ситуации управления S2 и S3

- *Анализ результатов моделирования.* Из результатов моделирования следует:
 - Нечеткий регулятор НР1 (FC1), обученный на стохастический шум с *гауссовским законом* распределения вероятностей, робастен во всех трех непредвиденных ситуациях.
 - Нечеткий регулятор НР0 (FC0), обученный на стохастический шум с *рэлеевским законом* распределения вероятностей, обладает повышенной чувствительностью к изменению типа шума и параметров модели ОУ. Он менее робастен, чем НР1 (FC1), обученный на стохастический шум с *гауссовским законом* распределения вероятностей.
 - Традиционный ПИД-регулятор в ситуации S3 не робастен.
 - Качество управления НР на основе ОБЗ намного выше качества управления традиционных ПИД-регуляторов.

Приведенные результаты моделирования показывают эффективность разработки *робастных ИСУ* на основе новой технологии мягких вычислений в сравнении с традиционным управлением на основе ПИД-регулятора (с постоянными коэффициентами усиления) и в сравнении с традиционными инструментариями типа AFM на мягких вычислениях (в которых нет оптимизации БЗ и структуры ННС).

3.5. Глобально неустойчивые динамические системы (пример 2)

Рассмотрим задачу управления неустойчивым динамическим ОУ. В качестве типового примера рассмотрим известную в литературе систему «перевернутый маятник – каретка перемещения» (так называемую Benchmark «Cart-Pole» system). Здесь продолжим обсуждать возможности проектирования ИСУ на основе инструментария ОБЗ, а также рассмотрим на примере управления данным ОУ сравнение инструментариев ОБЗ и инструментария ANFIS, встроенного в MATLAB.

- *Математическая модель системы*

Динамическое поведение этой системы (рис. 3.25) описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка для вычисления силы, используемой для движения каретки:

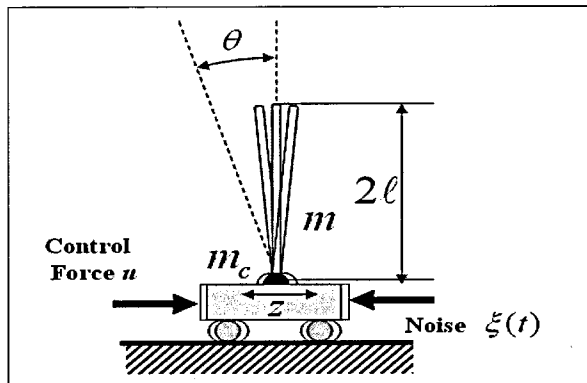


Рис. 3.25. Динамическая система «движущаяся каретка – перевернутый маятник»

$$\begin{cases} \ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{u + \xi(t) + a_1 \dot{z} + a_2 z - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m} \right) - k \dot{\theta}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}, \\ \ddot{z} = \frac{u + \xi(t) - a_1 \dot{z} - a_2 z + ml (\dot{\theta}^2 \sin \theta - \ddot{\theta} \cos \theta)}{m_c + m}. \end{cases} \quad (3.4)$$

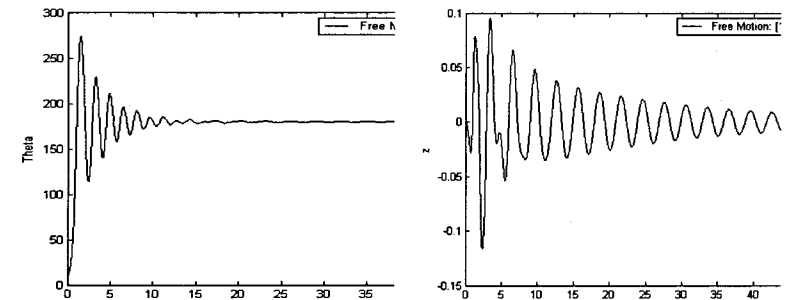
Уравнения для скорости изменения (производства) энтропии следующие:

$$\dot{S}_\theta = \frac{k \dot{\theta}^2 + 1/2 ml \dot{\theta}^3 \sin 2\theta}{l(m_c + m) \left[\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right]}; \quad \dot{S}_z = \frac{a_1}{m_c + m} \cdot \dot{z}^2; \quad \dot{S}_u = k_e \dot{e}^2. \quad (3.5)$$

В уравнениях (3.4) и (3.5), получаемых с учетом сил трения и упругости из баланса моментов вращения и баланса проекций сил на горизонтальную ось Z , z и θ – обобщенные координаты; g – ускорение свободного падения ($9,8 \text{ м/с}^2$), m_c – масса тележки, m – масса перевернутого маятника (называемого «шест»), l – половина длины маятника, k и a_1 – коэффициенты трения при движении и вращении соответственно, a_2 – сила упругости тележки, $\xi(t)$ – внешний стохастический шум, а u – сила управления (н).

На рис. 3.26 показано свободное движение динамической системы.

Динамика свободного движения показывает, что маятник без управления не может находиться в вертикальном положении (маятник падает). С точки зрения динамического управления – это глобально неустойчивый ОУ с различными начальными состояниями маятника и тележки.



Динамика движения маятника, в градусах

Динамика движения каретки, в метрах

Рис. 3.26. Свободное движение системы

Проблема управления: воздействуя с помощью силы управления только на тележку, поддерживать маятник в вертикальном положении (угол маятника – 0) при любых условиях внешней среды.

Наша цель – сбалансировать движение маятника с помощью ограниченной силы управления.

Таким образом, нужно контролировать две степени свободы ОУ, используя один интеллектуальный регулятор с простой структурой и свойствами нелинейных связей в ОУ. В этом случае для стабилизации ($\theta = 0$) перевернутого маятника мы ввели новый задающий сигнал для z следующим образом: z_{ref} (задающий сигнал для z) – проекция на ось z центра тяжести маятника. Он должен быть равен нулю для стабилизации угла θ . Мы можем представить z_{ref} следующим образом:

$$z_{ref} = -w \cdot l \cdot \sin \theta; \quad w - \text{масштабный коэффициент}, \quad (3.6)$$

если $\theta \rightarrow 0, z_{ref} \rightarrow 0$. Мы также вводим ограничение на проекции центра тяжести: $|z_{ref}| \leq 1$. Кроме того, будем в дальнейшем рассматривать модель динамической системы со следующими параметрами.

Параметры системы					
m_c [кг]	m [кг]	l [м]	Коефф. трения в θ , k	Коефф. трения в Z , a_2	Сила упругости, a_1
1,0	0,1	0,5	0,4	0,1	5,0

И следующими начальными условиями: $[\theta_0; \dot{\theta}_0] = [10; 0,1]$ (в градусах); $[z_0; \dot{z}_0] = [0; 0]$.

Задача управления: спроектировать робастную БЗ для НР, способную работать в непредсказуемых ситуациях управления при наличии внешнего стохастического шума, действующего на каретку, при наличии времени задержки сигнала в системе измерения положения маятника (равного 0,001 с) и при наличии ограничения на силу управления; перевести маятник из начального положения в целевое вертикальное ($\theta = 0$) и удерживать движение ОУ в заданном вертикальном положении.

Решение. Рассмотрим стохастическое движение динамической системы в условиях классического ПИД-управления в данных ниже (табл. 3.2) обучающих условиях.

Таблица 3.2.

Обучающая ситуация управления	
Шум в канале управления	Гауссовский
Задержка в канале обратной связи	0,001 с

Необходимо выбрать оптимальные коэффициенты ПИД-регулятора. Это возможно с помощью генетического алгоритма с функцией пригодности, например, в виде минимума интегральной ошибки управления, полученной в результате моделирования управления системой с текущим набором ПИД-коэффициентов.

Действуя описанным способом, мы получили следующие коэффициенты регулятора:

$$[K_p = 99,61; K_i = 0,39; K_d = 11,76].$$

Следующий шаг – получение с помощью ГА трех обучающих сигналов для управления каждым ПИД-коэффициентом в отдельности, пока остальные два зафиксированы постоянными. Когда обучающие сигналы получены, БЗ для регуляторов на основе ОБЗ и ANFIS получают посредством применения методов, описанных в предыдущих разделах данной книги. В табл. 3.3 представлены характеристики полученных БЗ для регуляторов, спроектированных с помощью ОБЗ и ANFIS.

Таблица 3.3.
Характеристики баз знаний на основе ОБЗ и ANFIS

ПИД-коэффициент	ОБЗ	ANFIS
K_p	Модель нечеткого вывода – Сугено . Вид функций принадлежности – треугольный . Количество функций принадлежности входных переменных: [8, 5, 8]. Количество правил: 39 из 320 .	Модель нечеткого вывода – Сугено . Вид функций принадлежности – гауссовский . Количество функций принадлежности входных переменных: [7, 7, 7]. Количество правил: 343 .
K_i	Модель нечеткого вывода – Сугено . Вид функций принадлежности – треугольный . Количество функций принадлежности входных переменных: [6, 8, 5]. Количество правил: 34 из 240 .	Модель нечеткого вывода – Сугено . Вид функций принадлежности – гауссовский . Количество функций принадлежности входных переменных: [7, 7, 7]. Количество правил: 343 .
K_d	Модель нечеткого вывода – Сугено . Вид функций принадлежности – треугольный . Количество функций принадлежности входных переменных: [6, 8, 8]. Количество правил: 41 из 384 .	Модель нечеткого вывода – Сугено . Вид функций принадлежности – гауссовский . Количество функций принадлежности входных переменных: [7, 7, 7]. Количество правил: 343 .

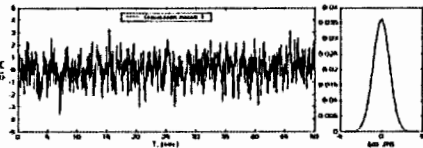
Далее проектируем ИСУ на основе инструментария ОБЗ для динамической системы «перевернутый маятник – каретка перемещения». Модель динамической системы «перевернутый маятник – каретка» усложнена новыми факторами (по отношению к известным моделям данного ОУ в литературе). В частности, модель ОУ содержит в структуре случайные параметрические возмущения, дискретные ограничения, характеризуется наличием времени задержки измерения состояния (в датчиках системы), включает непредвиденные ситуации управления, что представляет большую алгоритмическую сложность для эффективного применения традиционных методов оптимального управления.

Проектирование баз знаний с помощью ОБЗ и их исследование. Для управления системой «маятник-каретка» спроектируем ИСУ в виде нечеткого ПИД-регулятора на основе инструментария ОБЗ. Зададим типовую ситуацию обучения для построения базы знаний БЗ1 с гауссовским шумом (KB1 на рис. 3.27).

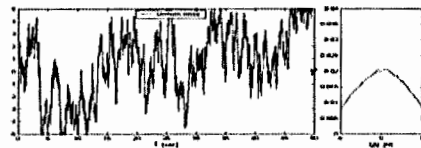
Типовые условия S1. Параметры модели ОУ:

- $\{m_c [кг]; m [кг]; l [м]; k; a_1; a_2\} = \{1; 0,1; 0,5; 0,4; 0,1; 5\}$;
- начальное положение: $[\theta_0; \dot{\theta}_0] = [10; 0,1]$, $[z_0; \dot{z}_0] = [0; 0]$. ($[\theta_0]$ = градусы, $[z_0]$ = м);
- внешний шум - гауссовский (рис. 3.27, вверху слева);
- задержка по времени в канале измерения 0,001 с;
- ограничения на силу управления: $-5,0 < u < 5,0 [H]$;
- ограничения на движение каретки: $-1,0 < z < 1,0 [м]$.

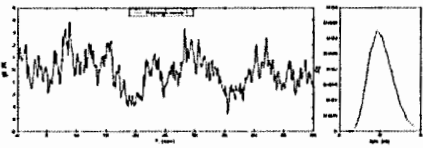
Gaussian 1: KB1



Uniform : KB3



Rayleigh 1: KB2



Gaussian 2: KB4

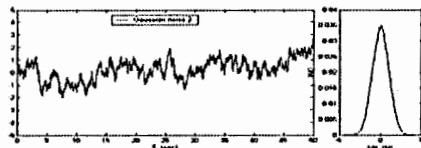


Рис. 3.27. Четыре типовых шума для ОУ

Примечание. На рис. 3.27 показаны шумовые сигналы с различными функциями плотностей распределения вероятностей для различных обучающих ситуаций. В типовых условиях ситуации S1 используется гауссовский шум, в типовых условиях S2 используется равномерно распределенный шум, в типовых условиях S3 используется рэлеевский шум и в типовых условиях S4 используется другой гауссовский шум. На рис. 3.27 используются также следующие обозначения: KB1 (от английского «Knowledge Base») означает сокращенно БЗ1 и т. д.

Для построения обучающего сигнала и на его основе робастной базы знаний мы используем систему стохастического моделирования. Выберем следующие параметры поиска для ГА (с поиском максимума функции пригодности): область поиска значений вектора $K = [100, 100, 100]$; функция пригодности ФП = $-\sum|\theta| - \sum|\dot{\theta}|$ представляет собой сумму абсолютных значений угла отклонения и скорости угла отклонения, взятых со знаком минус.

Модель MATLAB/SIMULINK для построения ОС показана на рис. 3.28. ОБЗ запускает эту модель для оценки текущего решения (текущей хромосомы) в поиске оптимального решения с помощью ГА в соответствии с выбранной ФП.

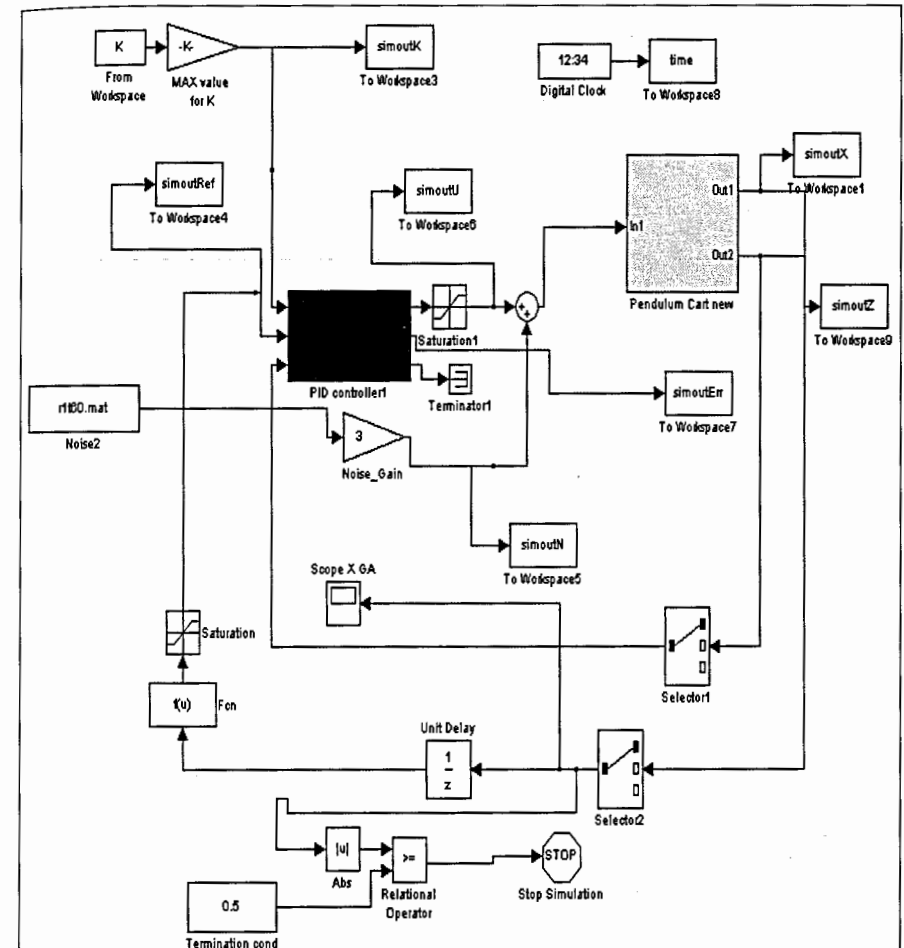


Рис. 3.28. Модель MATLAB/SIMULINK для построения ОС

На рис. 3.29 показана MATLAB-функция пригодности, описывающая вычисление ФП для ГА при построении ОС.

```
Norm=length(simoutX(:,1));
y=-sum(abs(simoutX(:,1)))/Norm-sum(abs(simoutX(:,2)))/Norm+tout(end);
```

Рис. 3.29. MATLAB-функция пригодности для ГА при построении ОС

Примечание. В нижней части модели MATLAB/SIMULINK находится блок «Stop Simulation» с заданным критерием останова, чтобы не моделировать до конца «плохое решение», когда маятник падает. Такой блок позволяет существенно сократить время поиска решения.

Для четырех типовых ситуаций (S1-S4), различающихся внешними шумами, показанными на рис. 3.27, построим четыре базы знаний (БЗ1 – БЗ4) с помощью ОБЗ и исследуем их возможности. Напомним, что полная БЗ строится из всех комбинаций лингвистических переменных и равна $9 \times 9 \times 9 = 729$.

На рис. 3.30 и 3.31 показаны структуры ННС, спроектированных для данных четырех ситуаций управления.

- БЗ1 состоит из 26 правил (рис. 3.30, слева), выбранных ОБЗ из полной БЗ с 729 правилами. Число лингвистических переменных для каждого из трех входов [9,9,9].
- БЗ2 состоит из 33 правил (рис. 3.30, справа), выбранных ОБЗ из полной БЗ с 729 правилами. Число лингвистических переменных для каждого из трех входов [9,9,9].
- БЗ3 состоит из 48 правил (рис. 3.31, слева), выбранных ОБЗ из полной БЗ с 360 правилами. Число лингвистических переменных для каждого из трех входов [9,5,8].
- БЗ4 состоит из 44 правил (рис. 3.31, справа), выбранных ОБЗ из полной БЗ с 378 правилами. Число лингвистических переменных для каждого из трех входов [9,6,7].

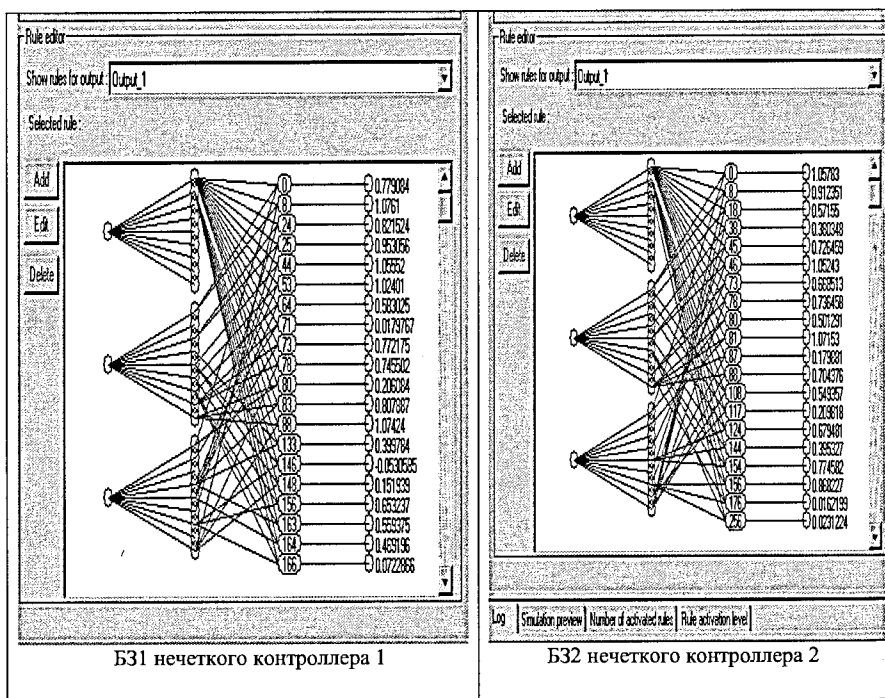


Рис. 3.30. Структуры ННС нечетких регуляторов 1 и 2

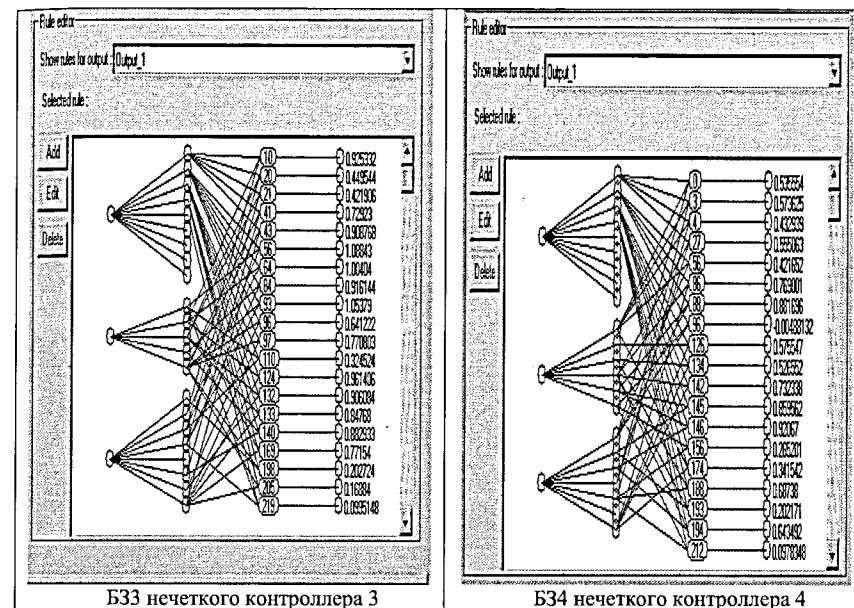
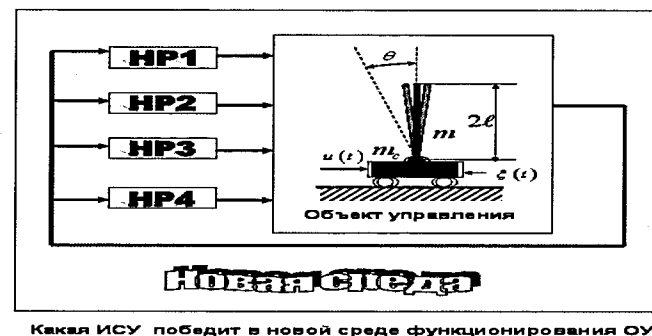


Рис. 3.31. Структуры ННС нечетких регуляторов 3 и 4

Проведем исследование, схематично показанное на рис. 3.32.

Для этого выберем ситуации управления, отличные от четырех типовых, указанных выше. Смоделируем три нетиповые (непредсказуемые) ситуации, как показано в табл. 3.4.



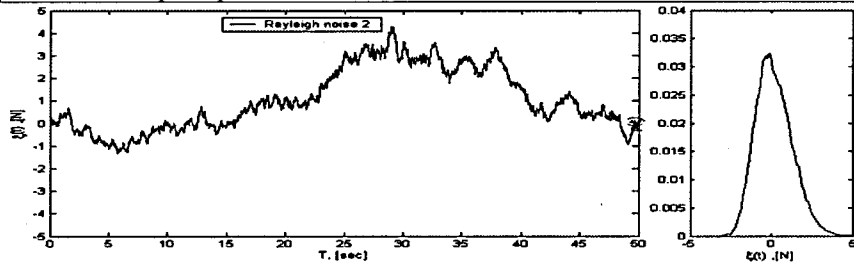
Какая ИСУ победит в новой среде функционирования ОУ ?

Рис. 3.32. Схема исследования робастности построенных БЗ НР

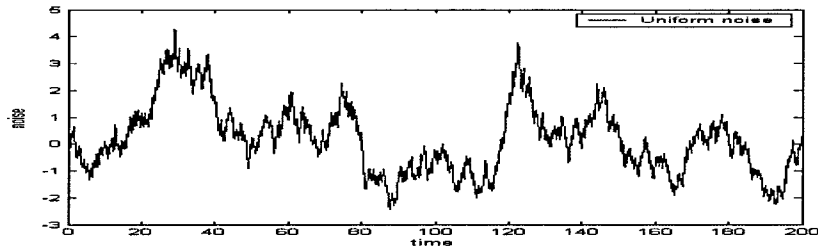
Исследование робастности четырех построенных НР. Рассмотрим динамическое поведение системы «маятник-каретка» в трех смоделированных непредсказуемых ситуациях управления (табл. 3.4) и сравним качество управления четырех НР и их БЗ.

Таблица 3.4

S1-ситуация	S2-ситуация
Новый рэлеевский шум (рис. 3.33, а); Шум в системе измерения (гауссовский с амплитудой 0,01); Новая временная задержка 0,003 с; Типовые параметры модели и начальное положение	Новый рэлеевский шум (рис. 3.33, а); Шум в системе измерения (гауссовский с амплитудой 0,01); Новая временная задержка 0,002 с; Новое значение параметра $a_1 = 0,08$; Типовое начальное положение
S3-ситуация	
Равномерно распределенный шум (рис. 3.33, б); Шум в системе измерения (гауссовский с амплитудой 0,01); Новая временная задержка 0,005 с; Типовые параметры модели и начальное положение	



а)



б)

Рис. 3.33. Виды шумов:
а) новый рэлеевский шум; б) равномерно распределенный шум

На рис. 3.34 (и далее) показаны результаты сравнения движения маятника под управлением четырех нечетких регуляторов (четыре БЗ соответственно) в трех смоделированных непредсказуемых ситуациях управления.

• **Ситуация S1:** новый стохастический шум, новое время задержки и наличие шума в измерительной системе.

На рис. 3.34 – 3.36 показано сравнение движения маятника и каретки, интегральная квадратичная ошибка и сравнение законов управления в ситуации S1.

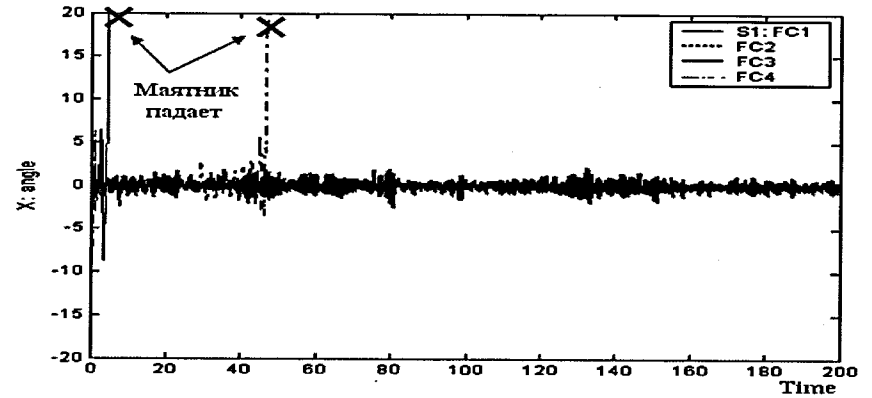


Рис. 3.34. Сравнение движения перевернутого маятника в ситуации S1 для четырех нечетких регуляторов

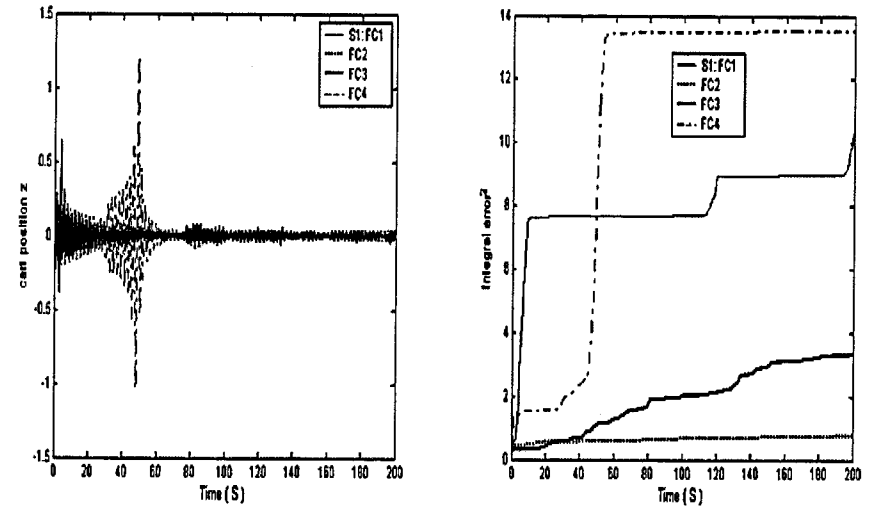


Рис. 3.35. Движение каретки и интегральная ошибка управления в ситуации S1 для четырех нечетких регуляторов

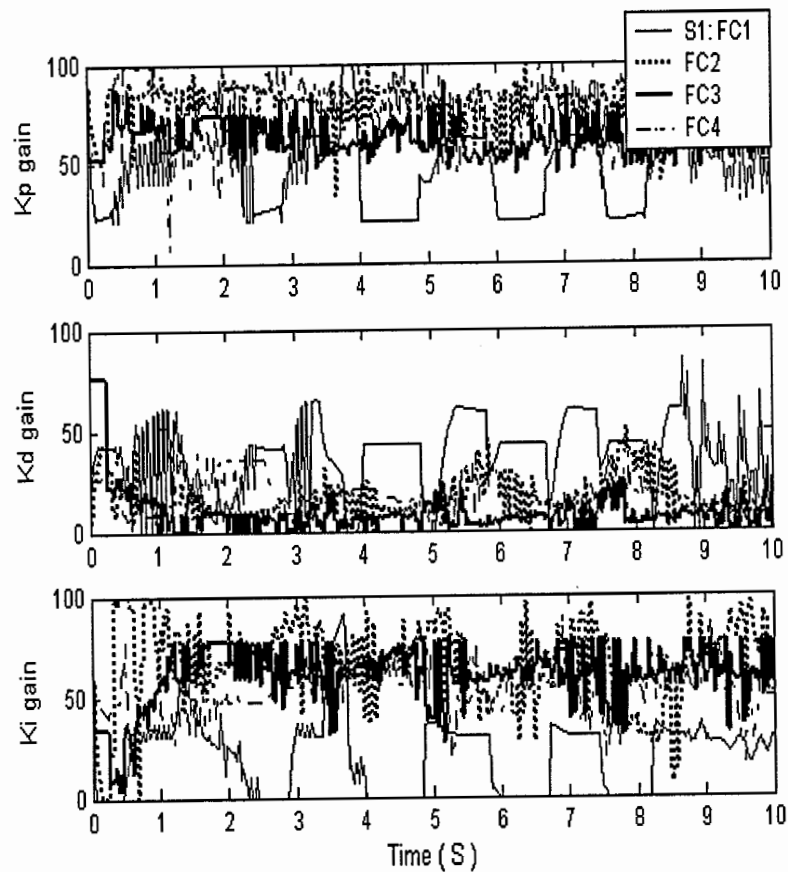


Рис. 3.36. Законы управления в ситуации S1 для четырех нечетких регуляторов

Примечание. На рис. 3.34 (и далее) использованы следующие обозначения: «pole motion» – движение маятника, «integral control error» – интегральная ошибка управления, FC1 – НР1, FC2 – НР2, FC3 – НР3, FC4 – НР4.

Вывод: нечеткие регуляторы НР1 и НР4 не робастны в S1-ситуации, так как маятник падает при их управлении. Регуляторы НР2 и НР3 справляются с задачей управления.

• *Ситуация S2:* новый стохастический шум, новое время задержки и шум в измерительной системе. Кроме того, изменился параметр модели ОУ.

На рис. 3.37, 3.38 показано сравнение движения маятника и каретки, интегральная квадратичная ошибка и сравнение законов управления в ситуации S2.

Вывод: нечеткие контроллеры НР1, НР2 и НР4 не робастны в ситуации S2. Только НР3 справляется с задачей управления.

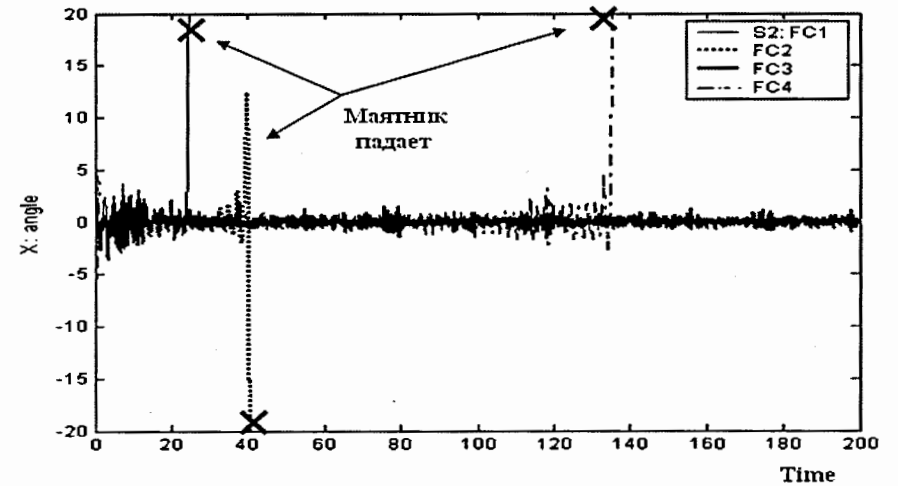


Рис. 3.37. Сравнение движения перевернутого маятника в ситуации S2 для четырех нечетких регуляторов

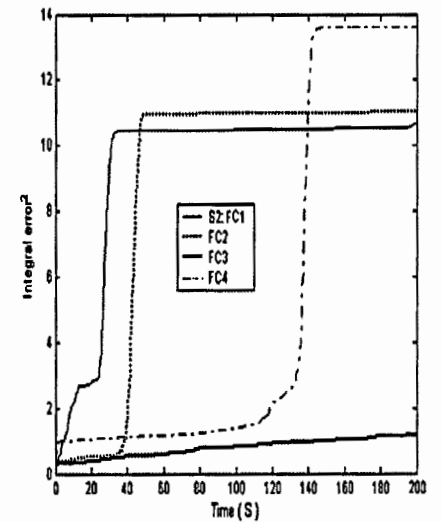
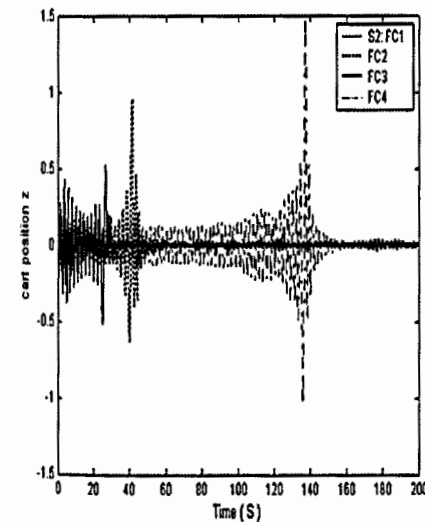


Рис. 3.38. Движение каретки и интегральная ошибка управления в ситуации S2 для четырех нечетких регуляторов

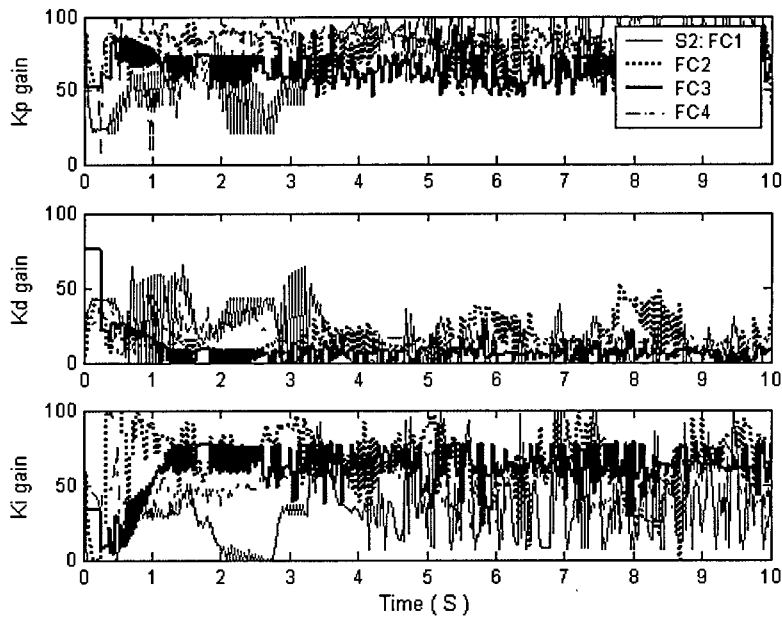


Рис. 3.39. Законы управления в ситуации S2 для четырех нечетких регуляторов

• **Ситуация S3:** новый стохастический шум, новое, увеличенное время задержки и шум в измерительной системе.

На рис. 3.40 – 3.42 показано сравнение движения маятника и каретки, интегральная квадратичная ошибка и сравнение законов управления в ситуации S3.

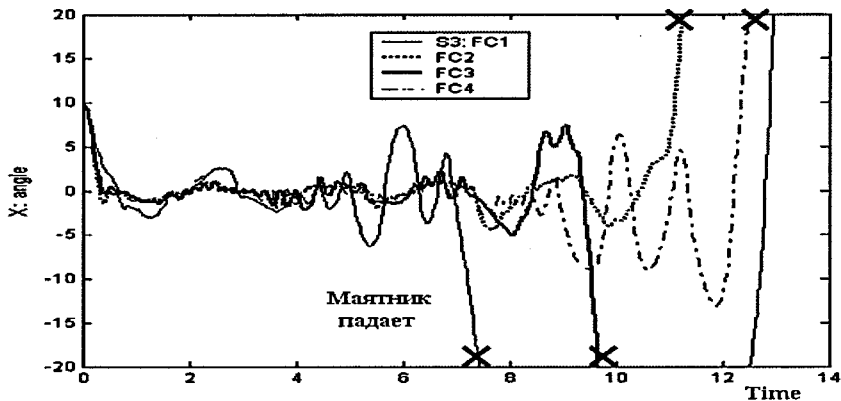


Рис. 3.40. Сравнение движения перевернутого маятника в ситуации S3 для четырех нечетких регуляторов

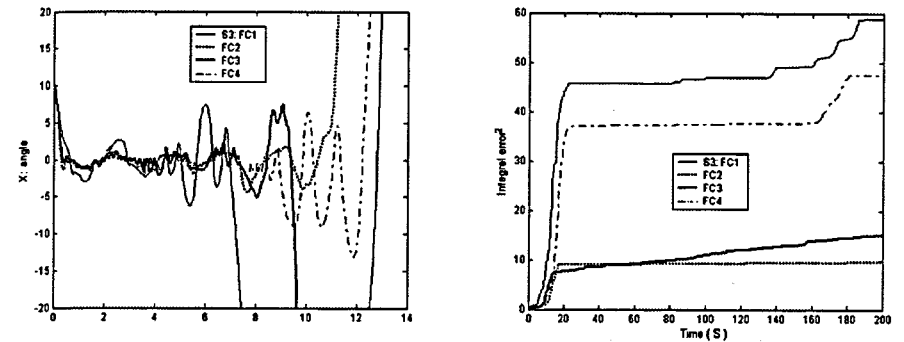


Рис. 3.41. Движение каретки и интегральная ошибка управления в ситуации S3 для четырех нечетких регуляторов

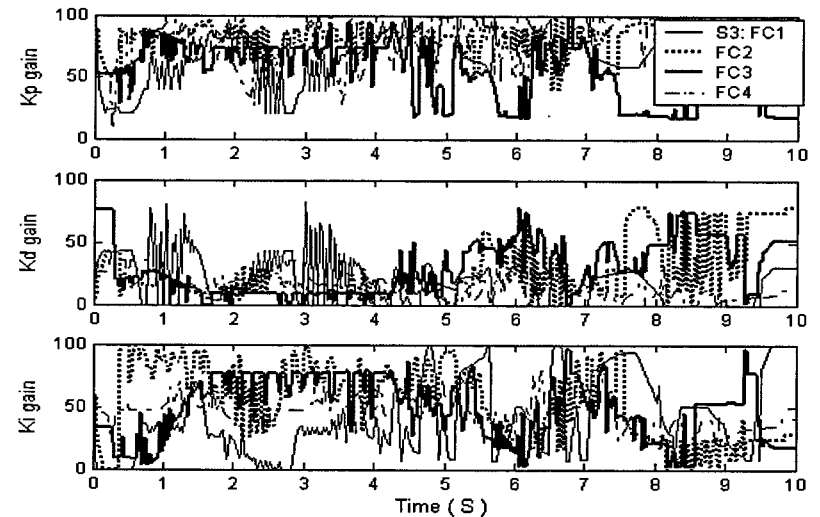


Рис. 3.42. Законы управления в ситуации S3 для четырех нечетких регуляторов

Вывод: все регуляторы не робастны в ситуации S3.

Результаты моделирования (Рис. 3.34 – 3.42) указывают на существование *границы робастности* нечетких регуляторов, построенных на основе *инструментария на мягких вычислениях*.

Факторами, влияющими на робастность нечетких регуляторов, построенных в типовых обучающих условиях, являются

- изменение параметров внешнего шума;
- появление шумов в сенсорной системе (погрешности в системе измерения);
- изменение времени задержки в сенсорной системе (отказы в системе измерения);
- смена параметров модели (например в результате старения объекта управления).

3.6. Сравнение эффективности модуля ANFIS (MATLAB) и ОБЗ (пример 2)

В данном разделе исследуются БЗ, полученные с помощью двух программных инструментариев – ANFIS (*Adaptive-Neuro-Fuzzy Inference Systems*), встроенного в MATLAB, и SCOptimizer (*Soft Computing Optimizer, оптимизатор БЗ на основе мягких вычислений, ОБЗ*) – с точки зрения качества управления нелинейными динамическими объектами и робастности ИСУ. Дадим краткое описание инструментария ANFIS.

ANFIS является одним из первых программных продуктов для решения задач в области мягких вычислений. ANFIS-редактор позволяет в диалоге с пользователем синтезировать из экспериментальных данных нечеткую нейронную сеть (ННС). ННС можно рассматривать как одну из разновидностей систем нечеткого логического вывода типа Сугено. При этом функции принадлежности синтезированных систем настроены (обучены) так, чтобы минимизировать отклонения между результатами нечеткого моделирования и экспериментальными данными.

Загрузка ANFIS-редактора осуществляется по команде «anfisedit» в среде MATLAB/SIMULINK. В результате выполнения этой команды появляется графическое окно, изображенное на рис. 3.43.

В области свойств ANFIS (ANFIS info) выводится информация о количестве входных и выходных переменных, о количестве функций принадлежности для каждой входной переменной, а также о количестве строчек в выборках.

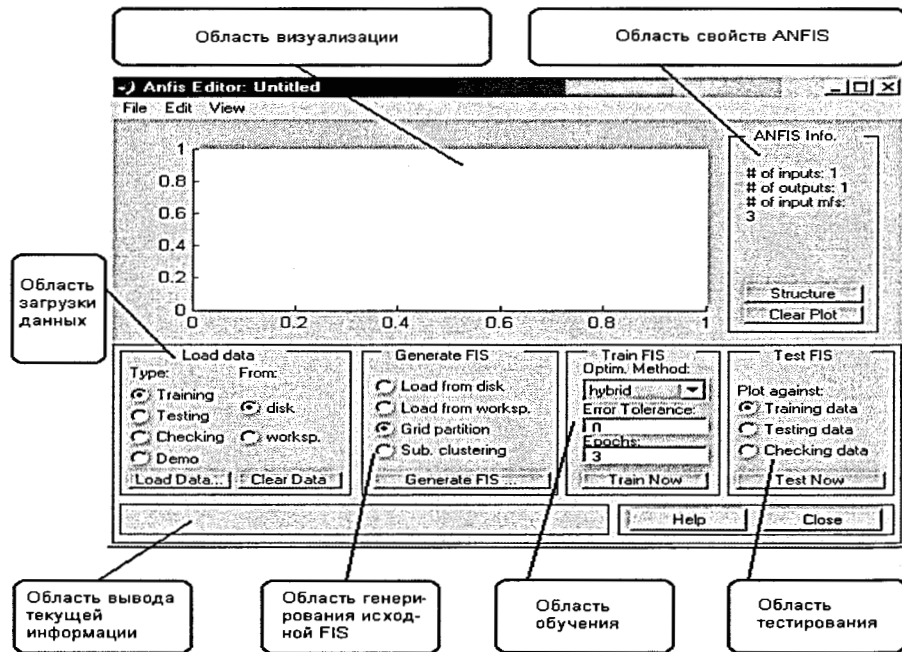


Рис. 3.43. Интерфейс ANFIS

Данный инструментарий имеет ряд существенных ограничений:

- определение вида и количества функций принадлежности осуществляется вручную человеком-экспертом;
- невозможность аппроксимации более одного выходного значения.

Представление нечеткого логического вывода в виде ННС в среде ANFIS продемонстрировано на рис. 3.44.

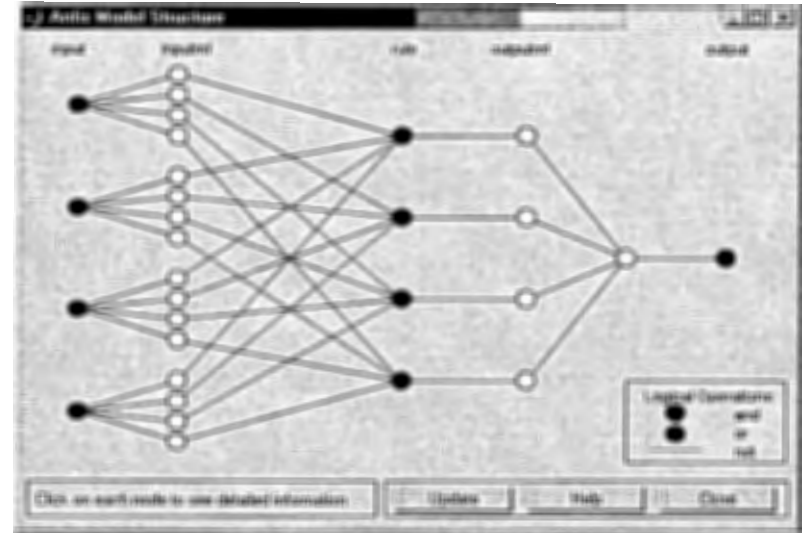


Рис. 3.44. Пример структуры ННС в ANFIS

Порядок создания БЗ в ANFIS включает следующие шаги:

- задание количества функций принадлежности для каждой входной нечеткой переменной; также задается вид этих функций, единый для всех нечетких переменных;
- выбор алгоритма обучения нейронной сети: алгоритма обратного распространения ошибки или гибридного алгоритма (алгоритм обратного распространения ошибки + метод наименьших квадратов);
- обучение нейронной сети выбранным алгоритмом.

После выполнения этих шагов получаем базу знаний для нечеткого регулятора, предназначенного для управления одним из ПИД-коэффициентов.

• *Сравнение качества управления ANFIS и ОБЗ на примере глобально неустойчивого динамического объекта.* Рассмотрим сравнение качества управления нечетких регуляторов, спроектированных с помощью инструментария ANFIS и с помощью инструментария ОБЗ, на примере управления динамической системой «перевернутый маятник-каретка». Рассмотрим вначале общую архитектуру выбранного НР с тремя входами (ошибка управления, ее производная и интегральная часть) и тремя выходами – коэффициенты усиления K_p, K_i, K_d . В связи с ограничением (одно выходное значение) в инструментарии ANFIS выберем конфигурацию нечеткого ПИД-регулятора, показанную на рис. 3.45.

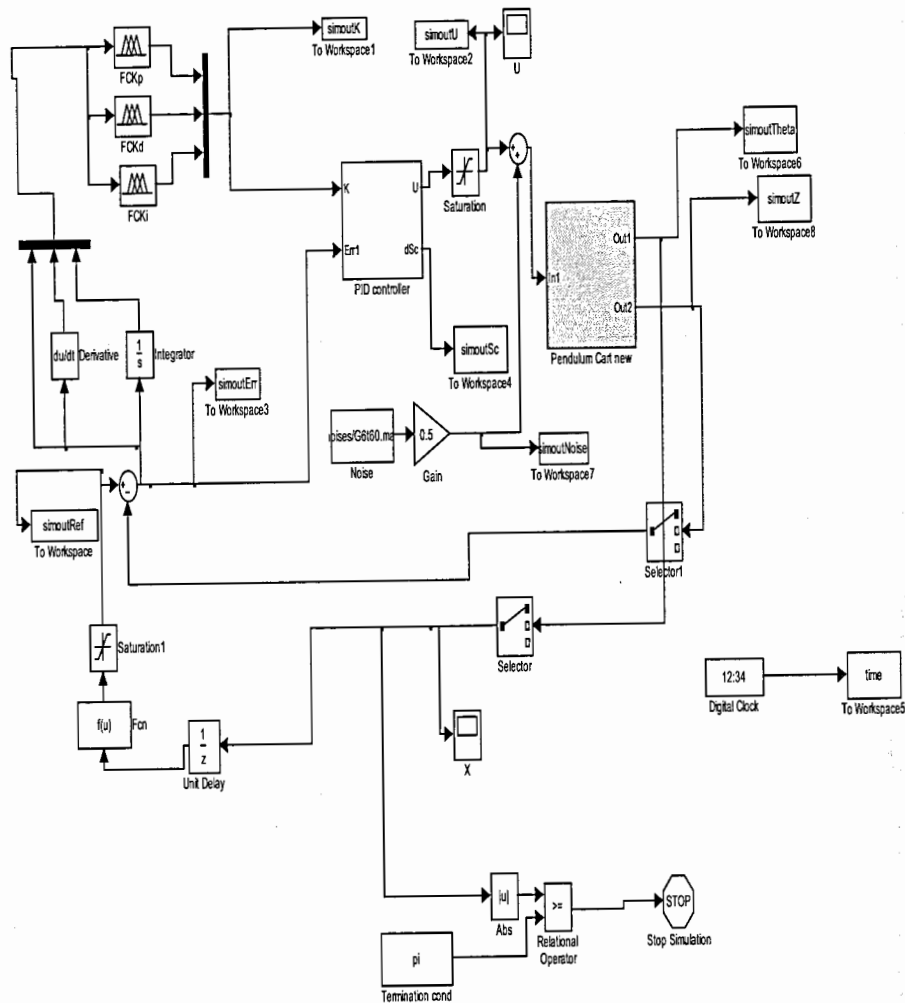


Рис. 3.45. MATLAB-модель системы управления в инструментарии ANFIS

Для данной ANFIS-конфигурации нечеткого регулятора показано (рис. 3.46) сравнение результатов моделирования поведения маятника (угол его отклонения от вертикали) при различных типах управления: НР на основе инструментария ANFIS (график в виде штрихпунктирной линии с пометкой «Anfis-based model»), НР на основе инструментария ОБЗ (график в виде сплошной линии с пометкой «SCO-based model») и классического ПИД-управления (график в виде пунктирной линии с пометкой «Model with PID»).

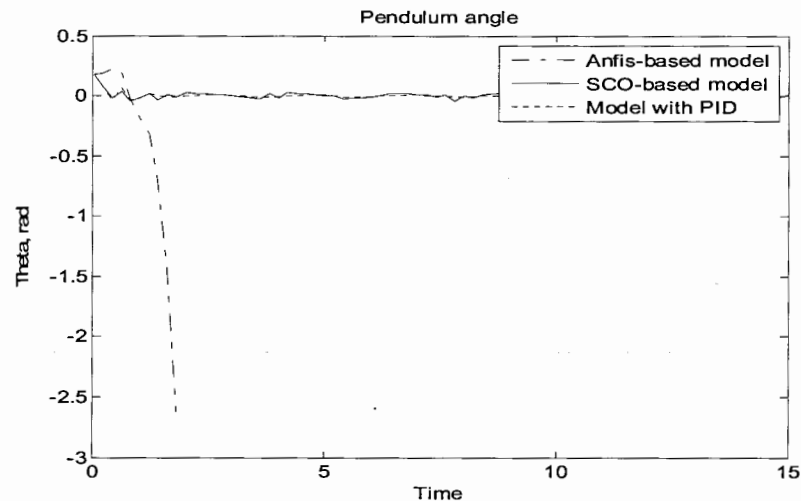


Рис. 3.46. Сравнение результатов моделирования поведения маятника (угол его отклонения от вертикали) при различных типах управления

Результаты моделирования со структурой НР «три входа – три выхода» показывают, что цель управления в модели с ANFIS не достигается, так как маятник падает (рис. 3.46).

Таким образом, мы видим, что система управления в виде нечеткого ПИД-регулятора с *тремя выходами* не поддерживается в инструментарии ANFIS. Поэтому выберем следующую конфигурацию: один коэффициент усиления ПИД-регулятора (например, K_p) управляется нечетким регулятором, а остальные коэффициенты зафиксированы.

В начале процесса проектирования поступим следующим образом. Прежде всего выберем оптимальные постоянные коэффициенты ПИД-регулятора. Это возможно сделать с помощью генетического алгоритма с функцией пригодности, например, в виде минимума интегральной ошибки управления, полученной в результате моделирования на основе разработанной системы стохастического моделирования в среде MATLAB/SIMULINK.

В качестве типовой (обучающей) ситуации управления возьмем ситуацию, описанную в разделе 3.3. Действуя описанным способом, мы получили следующие коэффициенты регулятора:

$$[K_p = 99,61; K_i = 0,39; K_d = 11,76].$$

Следующий шаг – получение с помощью ГА трех обучающих сигналов для управления каждым ПИД-коэффициентом в отдельности, пока остальные два зафиксированы постоянными. Имея в наличии обучающие сигналы, можно спроектировать базы знаний выбранных структур нечетких регуляторов с использованием выбранного инструментария. На рис. 3.47 показано представление функций принадлежности в инструментарии ANFIS для конфигурации ИСУ, в которой K_p управляется нечетким регулятором.

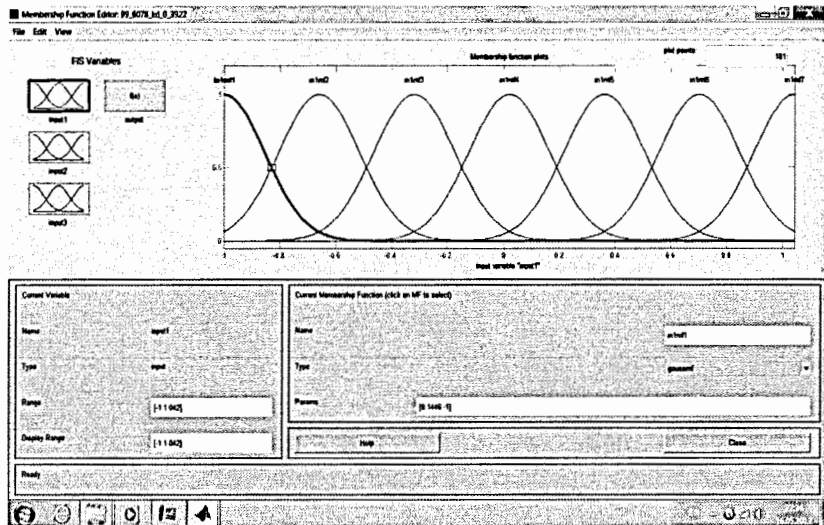


Рис. 3.47. Представление функций принадлежности в инструментарии ANFIS

Для сравнения на рис. 3.48 показано представление функций принадлежности для такой же конфигурации в инструментарии ОБЗ.

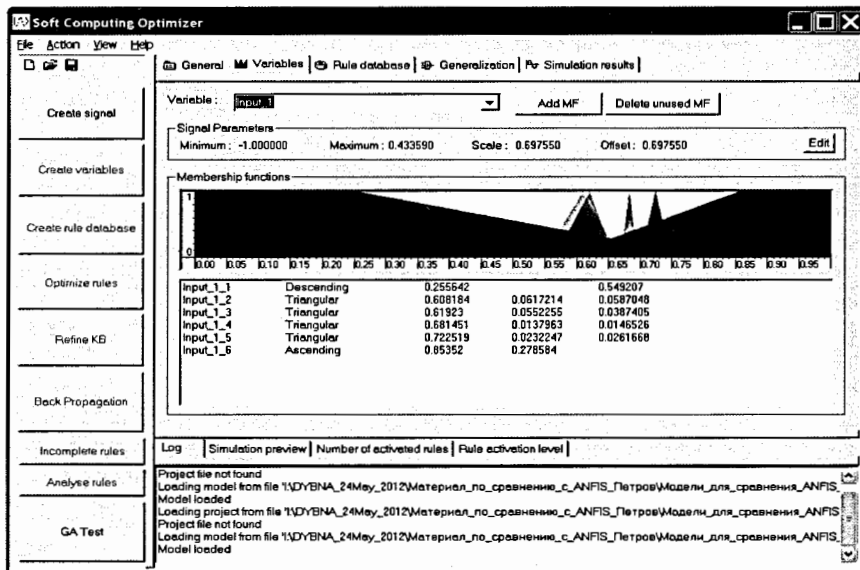


Рис. 3.48. Представление функций принадлежности в инструментарии ОБЗ

На рис. 3.49 и 3.50 показаны представления базы правил в инструментариях ANFIS и ОБЗ.

Выше (в табл. 3.3) представлены характеристики полученных БЗ для трех типов нечетких регуляторов, спроектированных с помощью ОБЗ и ANFIS.

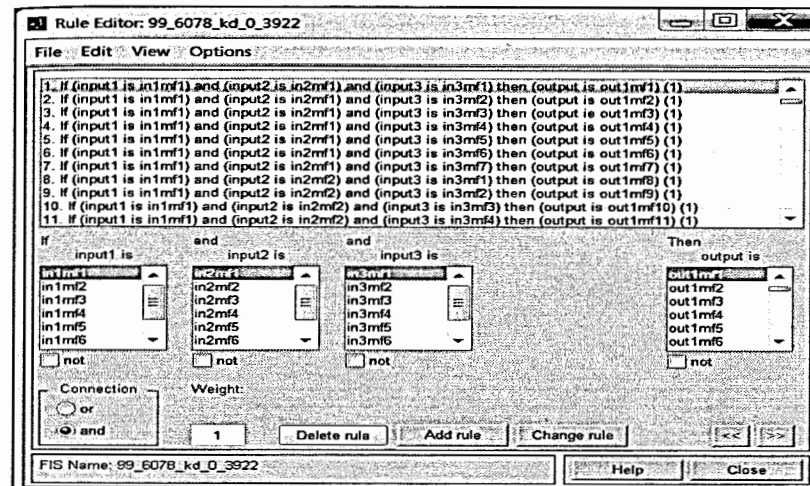


Рис. 3.49. Представление базы правил в инструментарии ANFIS

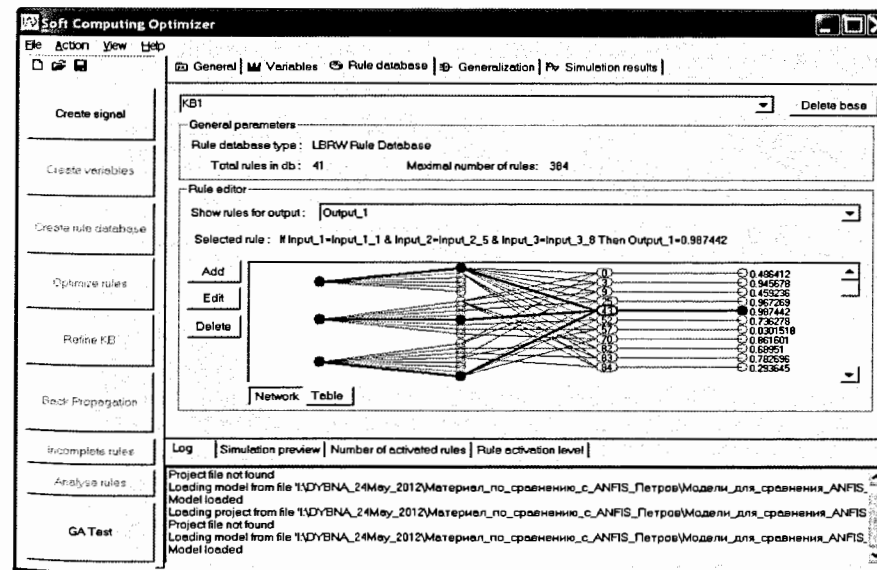


Рис. 3.50. Представление функций принадлежности в инструментарии ОБЗ

- Сравнение качества управления в обучающей ситуации нечетких регуляторов, разработанных с помощью ANFIS и с помощью оптимизатора БЗ. Рассмотрим результаты моделирования управления в обучающей ситуации. Выберем сначала конфигурацию ИСУ, когда коэффициент K_p , ПИД-регулятора управляется нечетким регулятором, а остальные коэффициенты зафиксированы ($K_i = 0,39$, $K_d = 11, 76$).

На рис. 3.51 и 3.52 приведены графики сравнения динамического поведения ОУ и качества управления трех типов регуляторов: НР, спроектированных с помощью ОБЗ; НР, спроектированных с помощью ANFIS и классического ПИД-управления в обучающей ситуации.

Из графиков видно, что модель ИСУ с регулятором, полученным с помощью ANFIS, не справляется с управлением, маятник падает в самом начале моделирования. Модель с регулятором, полученным с помощью ОБЗ, и модель с ПИД-регулятором достигают цели управления. Нечеткий ПИД-регулятор на основе ОБЗ по заданным критериям (минимум интегральной ошибки управления и минимум интегральной обобщенной энтропии) работает лучше, чем модель с ПИД-регулятором.

Допустим, что коэффициент усиления K_d ПИД-регулятора управляется нечетким регулятором, а остальные коэффициенты зафиксированы ($K_p = 99, 61$, $K_i = 0,39$).

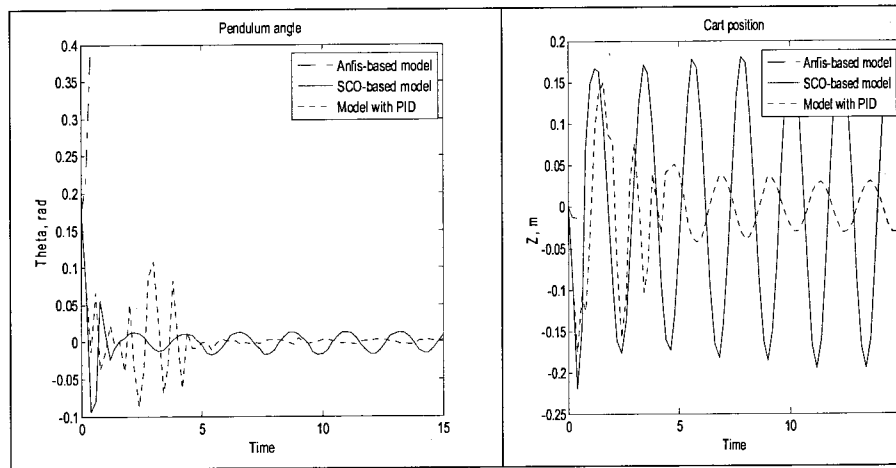


Рис. 3.51. Слева — динамика движения маятника, справа — динамика перемещения каретки

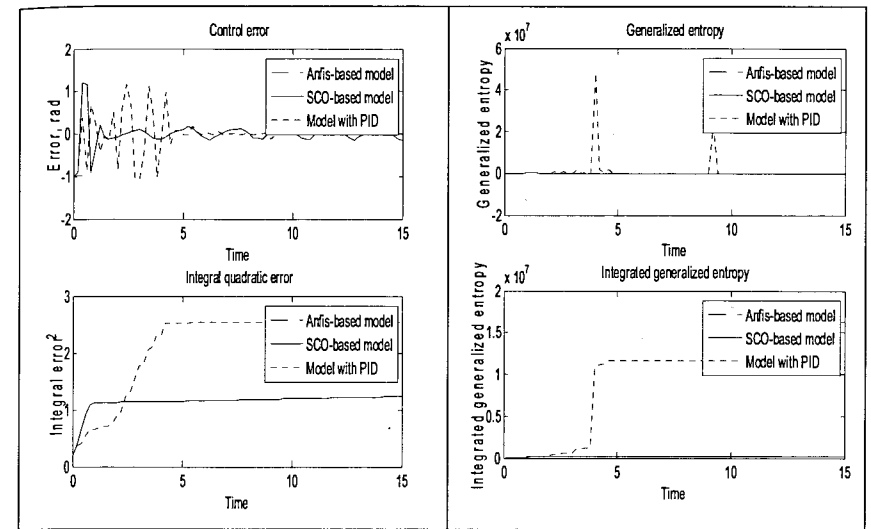


Рис. 3.52. Слева — графики ошибки управления и интегральной ошибки управления, справа — графики производства обобщенной энтропии и интегральная обобщенная энтропия

На рис. 3.53 и 3.54 приведены графики сравнения качества управления регуляторов, спроектированных с помощью ОБЗ, ANFIS, а также классического ПИД-управления в обучающей ситуации. Из графиков видно, что модель ИСУ с регулятором, полученным с помощью ANFIS, не справляется с управлением, маятник падает. Модель с регулятором, полученным с помощью ОБЗ, и модель с ПИД-регулятором достигают цели управления. Модель с ПИД-регулятором хуже по критериям минимума ошибки управления и минимума производства энтропии, чем модель с регулятором на основе ОБЗ.

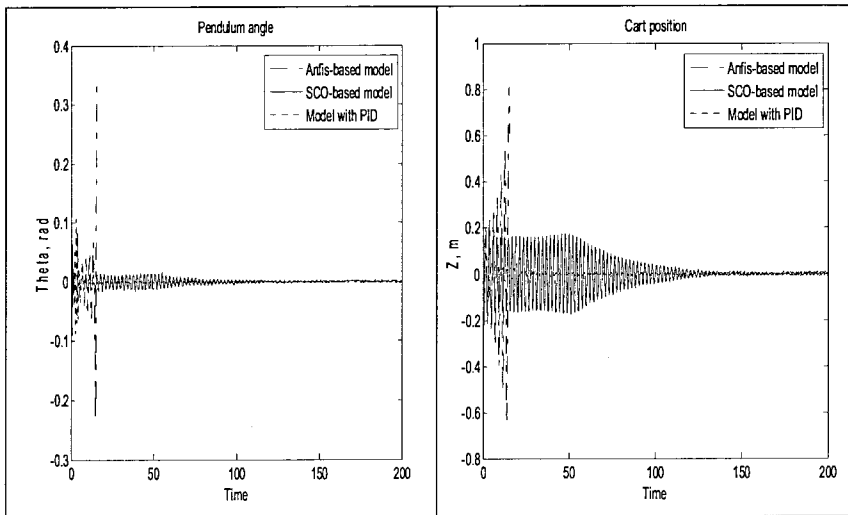


Рис. 3.53. Слева – динамика движения маятника, справа – динамика перемещения каретки

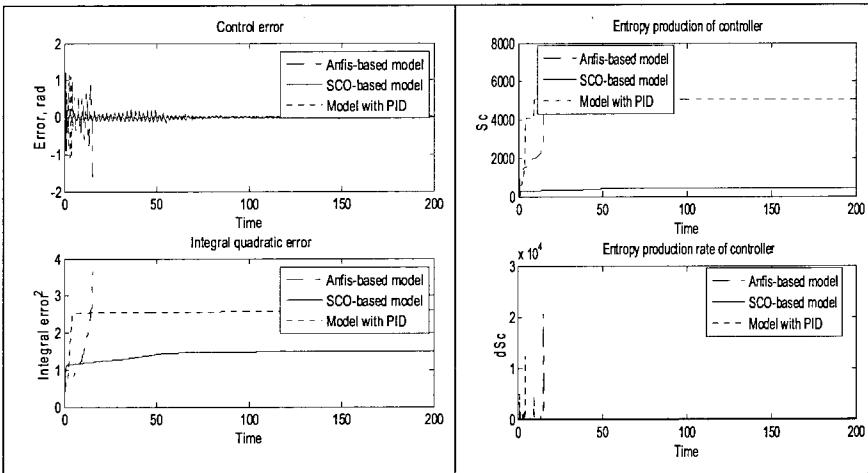


Рис. 3.54. Слева – графики ошибки управления и интегральной ошибки управления, справа – графики производства энтропии в регуляторах и скорость производства энтропии в регуляторах

Рассмотрим случай, когда коэффициент K_i ПИД-регулятора управляется нечетким регулятором, а остальные коэффициенты зафиксированы ($K_d = 11,76$, $K_p = 99,61$).

На рис. 3.55 и 3.56 приведены графики сравнения качества управления регуляторов, спроектированных с помощью ОБЗ, ANFIS, а также с классическим ПИД-управлением в обучающей ситуации.

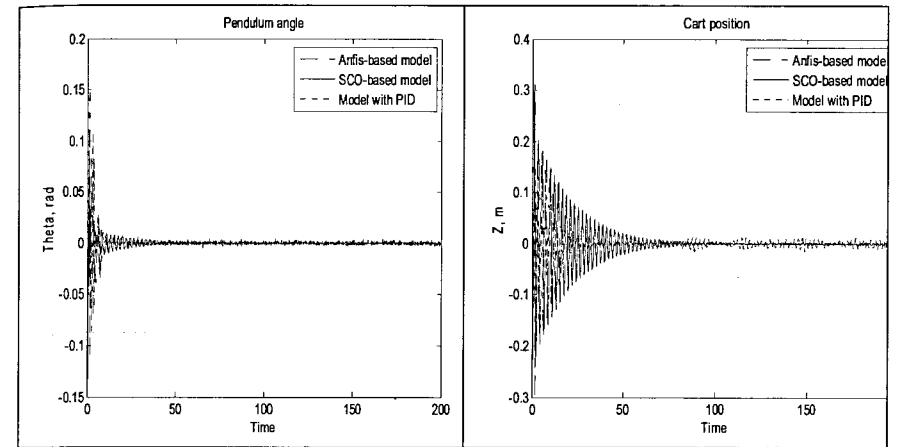


Рис. 3.55. Слева – динамика движения маятника, справа – динамика перемещения каретки

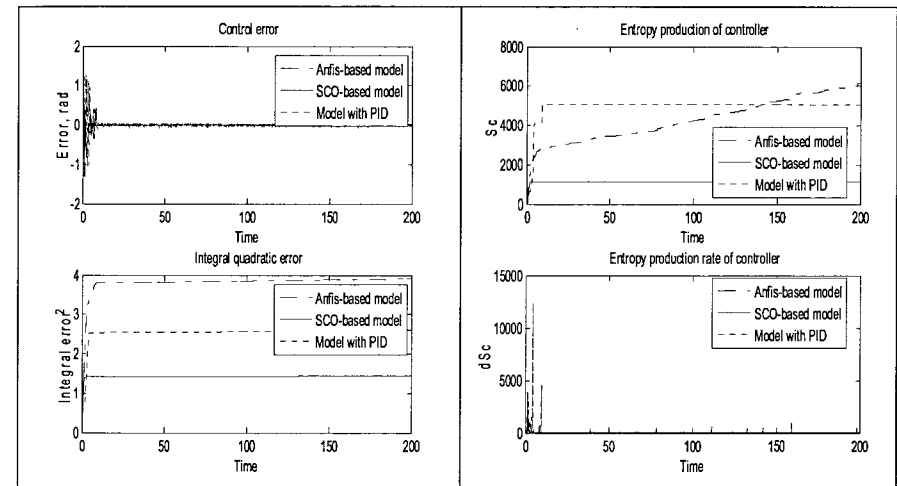


Рис. 3.56. Слева – графики ошибки управления и интегральной ошибки управления, справа – графики производства энтропии в регуляторах и скорость производства энтропии в регуляторах

Из графиков видно, что все три модели ИСУ достигают цели управления. Модель управления с регулятором на основе ОБЗ стабилизирует маятник раньше и имеет минимальную интегральную ошибку управления.

• Сравнение робастности управления нечетких регуляторов, разработанных с помощью ANFIS и с помощью оптимизатора БЗ. Проведем исследование качества управления полученных регуляторов в непредвиденных ситуациях. Введем две

непредвиденные ситуации управления, с характеристиками, представленными в табл. 3.4.

Рассмотрим случай, когда коэффициент K_i ПИД-регулятора управляется нечетким регулятором, а остальные коэффициенты зафиксированы ($K_d = 11,76$, $K_p = 99,61$).

На рис. 3.57 и 3.58 приведены графики сравнения качества управления и робастности регуляторов, спроектированных с помощью ОБЗ, ANFIS, а также с классическим ПИД-управлением в непредвиденной ситуации S1 из табл. 3.5.

Таблица 3.5.

Непредвиденная ситуация управления S1	
Шум в канале управления	Рэлеевский шум
Задержка в канале обратной связи	0,003 с
Непредвиденная ситуация управления S2	
Шум в канале управления	Равномерно распределенный шум
Задержка в канале обратной связи	0,005 с

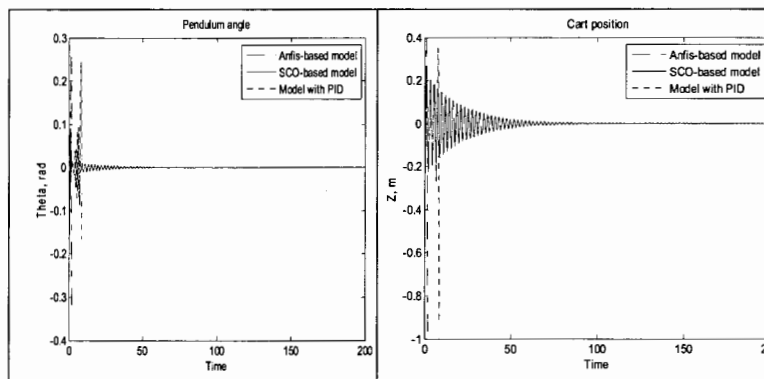


Рис. 3.57. Слева — динамика движения маятника, справа — динамика перемещения каретки. Ситуация S1

Выводы. Результаты моделирования показали, что регулятор, полученный с помощью ОБЗ, успешно справляется с задачей управления в ситуации S1, маятник сбалансирован. Остальные два регулятора не обладают свойством робастности, маятник падает.

На рис. 3.59 и 3.60 приведены графики сравнения регуляторов, спроектированных с помощью ОБЗ, ANFIS, а также под управлением ПИД-регулятора в непредвиденной ситуации S2 из табл. 3.5.

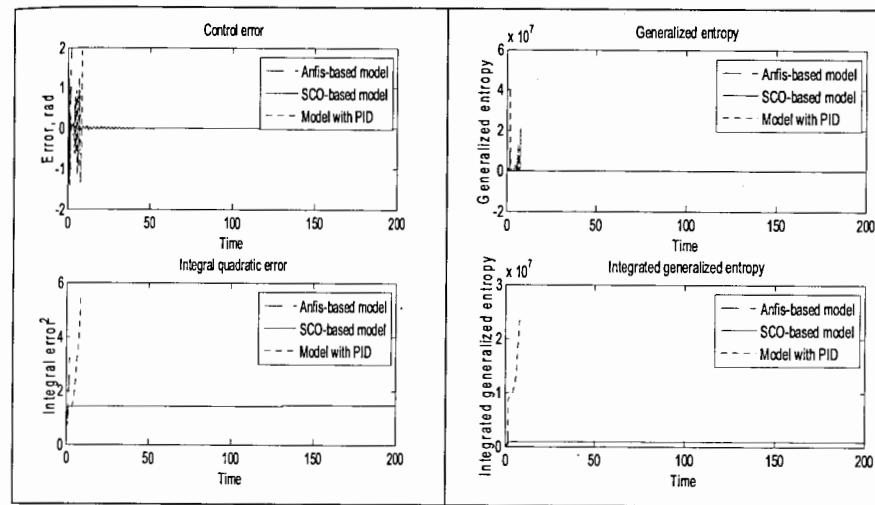


Рис. 3.58. Слева — графики ошибки управления и интегральной ошибки управления, справа — графики производства обобщенной энтропии и интегральная обобщенная энтропия. Ситуация S1

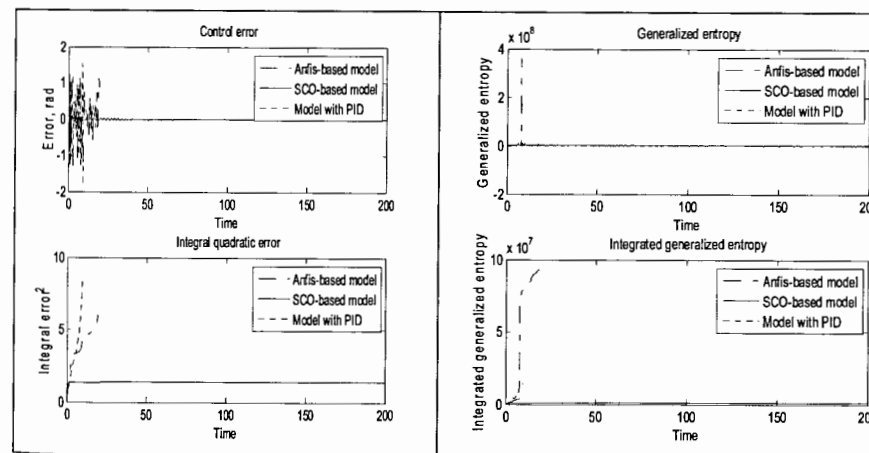


Рис. 3.59. Слева — динамика движения маятника, справа — динамика перемещения каретки. Ситуация S2

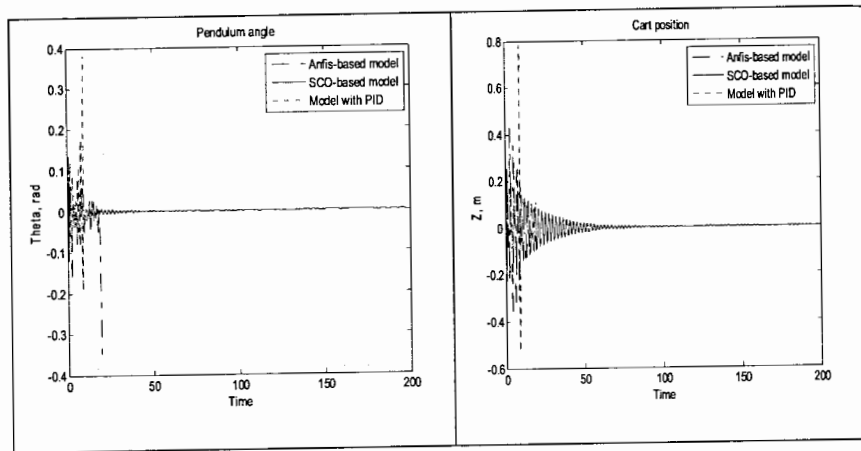


Рис. 3.60. Слева – графики ошибки управления и интегральной ошибки управления, справа – графики производства обобщенной энтропии и интегральная обобщенная энтропия. Ситуация S2

Таким образом, результаты моделирования показали, что регулятор, полученный с помощью ОБЗ, успешно справляется с задачей управления в ситуации S2, маятник сбалансирован. Регулятор на основе ANFIS и классический ПИД-регулятор не справляются с задачей управления в данной непредвиденной ситуации управления. Полученные результаты позволили продемонстрировать эффективность нечетких регуляторов, спроектированных на основе оптимизатора баз знаний, как в типовых ситуациях управления, так и в широком классе нетиповых ситуаций.

Для решения практических прикладных задач, особенно в области проектирования робастных ИСУ, инструментарий ANFIS имеет ряд существенных ограничений:

- определение вида и количества функций принадлежности осуществляется вручную человеком-экспертом;
- невозможность аппроксимации более одного выходного значения;
- невозможность напрямую совмещать создание базы знаний с ее оптимизацией;
- невозможность совместного использования ANFIS с другими интеллектуальными технологиями напрямую в MATLAB.

3.7. Общие выводы

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы.

- Классические системы управления не всегда успешно справляются с задачей управления в случае, если ОУ является глобально неустойчивым и существенно нелинейным в условиях наличия шумов и временной задержки в каналах измерения, а также при наличии стохастических внешних шумов, особенно типа рэлеевских шумов (с несимметричной функцией плотности распределения).

- Полученные результаты позволили продемонстрировать эффективность нечетких регуляторов, спроектированных на основе ОБЗ, как в типовых ситуациях управления, так и в широком классе нетиповых ситуаций. Для успешного управления в

сложных непредсказуемых ситуациях типа S3 потребуется сделать еще один шаг в технологии проектирования ИСУ, а именно применить квантовые алгоритмы самоорганизации баз знаний.

- На основе новых видов вычислений и разработанного нового инструментария ОБЗ можно проектировать робастные интеллектуальные системы управления, способные функционировать не только на множестве типовых и близких к ним ситуаций, но и на множестве новых (непредвиденных) ситуаций управления.

3.8. Заключение

Полученные результаты позволяют сделать следующие обобщения.

- ❖ Нечеткие контроллеры, основанные на традиционных инструментариях мягких вычислений, в которых структура нечеткой нейронной сети строится вручную экспертом, уступают в качестве управления и робастности нечетким контроллерам, построенным на основе оптимизатора баз знаний.
- ❖ Результаты моделирования глобально неустойчивых и существенно нелинейных объектов управления показали, что описанные технологии проектирования ИСУ и инструментарий ОБЗ позволяют добиться высоких качеств управления и робастности, несмотря на непредсказуемые изменения широкого класса факторов, таких как шумы и помехи, параметры модели ОУ, задержки в каналах измерения и др., в то время как классические системы управления не всегда успешно справляются с задачей управления в указанных случаях.
- ❖ Исследование более сложных ОУ, неустойчивых по части обобщенных координат ОУ типа глобально неустойчивых (по одной оси) и локально неустойчивых (по другой оси), дает аналогичный эффект.

Рекомендуемая литература к главе 3

1. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: Технологии мягких вычислений. М.: ВНИИгеосистем, 2011.
2. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Проектирование робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. ТИСУ. 2006. № 5. С. 102 – 141.
3. Нефедов Н. Ю., Петров С. П., Полушин А. С., Литвинцева Л. В. Методы построения баз знаний для управления нелинейными динамическими системами // Системный анализ в науке и образовании: электрон. научн. журнал. Дубна, 2011. №2 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/11> (дата обращения: 24.07.2011). Идентификационный номер: 0421100111\0008.
4. Nanayakkara T., Jamshidi M., Sahin F. Intelligent control systems with an introduction to system of systems engineering. CRC Press, 2009.
5. Гостев В.И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радио і матор, 2008.
6. Интеллектуальные системы управления (С.Н. Васильев, ред.). М.: Машиностроение, 2010.
7. Ponce-Cruz P., Ramirez-Figueroa F.D. Intelligent control systems with Lab VIEW™. Berlin: Springer Verlag, 2010.
8. Коломейцева М.Б., Хо Д.Л. Адаптивные системы управления динамическими объектами на базе нечетких регуляторов. М.: Компания Спутник+, 2002.
9. El-Naggar A.A. Intelligent control. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.

10. *Kuljaca O., Lewis F., Horvat K.* Intelligent control of industrial and power systems: Adaptive neural network and fuzzy systems. LAP Lambert Academic Publishing, 2012.
11. *Patel J., Gianchandani R.* ANFIS control for robotic manipulators: Adaptive neuro fuzzy inference systems for intelligent control. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
12. *Chiang C.-H.* Soft computing based intelligent control systems and applications: The lifelong learning control systems. LAP Lambert Academic Publishing, 2011.
13. *Feng G.* Analysis and synthesis of fuzzy control systems: A model-based approach. Publ.: CRC Press, 2010.
14. *Castillo O., Melin P., Pedrycz W.* Soft computing for hybrid intelligent systems. Publ.: Springer, 2008.
15. *Kai M.* Fuzzy control: Fundamentals, stability and design of fuzzy controllers. Publ.: Springer, 2006.
16. *Нукифоров В.О., Слута О.В., Ушаков А.В.* Интеллектуальное управление в условиях неопределенности. Учебное пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011.
17. *Castillo O.* Type-2 fuzzy logic in intelligent control applications. Publ.: Springer, 2011.
18. *Уткин В. И.* Скользящие режимы и их применения в системах с переменной структурой. М., 1974.
19. *Нефедов Н. Ю., Ульянов С. В.* Нечеткий регулятор со скользящим режимом на основе мягких вычислений: сравнение с инструментарием FIS и ANFIS. //Электронный журнал «Системный анализ в науке и образовании». 2013. №1.
20. *Литвинцева Л. В., Ульянов С. В., Ульянов С. С.* Построение робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. ТИСУ, 2006. № 5.
21. *Yau H. T., Kuo C. L.* Fuzzy sliding mode control for a class of chaos synchronization with uncertainties //Int. J. Nonl. Sci. Num. Simul. 2006. V. 7. P. 333 – 338.
22. *Shieh M.* Switching-type fuzzy sliding mode control of a cart-pole system. V. 10, Issues 1–2. Mechatronics, 2000.
23. Fuzzy Logic Toolbox™ User's Guide R2012b. The MathWorks, Inc. 1995–2012.
24. *Jang J.S.* Neuro-Fuzzy and Soft Computing. Prentice Hall. 1997. P. 335–368.

Контрольные вопросы к главе 3

1. Структура нечеткого ПИД-регулятора на мягких вычислениях.
2. Проектирование БЗ для нечеткого ПИД-регулятора.
3. Недостатки нечеткой нейронной сети ANFIS.
4. Проектирование законов управления изменением коэффициентов усиления нечеткого ПИД-регулятора.
5. Исследование робастности нечеткого ПИД-регулятора в непредвиденных ситуациях управления.
6. Проектирование БЗ в ситуациях обучения.
7. Преимущества ОБЗ на мягких вычислениях.
8. Проектирование и извлечение знаний из обучающего сигнала.

Глава 4. Проектирование ИСУ для динамически неустойчивого объекта «каретка – перевернутый маятник» на основе оптимизатора баз знаний

Рассматриваются практические вопросы проектирования ИСУ на примере динамически неустойчивого ОУ типа «каретка – перевернутый маятник» с использованием ОБЗ на мягких вычислениях. Приводится описание математической модели и технической системы ОУ. Подробно рассматривается алгоритм верификации компьютерной модели и макета с использованием генетического алгоритма. Приводятся различные варианты проектирования БЗ для ИСУ с использованием и без использования математической модели. Рассматривается возможность удаленной настройки базы знаний с использованием дистанционного соединения реального объекта управления с ОБЗ.

4.1. Проектирование ИСУ и верификация физической модели ОУ

Разработка корректного алгоритма проектирования требуемого уровня робастности ИСУ является одной из актуальных задач современной теории и систем управления; одновременно данная проблема относится к сложной и слабо исследованной области разработки ИСУ, способных эффективно и надежно функционировать в условиях риска и непредвиденных ситуаций управления. Применение ИВ в задачах проектирования робастного управления показало на практике повышение надежности функционирования ОУ в непредвиденных ситуациях управления за счет повышения интеллектуальности нижнего исполнительского уровня в виде традиционных структур САУ. Эффективность разработанной технологии проектирования ИСУ рассматривается на примере вопросов проектирования ИСУ традиционного типа теории систем управления неустойчивого ОУ типа «каретка – перевернутый маятник» с использованием ОБЗ на мягких вычислениях.

4.1.1. Математическая и компьютерная модель системы

Управление объектом типа «каретка – перевернутый маятник» является одной из типовых задач в теории управления, так как решение этой задачи наглядно демонстрирует проверяемое (требуемое) качество САУ. Рассмотрим динамику модели в виде одноосевой каретки (рис. 4.1) с перевернутым маятником, закрепленным на оси.

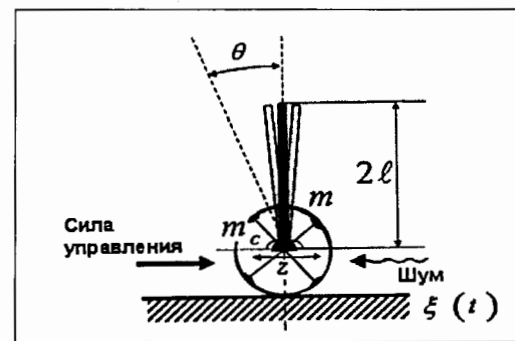


Рис. 4.1. Модель системы «каретка – перевернутый маятник»

Динамика этого ОУ может быть описана системой дифференциальных уравнений второго порядка ((3.4), глава 3), выводимых с учетом сил трения и упругости из баланса моментов вращения и баланса проекций сил на горизонтальную ось Z. Уравнения для скорости изменения энтропии (3.5) также даны в главе 3.

В уравнениях (3.4) и (3.5) для рассматриваемой модели z и θ – обобщенные координаты перемещения и вращения; g – ускорение свободного падения; m_c – масса оси и колес; m – масса стержня маятника длиной $2l$; k и a_1 – коэффициенты трения движения и вращения соответственно; a_2 – сила упругости; $\xi(t)$ – внешний стохастический шум, а u – сила управления.

Динамическая система обладает *глобальной динамической неустойчивостью*, при отсутствии управляющей силы происходит неограниченный рост угла отклонения, т. е. маятник падает.

Задача управления системой состоит в том, чтобы, воздействуя с помощью силы управления на тележку, удерживать (стабилизировать) маятник в вертикальном положении (угол отклонения оси маятника от вертикали 0) в условиях изменения среды функционирования.

Структура компьютерной модели «каретка – перевернутый маятник», выполненная в среде моделирования MATLAB/SIMULINK, представлена на рис. 4.2.

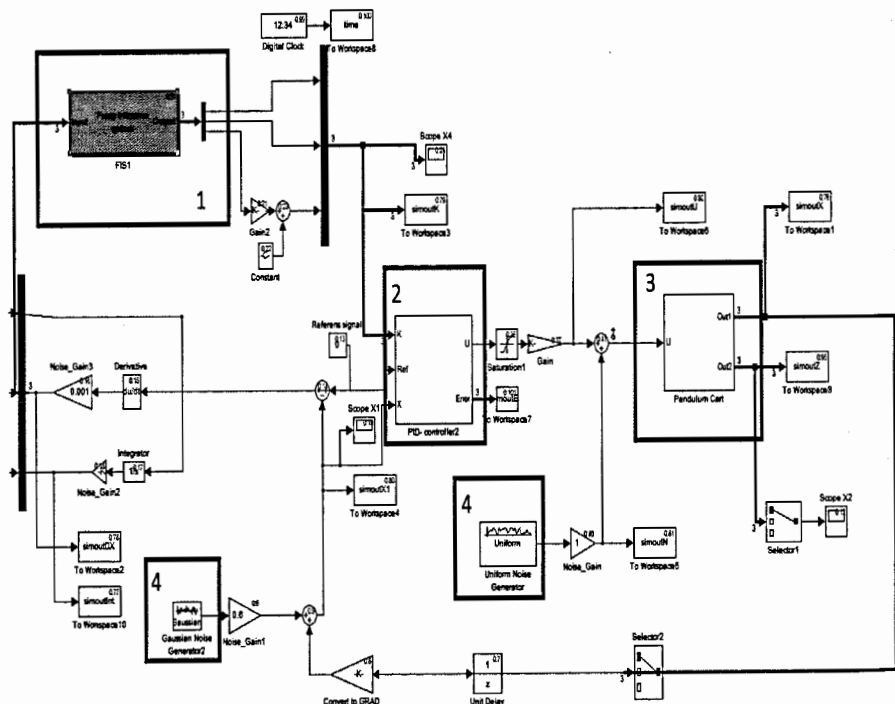


Рис. 4.2. Структура системы моделирования: 1 – блок нечеткого вывода; 2 – ПИД-регулятор; 3 – объект управления; 4 – генераторы шумов

Модель включает в себя ПИД-регулятор, шумы в системе управления и измерения, а также блок, формирующий сигнал для регулятора.

Данная компьютерная модель используется для получения обучающего сигнала и настройки БЗ с использованием ОБЗ.

В качестве модели управления данной системой будем использовать следующее выражение для подсчета управляющего воздействия:

$$u(t) = k_p(t)e(t) + k_i(t) \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d(t)\dot{e}(t). \quad (4.1)$$

В соответствии со схемой управления (4.1) будем использовать ПИД-регулятор в контуре глобальной отрицательной обратной связи.

4.1.2. Макет системы

Данный ОУ является типовым (Benchmark) для тестирования программного инструментария робастного интеллектуального управления.

Примеры подобных систем представлены на рис. 4.4.

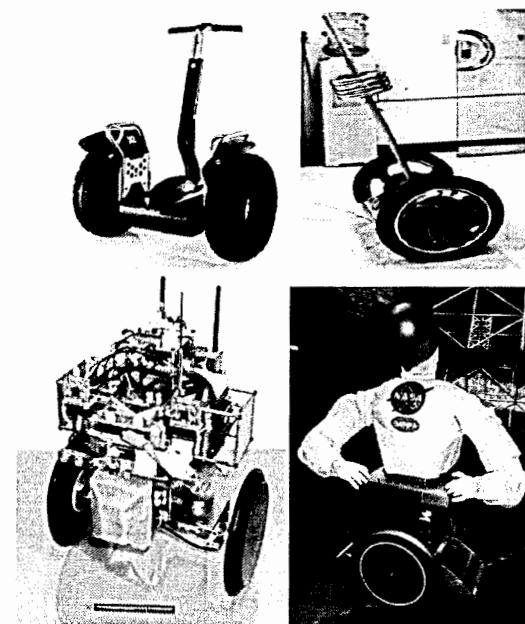


Рис. 4.4. Физические аналоги рассматриваемого ОУ

Рассмотрим подробнее устройство подобного макета ОУ.

На рис. 4.5 представлен макет (рис. 4.5, а), используемый для тестирования технологий проектирования ИСАУ с использованием ОБЗ, и стенд (рис. 4.5, б) для проведения экспериментальных исследований.

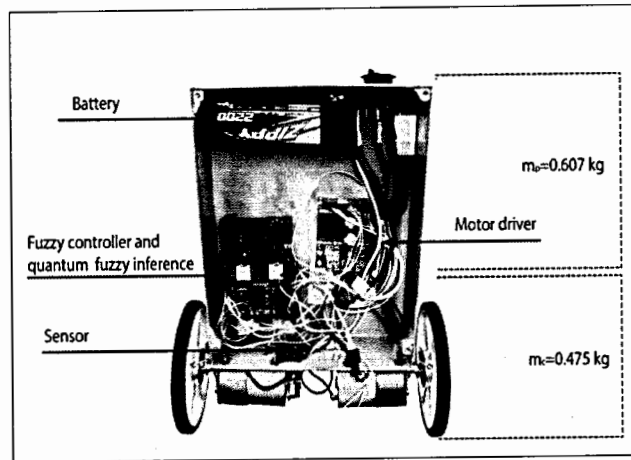


Рис. 4.5, а. Макет системы «каретка - перевернутый маятник»

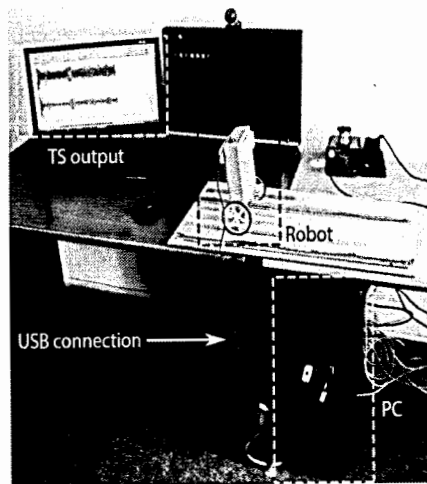


Рис. 4.5, б. Стенд для проведения экспериментов

TS output – представление обучающего сигнала с модели; Robot – физический макет ОУ; USB connection – кабельное удаленное соединение компьютера и макета; PC – персональный компьютер

Стенд оборудован различными покрытиями для проведения экспериментов с макетом, в том числе для моделирования непредвиденных ситуаций управления. Также на стенде имеется возможность устанавливать определенный начальный угол для запуска макета.

В качестве измерительной системы (рис. 4.5, Sensor) в макете используется плата с комбинацией датчиков – гироскопа и акселерометра – 5 DoF (пять степеней свободы) IDG500/ADXL335.

Ядром и центральным элементом системы является микроконтроллер компании Microchip® Chirkit, основанный на процессоре PIC32MX320F128. Плата оборудована USB-разъемом для передачи данных с процессора на компьютер. Интерфейс USB используется при проведении экспериментов для передачи и приема данных (угла отклонения и величины управляющего воздействия), а также для удаленной настройки, речь о которой пойдет ниже. Подключение датчиков осуществляется с использованием аналоговых входов микроконтроллера.

Базовые функции программ макета представлены на рис. 4.6, обобщенно их можно записать в псевдокод:

- измерение;
- фильтрация;
- управление;
- подсчет времени (задержка).

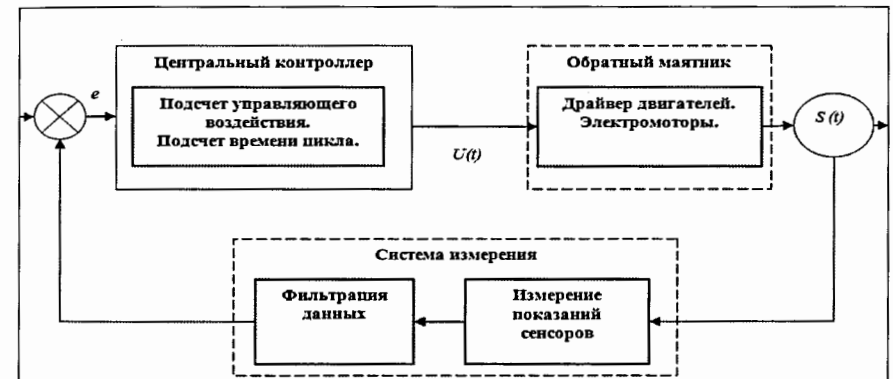


Рис. 4.6. Алгоритм программы микроконтроллера

Алгоритм работы макета системы, представленный на рис. 4.6, является частным примером САУ с обратной связью.

4.1.3. Верификация математической модели и макета

Прежде чем приступить к поиску коэффициентов и проектированию ИСУ для макета системы, необходимо верифицировать параметры математической модели (3.4).

В табл. 4.1 представлена классификация определенных и неопределенных параметров.

Таблица 4.1.
Определенные и неопределенные параметры

Хромосома ГА	
Определенные	Неопределенные
Масса маятника	Трение в оси
Масса тележки	Коэффициент упругости тележки
Центр тяжести маятника	Люфт в оси
Ограничения на управ-е воздействие	Коэффициент воздействия (нормирующий)
Время такта системы	Шум измерительной системы
ПИД-Коэффициенты	Трение колес о поверхность
Входные и выходные данные регулятора технического изделия (2 тыс. точек).	

Проблема поиска неопределенных параметров может быть решена на основе ГА. Предположительные диапазоны неопределенных параметров являются границами пространства поиска для многокритериальной оптимизации. Хромосома алгоритма состоит из вектора неопределенных параметров, а начальная популяция генерируется случайным способом, разбросом хромосом по пространству поиска.

ГА подбирает набор параметров математической модели так, чтобы динамика работы математической модели соответствовала динамике работы робота (ошибка в виде разницы сигналов от математической модели и физического сигнала минимальна).

Целевая функция алгоритма для верификации основана на дисперсии информации, подаваемой на вход и получаемой на выходе регулятора.

В данном случае в качестве функции пригодности применялась функция вида

$$F(e, u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{Var(e_{mod}) - Var(e_{rob})}{Var(e_{mod})} \right)^2 + \left(\frac{Var(i_{e_{mod}}) - Var(i_{e_{rob}})}{Var(i_{e_{mod}})} \right)^2 + \left(\frac{Var(u_{mod}) - Var(u_{rob})}{Var(u_{mod})} \right)^2}, \quad (4.2)$$

где $Var(e_{mod})$ – дисперсия ошибки управления в модели; $Var(e_{rob})$ – дисперсия ошибки управления в работе; $Var(u_{mod})$ и $Var(u_{rob})$ – дисперсии управляющего воздействия в модели и макете; $Var(i_{e_{mod}})$ и $Var(i_{e_{rob}})$ – дисперсии интеграла ошибки управления модели и макета соответственно.

После проведения верификации найденные параметры подставляются в модель и далее производится поиск коэффициентов для ПИД-регулятора. Для этого используется ГА, хромосомой которого являются коэффициенты усиления, а функцией пригодности – функция оценки качества управления, например, следующего вида (подробнее механизм подбора коэффициентов усиления для ПИД-регулятора рассматривается ниже):

$$f(x_r) = \frac{1}{1 + \int_0^t e^2 dt}, \quad (4.3)$$

где e – величина отклонения от задающего сигнала; t – диапазон интегрирования, равный времени проверки одного решения.

Далее коэффициенты тестируются на макете по схеме на рис. 4.7.

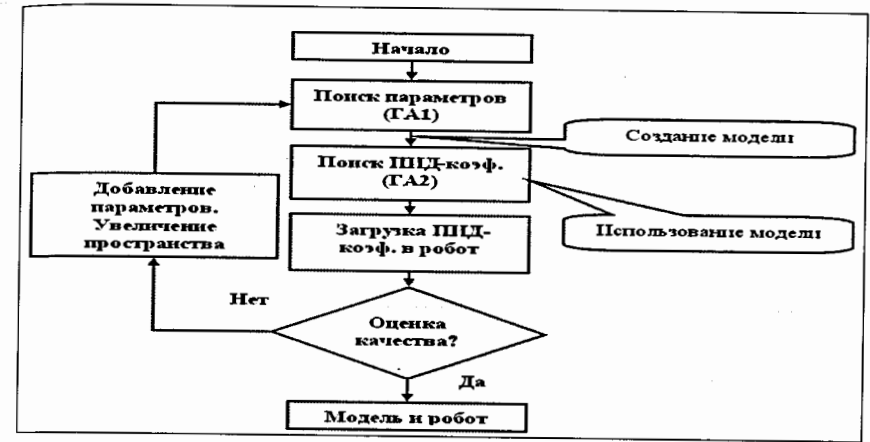


Рис. 4.7. Алгоритм верификации с использованием ГА

Примечание. В случае неудовлетворительного результата следует, если это возможно, провести повторно идентификацию системы – уменьшить или увеличить количество неопределенных параметров путем фиксации одного или нескольких из них в математической модели, с соответствующим увеличением пространства поиска параметров.

Результаты верификации математической модели и макета системы в виде графиков ошибки управления и управляющего воздействия представлены на рис. 4.8 и 4.9.

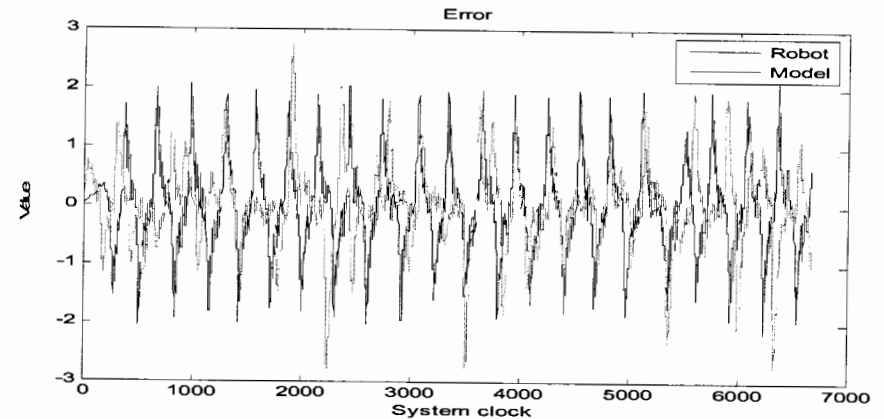


Рис. 4.8. Угол отклонения макета и модели

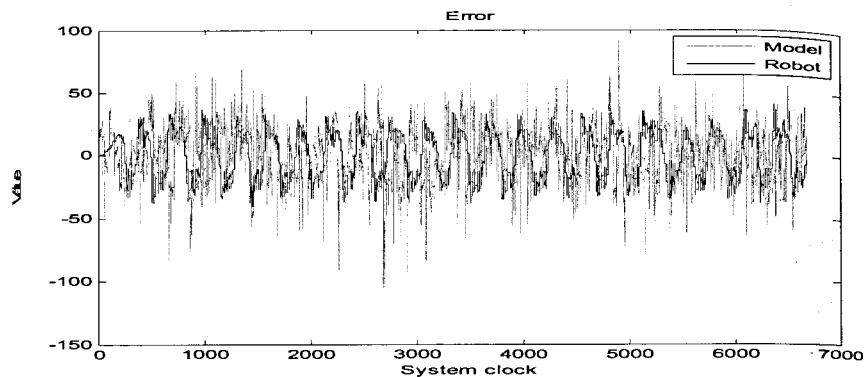


Рис. 4.9. Управляющее воздействие макета и модели

Требуется достичь высокого уровня пригодности проверяемого решения при верификации. Для данного случая алгоритм закончил работу со значением функции пригодности $Fit = 0,9847$.

В табл. 4.2 представлены значения дисперсии входного и выходного сигнала ПИД-регулятора, макета и модели на одинаковом интервале времени.

Таблица 4.2.

Дисперсии входных и выходных данных макета и модели

	Макет	Модель
Дисперсия ошибки управления	0,566	0,511
Управляющее воздействие	336	389

Дополнительно в табл. 4.3 представлены критерии, позволяющие определить качество верификации. В качестве основного показателя используется разность значений, показанных на графиках.

Таблица 4.3.

Критерии качества верификации

Формулы для вычисления	Ошибка управления	Управляющее воздействие
$F(e_r, e_m) = \frac{\int_0^T (e_t^{robot} - e_t^{model})^2}{T}$	0,94	6,94
$F(e_r, e_m) = \frac{\int_0^T \ e_t^{robot} - e_t^{model}\ }{T}$	0,54	10,6

T – время моделирования с шагом t ; e_t^{robot}, e_t^{model} – значения ошибки управления или управляющего воздействия в момент времени t .

На рис. 4.10 и 4.11 представлены в графическом виде результаты верификации, т. е. разность между величинами угла отклонения и управляющего воздействия для макета и математической модели соответственно.

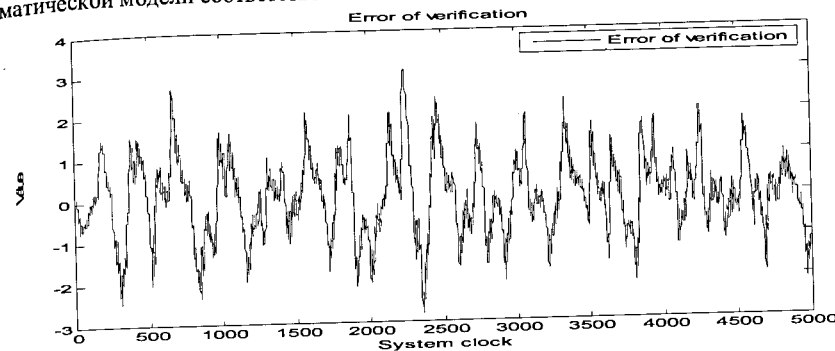


Рис.4.10. Разность величин углов отклонения у модели и макета

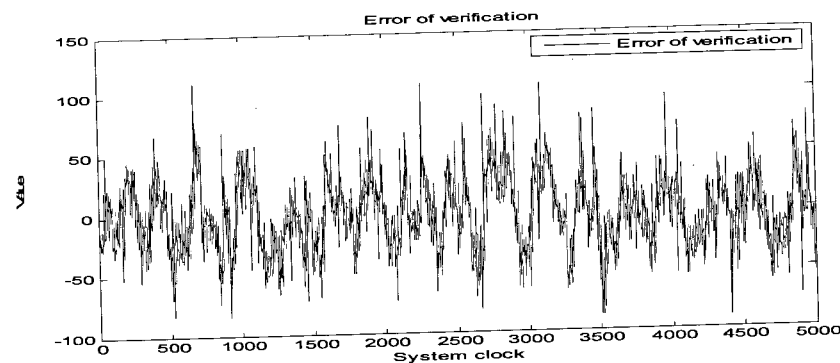


Рис.4.11. Разность величин управляющего воздействия у макета и модели

На основе верифицированной модели, включающей в себя подобранные недоопределенные параметры (шум управления, интенсивность шума в управлении, коэффициент трения колес о поверхность, коэффициент трения в оси вращения, коэффициент упругости и т. д.), возможно создание БЗ с использованием программного инструментария ОБЗ.

Дальнейшее моделирование проводилось с использованием верифицированной модели.

4.1.4. Настройка ПИД-регулятора и проектирование нечетких регуляторов

Рассмотрим вариант классического управления на основе ПИД-регулятора. Для данного глобально неустойчивого ОУ подобрать «вручную» коэффициенты усиления даже в простейшем случае (при отсутствии шумов и времени задержки в канале

измерения) достаточно трудно. Поэтому будем искать эти коэффициенты с помощью ГА. Назовем этот процесс «ГА – ПИД-регулятор».

В общем виде схема алгоритма САУ с ГА имеет следующий вид (рис. 4.12).

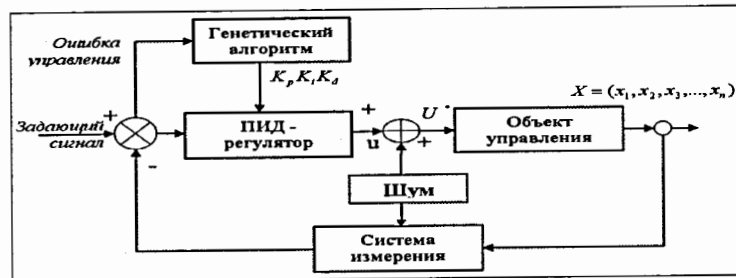


Рис.4.12. Блок-схема САУ с системой адаптации

Применительно к настройке ПИД-регулятора каждое решение представляет значения коэффициентов усиления, сложенные в одну хромосому. Начальная популяция может быть получена случайным образом или путем экспертной оценки из предварительно проведенных экспериментов. Так как операции скрещивания и мутации работают с закодированными параметрами, коэффициенты кодируются в бинарную форму с заданной точностью, соответствующей длине бинарной строки. Также определяются диапазоны поиска коэффициентов. Применительно к данной системе диапазоны поиска коэффициентов равны $k_p[1; 7]$, $k_i[0,5; 2,5]$, $k_d[1; 7]$. Для настройки коэффициентов усиления ПИД-регулятора используем следующую функцию пригодности:

$$f(x_r) = \frac{1}{1 + t \cdot \int_0^T e^2 dt}, \quad (4.4)$$

где t – момент времени моделирования или эксперимента; T – время проверки одного решения; e – угол отклонения. Диапазоном интегрирования является период проверки одного решения.

В этом случае большим значениям функции пригодности соответствуют малые значения ошибки управления и, следовательно, лучшее качество управления ПИД-регулятора.

Настройка ПИД-регулятора с использованием модели и генетического алгоритма не должна вызывать трудностей. Однако применительно к реальному ОУ следует уделить особое внимание выбору временного периода оценки решения и выбрать его, исходя из динамических и информационных свойств работы контроллера и системы в целом.

Рассмотрим подробнее алгоритм настройки ГА – ПИД-регулятора на макете (реальном объекте) САУ (рис. 4.13).

После каждой итерации робот управляется с использованием найденного лучшего решения. Это позволяет ГА продолжать работу, не потеряв управления макетом.

Введение экстремального управления осуществляется в момент достижения величиной отклонения определенного заранее порога. В моменты работы операторов селекции, скрещивания и мутации процессорное время занято обработкой данных и нахождением решений, а управляющее воздействие подсчитывается при лучших коэффициентах k_p , k_d , k_i .

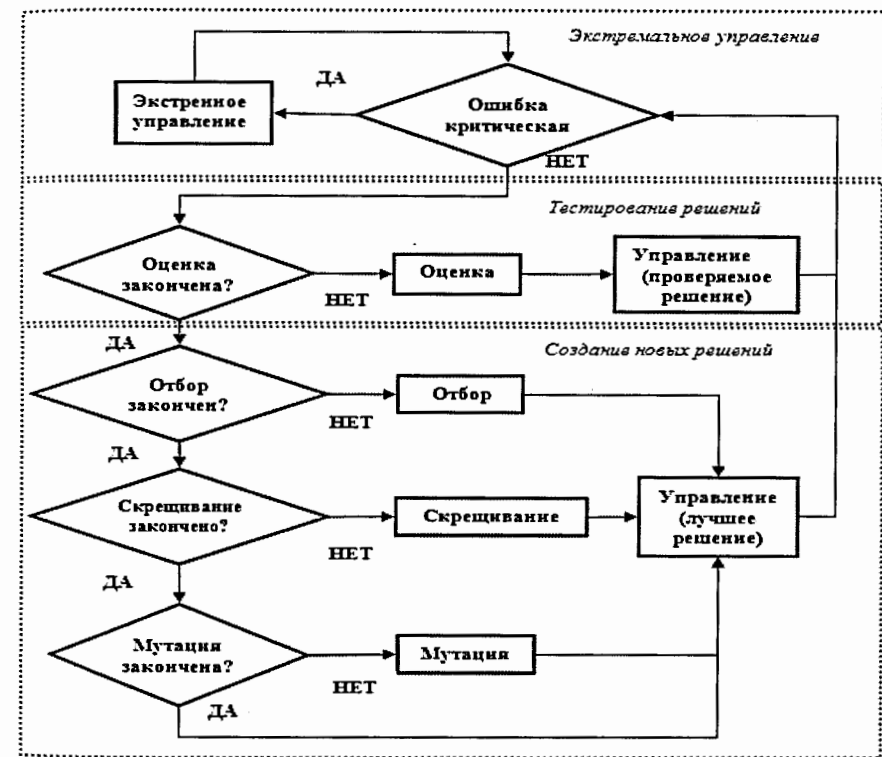


Рис. 4.13. Алгоритм адаптации ГА – ПИД-регулятора

Графики изменения коэффициентов такой системы управления представлены на рис. 4.14.

Подобный алгоритм адаптации можно использовать для настройки ПИД-регулятора в режиме реального времени без использования математической модели.

Такой алгоритм управления не является оптимальным с точки зрения эффективности управления и использования ресурсов контроллера – объема памяти и быстродействия. Полученные экспериментальные результаты показывают, что система управления на основе ГА – ПИД-регулятора уступает в росте интегральной квадратичной ошибки ПИД-регулятору.

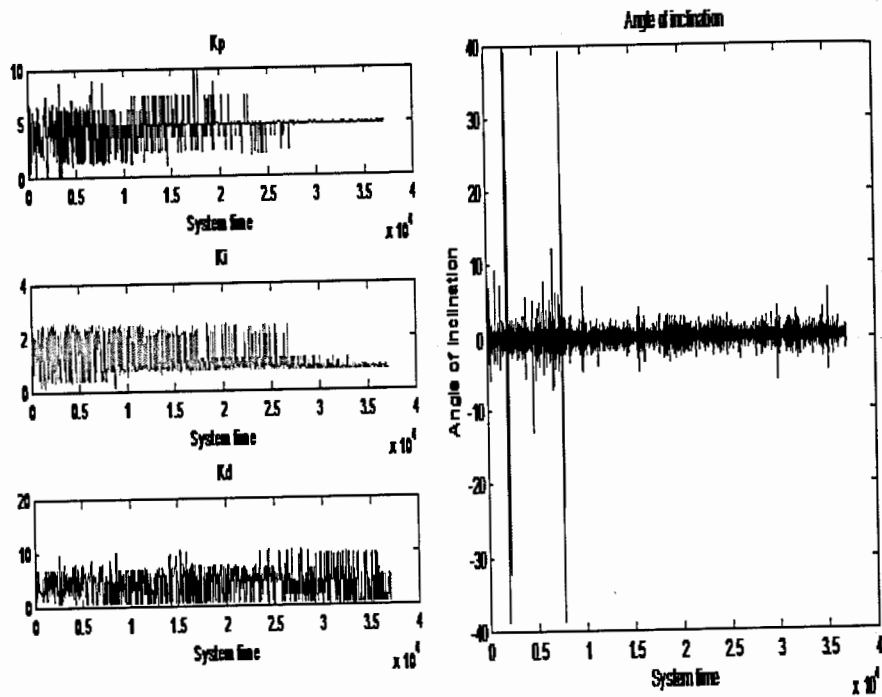


Рис. 4.14. Слева – коэффициенты ГА – ПИД-регулятора в экспериментах с макетом, справа – угол отклонения макета ГА – ПИД-регулятора

Связан этот факт с самим процессом адаптации робота: снижая качество управления, ГА – ПИД-регулятор повышает свою адаптивность.

Как можно видеть на рис. 4.14, в процессе функционирования коэффициенты усиления сошлись со следующими значениями: $k_p = 4,9$, $k_i = 0,7$, $k_d = 4$.

4.1.4.1. Получение ОС с использованием ГА – ПИД-регулятора

Для поставленной выше задачи управления определим структуру ИСУ. Она состоит из НР, управляющего параметрами ПИД-регуляторов, и ОУ, охваченного обратной связью. Подробно эволюция развития структур ИСАУ представлена в главе 2.

Рассмотрим возможность применения ГА – ПИД-регулятора для получения ОС и дальнейшей аппроксимации сигнала на нейронной сети с использованием ОБЗ.

Одним из недостатков ГА является невозможность использования в дальнейшем решений, не попавших в следующее поколение. При документировании решений для стороннего наблюдателя работы алгоритма эти данные превращаются в огромный массив труднодоступной для обработки информации.

На рис. 4.15 слева представлен ОС с макета в виде графика угла отклонения и изменения коэффициентов усиления.

Этот сигнал получен на основе ГА – ПИД-регулятора, рассмотренного в предыдущей части. Представленный массив данных процесса обучения ОУ и выделенные участки являются «знаниями» о коэффициентах усиления.

Очевидно, что информация о процессе обучения робота содержит в себе знания (с точки зрения выбранного критерия качества) о пригодности проверяемых решений.

Важно отметить, что количество этих знаний растет в процессе обучения. В первых поколениях (при случайном распределении хромосом по пространству поиска) эти знания минимальны, однако с течением времени и сменой поколений количество полезной информации возрастает. В этом массиве данных содержится информация как о возможных состояниях ОУ (угол отклонения), так и о коэффициентах усиления для каждого момента времени.

Результаты экспериментов и моделирования показали, что, используя программный инструментальный ОБЗ, возможно выделить знания из сигнала, полученного в процессе работы ГА в режиме реального времени, с дальнейшим использованием их в БЗ НР.

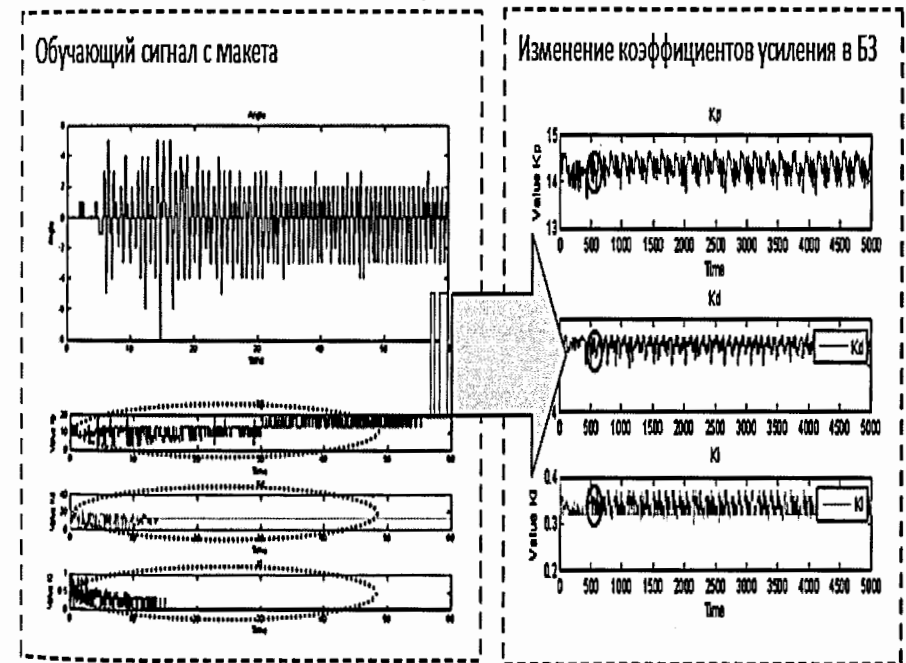


Рис. 4.15. Слева – ОС с макета (ГА, ПИД-регулятор), справа – коэффициенты усиления НР

4.1.4.2. Проектирование интеллектуального управления

В данной работе для создания двух БЗ НР использовались два набора параметров для математической модели.

В табл. 4.4 представлены начальные условия, значения параметров моделей, амплитуды и интенсивности шумов.

Таблица 4.4

Начальные условия, шумы и недоопределенные параметры модели для получения ОС

	Модель для БЗ 1	Модель для БЗ 2
Начальный угол	30 / -30°	30 / -30°
Начальная скорость	5 / -5°/с	5 / -5°/с
Коэффициент усиления моторов	0,08	0,08
Шум в системе измерения	Амплитуда 0,32, гауссовский шум, интенсивность 0,01	Амплитуда 0,32, гауссовский шум, интенсивность 0,01
Шум в системе управления	Равномерный шум [-2,15; 2,15], интенсивность 0,48	Равномерный шум [-2,15; 2,15], интенсивность 0,48
Коэффициент трения в креплении маятника	3,55	3,55
Коэфф-т трения колес	3,63 + гауссовский шум 10%	3,63 + гауссовский шум 20%
Сила упругости	5,54 Н/м	5,54 Н/м
Шум в креплении маятника	Нормированный шум с интенсивностью 0,01 и амплитудой 0,35	Гауссовский шум с интенсивностью 0,01 и амплитудой 0,7
Диапазон поиска коэффициентов усиления	15 - 21	10 - 30
Время и шаг моделирования	Время моделирования 7 с при шаге 0,01 с	Время моделирования 7 с при шаге 0,01 с

Параметры ГА для поиска ОС в программе ОБЗ проиллюстрированы на рис. 4.16. Также следует отметить установленное время такта системы. Для моделирования и эксперимента длительность такта принималась постоянной в течение испытаний и составляла 0,01 с.

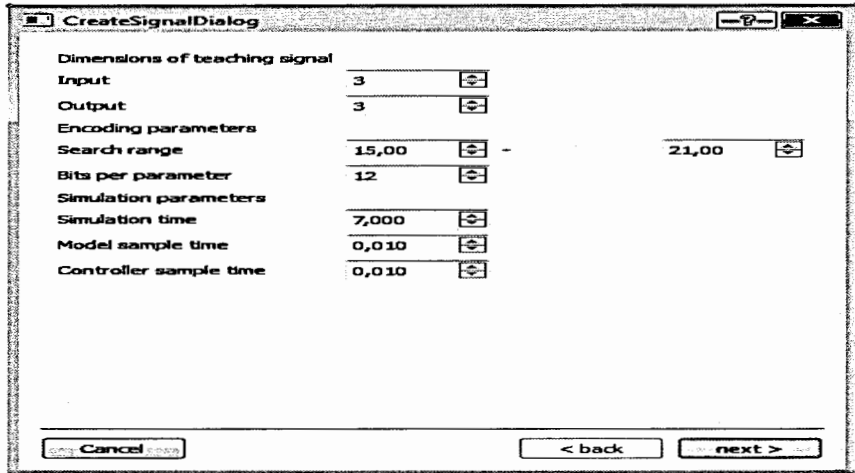


Рис. 4.16. Окно ОБЗ для установки параметров поиска обучающего сигнала

Результатом генетического отбора стал сигнал, часть которого представлена на рис. 4.17, этот сигнал является входным сигналом в ОБЗ.

-2.9989e+001	2.6002e-001	-3.0113e+001	1.6476e+001	1.9190e+001	1.4440e+001
-2.9239e+001	7.5012e-001	-6.0102e+001	1.2007e+001	1.0132e+001	7.0293e+000
-2.7578e+001	1.6607e+000	-8.9340e+001	9.0330e+000	8.7363e+000	1.7912e+001
-2.4760e+001	2.8181e+000	-1.1692e+002	1.0813e+001	1.5260e+001	7.1319e+000

Рис. 4.17. ОС с модели

Первые три столбца на рис. 4.17 описывают ошибку управления, дифференциальную и интегральную ошибки соответственно, последние три – коэффициенты усиления k_p , k_d , k_i .

В виде графика на рис. 4.18 представлена часть обучающего сигнала угла отклонения маятника от вертикальной оси.

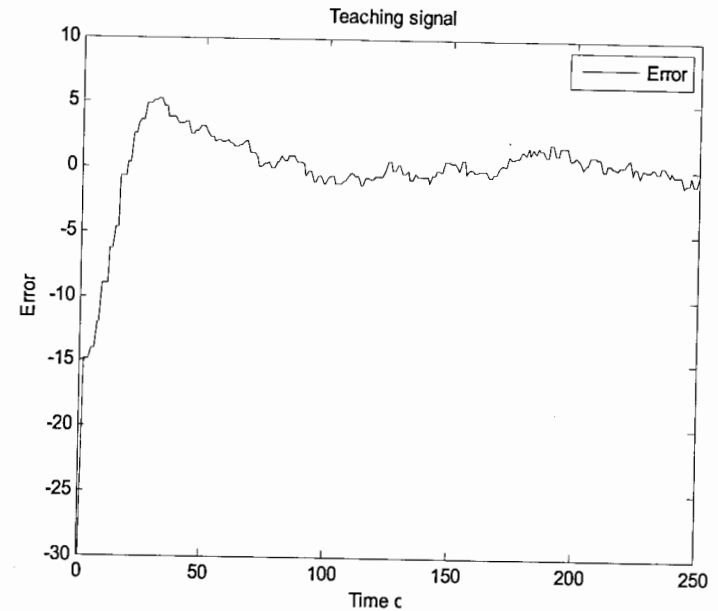


Рис. 4.18. Ошибка управления в обучающем сигнале угла отклонения маятника

На втором этапе ОС подается на вход ОБЗ, который аппроксимирует его с помощью заданной пользователем модели нечеткого вывода. Выбирается оптимальное представление функций принадлежности лингвистической переменной.

Результат этапа построения входных лингвистических переменных представлен на рис. 4.19. На этом этапе оптимизируются правые части правил. Для этого используется ГА2 (для ОС с макета) и MATLAB-моделирование для ОС, полученных с использованием модели.

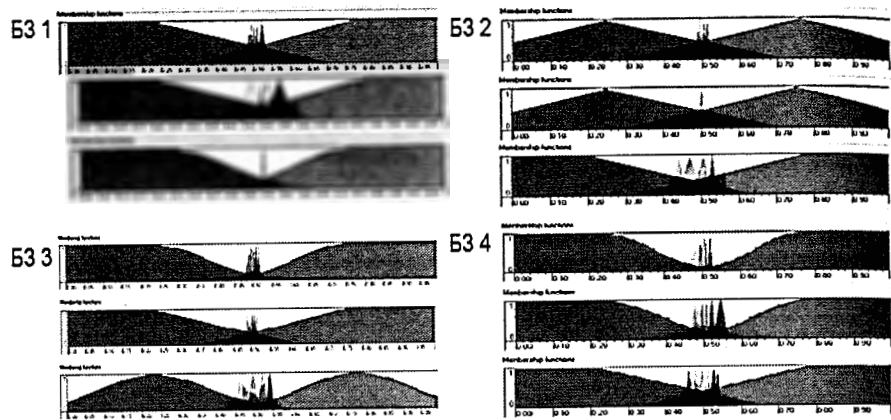


Рис. 4.19. Функции принадлежности для входных значений лингвистических переменных БЗ 1, БЗ 2, БЗ 3, БЗ 4

Результаты построения БЗ иллюстрируются ниже (рис. 4.20).

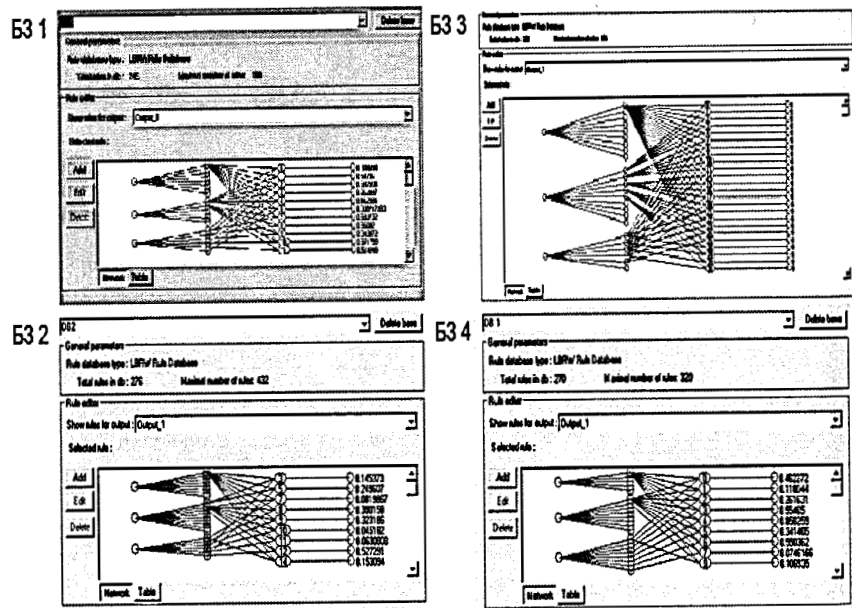


Рис. 4.20. Базы знаний в виде нейронных сетей (ОС с модели и макета)

Для формирования правых частей правил для БЗ, ОС которых получен с макета, использовался ГА2, подробно рассмотренный в предшествующих главах.

Функция пригодности на данном этапе – минимум ошибки аппроксимации ОС.

Результат создания и оптимизации правил БЗ представлен в виде нейронной сети на рис. 4.20. Первый слой демонстрирует количество входных переменных, второй – количество функций принадлежности для каждой переменной, третий – продукционные правила БЗ, четвертый – значения коэффициентов усиления.

На рис. 4.21 демонстрируется связь между ОС, полученным с использованием математической модели, и коэффициентами усиления НР.

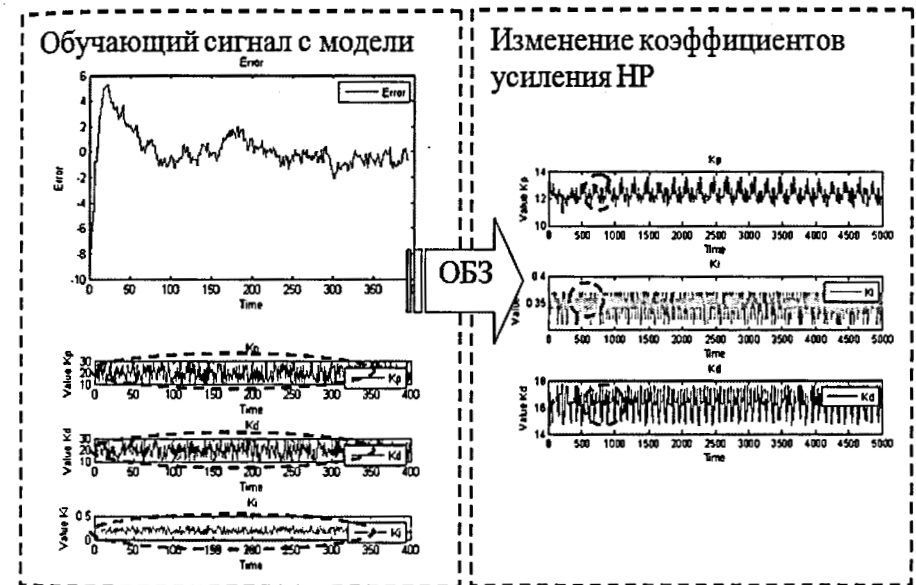


Рис. 4.21. ОС с модели и коэффициенты усиления НР

В табл. 4.5 приведено сравнение БЗ по количеству правил, количеству функций принадлежности лингвистической переменной и способу оптимизации в программном инструментарии ОБЗ.

Таблица 4.5. Сравнение БЗ

База №	Количество правил	Кол-во функций принадлежности	Способ оптимизации
База 1 (модель)	245	8x6x6	Моделирование
База 2 (модель)	276	8x9x6	Моделирование
База 3 (макет)	288	9x9x6	Аппроксимация ОС (ГА2)
База 4 (макет)	270	5x8x8	Аппроксимация ОС (ГА2)

4.1.5. Моделирование и эксперимент

Рассмотрим исследование качества управления ПИД-регулятора и НР на основе программного инструментария ОБЗ, проведенное с использованием реального ОУ и его математической модели. Регуляторы разрабатывались для функционирования в типовой ситуации управления. Испытания выполнены как в типовой, так и в непредвиденной ситуациях, обозначенных С1 и С2 соответственно. Параметры математической модели, используемой для моделирования, представлены в табл. 4.6.

Таблица 4.6.

Ситуации управления и параметры математических моделей

	Типовая ситуация (С1)	Непредвиденная (С2)
Начальный угол	0°	0°
Начальная скорость	1°/с	1°/с
Масса тележки	0,56 кг	0,56 кг
Масса маятника	0,63 кг	0,63 кг
Длина маятника	0,07 м	0,07 м
Трение в креплении	3,55 + нормированный шум с интенсивностью 0,01 и амплитудой 0,35	2,75 + нормированный шум с интенсивностью 0,01 и амплитудой 0,35
Трение колес	3,63 + гауссовский шум 15%	2,53 + гауссовский шум 15%
Коэффициент упругости	5,54 Н/м	7,54 Н/м
Шум в системе управления	Равномерный [-2,15 2,15], интенсивность 0,48	Равномерный [-2,55 2,55], интенсивность 0,48
Шум в системе измерения	Амплитуда 0,22, гауссовский шум, интенсивность 0,01	Амплитуда 0,42, гауссовский шум, интенсивность 0,01
Задержка управляющего воздействия	0,01 с	0,01 с

Для сравнения робастности пяти разработанных систем управления можно рассмотреть непредвиденную ситуацию управления (С2). В этой ситуации моделируется увеличение амплитуды шума в системах измерения и управления, а также изменение коэффициентов упругости и трения колес о поверхность. Для этого в эксперименте использовано специальное покрытие, а для математических моделей выбраны соответствующие значения параметров.

Рассмотрим поведение ПИД и нечетких регуляторов в типовой и непредвиденной ситуациях.

На рис. 4.2 представлена структура системы моделирования.

На рис. 4.22 – 4.25 представлены результаты математического моделирования и экспериментальных измерений в ситуациях управления С1 и С2.

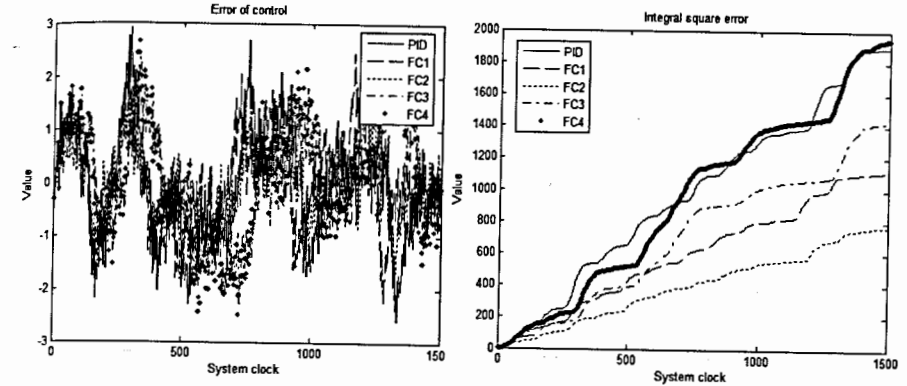


Рис. 4.22. Результаты моделирования. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления С1

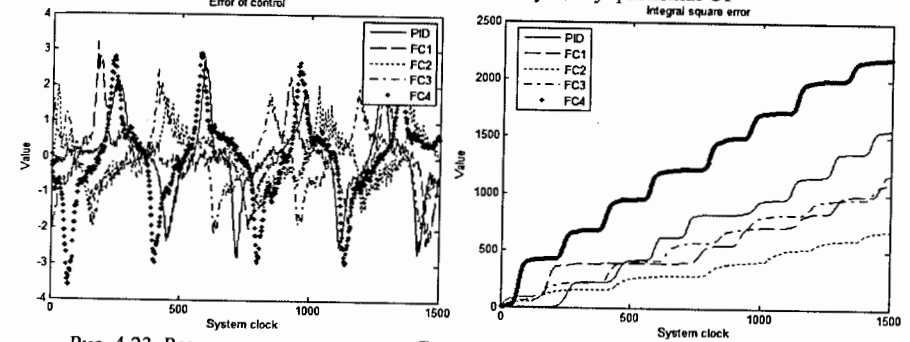


Рис. 4.23. Результаты эксперимента. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления С1

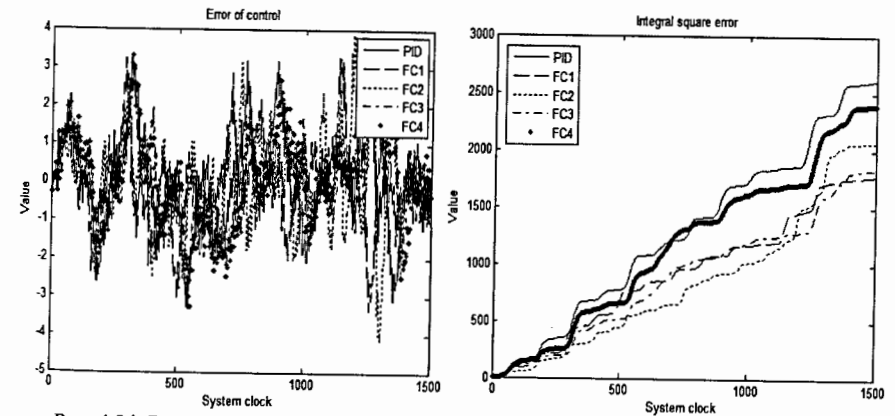


Рис. 4.24. Результаты моделирования. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки. Непредвиденная ситуация управления С2

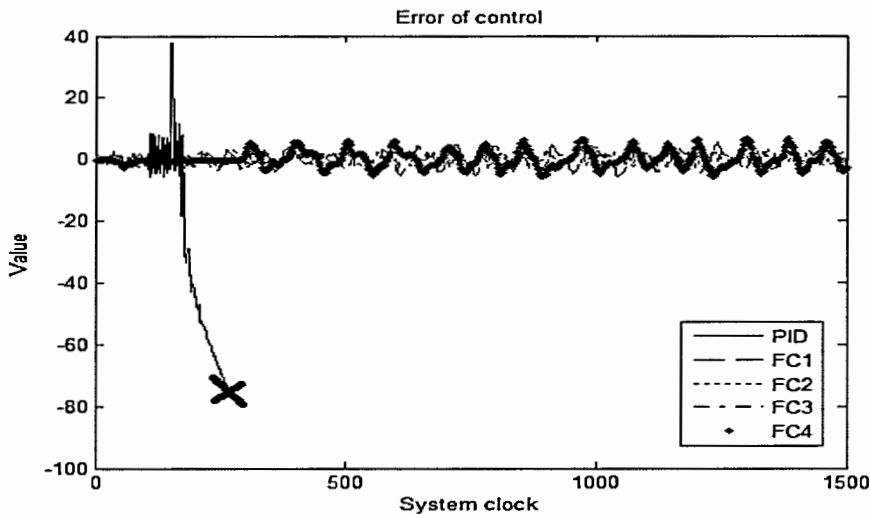


Рис. 4.25. Результаты эксперимента. Ошибка управления. Непредвиденная ситуация C2

Рассмотрим и сравним некоторые результаты анализа качества управления НР и ПИД-регуляторов. Для этого можно использовать несколько показателей. Переходный процесс в системе и его параметры показаны на рис. 4.26.

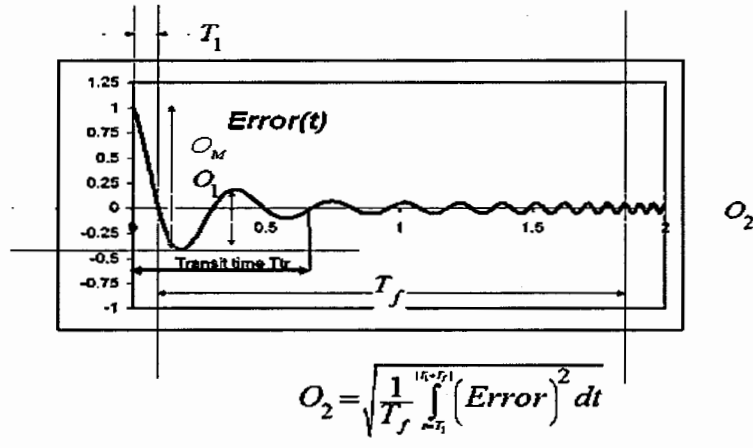


Рис. 4.26. Показатели качества управления

Перерегулирование характеризует колебательное свойство переходного процесса в системе и рассчитывается по формуле $\alpha_1 = 1 - \frac{O_1}{O_m}$; $O_m(const) \geq O_1$. (4.6)

На рис. 4.27 представлена диаграмма уровня перерегулирования систем управления.

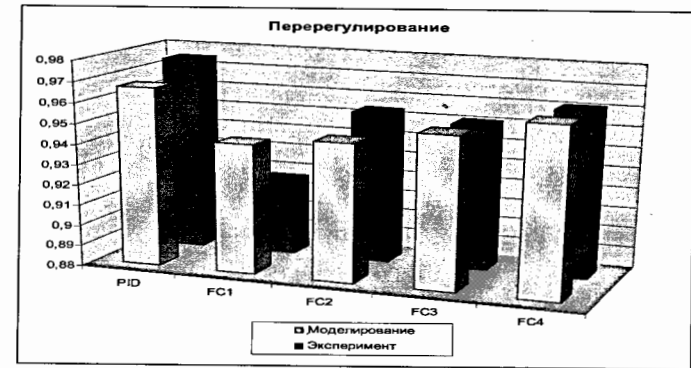


Рис. 4.27. Перерегулирование систем управления в типовой ситуации. Результаты моделирования и эксперимента

Нечеткий регулятор, разработанный на основе верифицированной математической модели, имеет более низкий показатель перерегулирования, что характеризует работу такого регулятора как более эффективную.

Устойчивость переходного процесса регуляторов (рис. 4.28) рассчитывается как

$$\alpha_2 = 1 - \frac{O_2}{O_m}; O_m(const) \geq O_2. \quad (4.7)$$

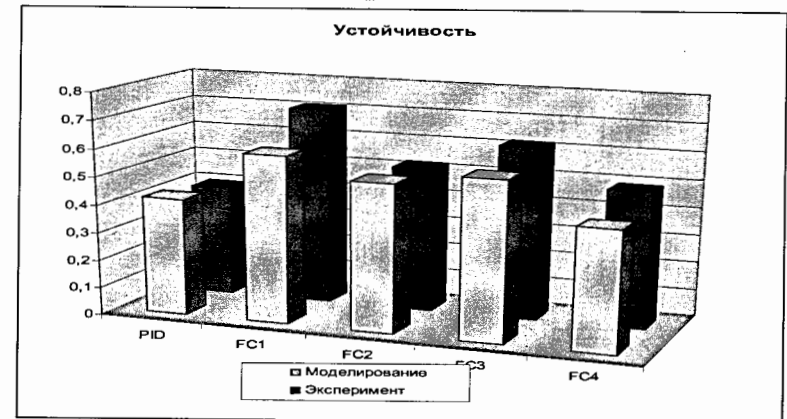


Рис. 4.28. Устойчивость систем управления в типовой ситуации. Результаты моделирования и эксперимента

Качество управления характеризует способность системы управления эффективно расходовать энергетический и технический ресурс системы. В случае реализации сложного управления износ оборудования и затраты энергии резко увеличиваются.

Сложность управления САУ (рис. 4.29) рассчитывается в виде

$$P \equiv 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \left(\frac{dK}{dt}\right)^2 dt}}{A}; \quad A = const. \quad (4.8)$$

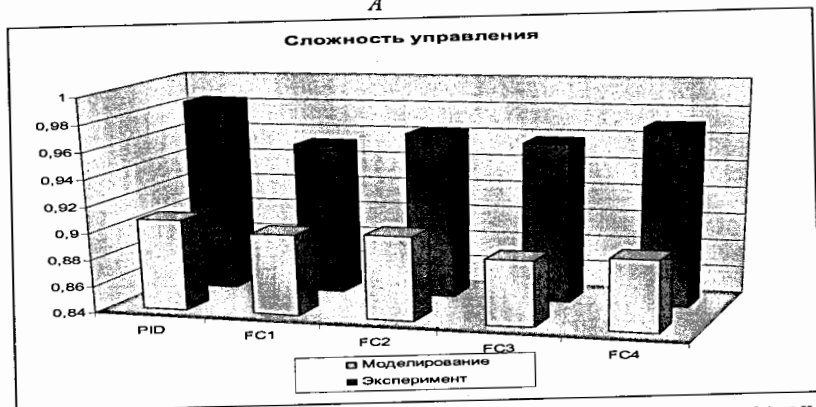


Рис. 4.29. Сложность управления в типовой ситуации. Результаты моделирования и эксперимента

Оценка сложности управления показала, что НР, разработанные с использованием ОБЗ, обеспечивают систему более простым управлением, что в конечном итоге положительно сказывается на сроке использования оборудования, снижая износ и повышая надежность.

Результаты математического моделирования и экспериментов в непредвиденной ситуации для рассмотренных систем управления, представленные в графическом виде на рис. 4.23 – 4.25, и показатели качества управления (рис. 4.27 – 4.29) показывают, что ПИД-регулятор не обладает необходимой робастностью и в непредвиденной ситуации может допустить потерю устойчивости системы.

4.1.6. Выводы

Высокая эффективность работы НР (fuzzy controller) FC1 демонстрирует высокое качество проведенной верификации.

Разработанный с использованием математической модели (для типовой ситуации управления) НР1 (FC1) справился с задачей управления лучше всех из рассматриваемых типов регуляторов, что подтверждено результатами моделирования и эксперимента. Данный результат демонстрирует качество метода верификации математической модели с применением ГА.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что НР, БЗ которых спроектированы по разработанной методологии, обладают повышенной робастностью и способны справиться с задачей управления в широком классе непредвиденных ситуаций.

4.2. Дистанционное проектирование и настройка БЗ НР для управления удаленным автономным роботом

Рассмотрим технологию дистанционного проектирования робастных ИСУ (на основе удаленного соединения с ОУ) для настройки БЗ НР на основе ОБЗ с применением технологии мягких вычислений. Такая возможность позволяет проектировать ИСУ без использования системы стохастического моделирования, что дает преимущество при проектировании нечетких систем управления для сложных и слабо формализованных ОУ в непредвиденных ситуациях управления. Кроме того, дистанционная настройка БЗ дает возможность максимально адаптировать нечеткую систему управления для конкретной (непредвиденной) ситуации управления независимо от времени и места нахождения ОУ. Такого рода самоорганизующиеся ИСУ с дистанционным проектированием БЗ важны для ликвидации последствий аварий на АЭС, при разборе завалов при землетрясениях, крушении поездов, для работы в загрязненной и радиоактивной окружающей среде и т. п.

4.2.1. Удаленное соединение с ОБЗ

Рассмотрим возможность удаленной настройки БЗ реального ОУ.

Удаленная оптимизация БЗ осуществляется на четвертом этапе проектирования НР. Реализация физической среды соединения предполагает использовать дополнительное оборудование для приема-передачи данных, например радиоканал Bluetooth, WiFi или подключение по кабелю, например USB.

Предполагается обмен информацией между системой управления и ОБЗ для формирования БЗ (рис. 4.30).

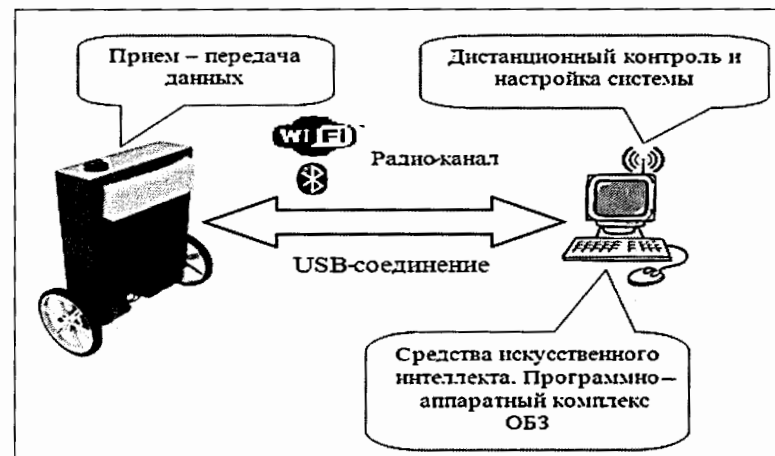


Рис. 4.30. Схема соединения настраиваемого устройства и ОБЗ

Рассмотрим подробнее процесс настройки функционирования подобной системы (рис. 4.31).

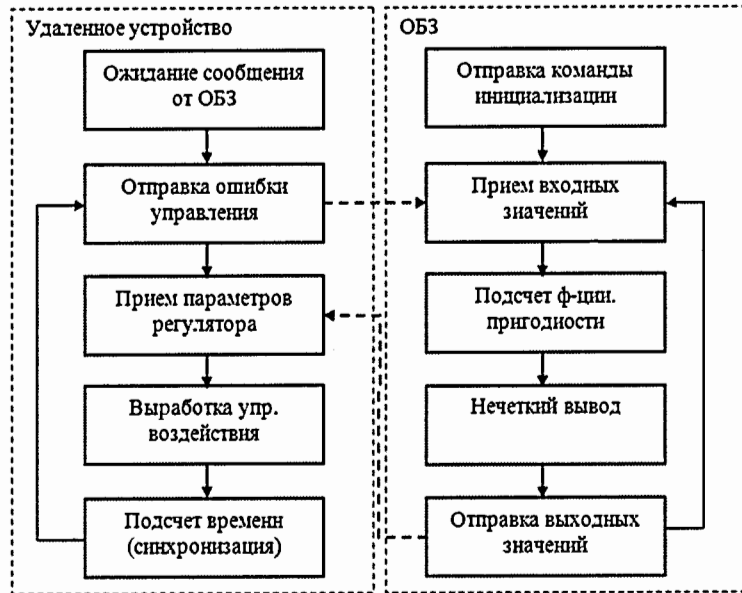


Рис. 4.31. Алгоритм работы удаленной настройки

Система управления считывает показания датчиков и отправляет их на компьютер для последующей обработки. Приняв входные значения, ОБЗ оценивает предыдущее решение (БЗ НР) и осуществляет нечеткий вывод для проверки следующего решения (БЗ НР). Результат нечеткого вывода отправляется на удаленное устройство. После этого система управления, обработав входные значения, вырабатывает управляющее воздействие.

Прежде чем приступить к установке соединения между оптимизатором и системой управления, необходимо установить физические ограничения взаимодействующих устройств, т. е. определить максимальные и минимальные временные границы одного такта системы управления с учетом приема, передачи и обработки сообщений.

Синхронизация ОБЗ и системы управления осуществляется на основе удаленного устройства (робота). С этой целью разработана специальная программа (прошивка), реализующая алгоритм, который был представлен на рис. 4.31.

Профиль соединения использует последовательный порт. Скорость передачи в нашем случае составляет 115200 бит/с. В процессе функционирования по СОМ-порту передаются числа с плавающей точкой в символьном виде.

Подключение к ОБЗ осуществляется через разработанный плагин. Перед установкой соединения в окне ОБЗ следует выбрать номер СОМ-порта, скорости соединения и время проверки одного решения (количество тактов системы для проверки решения) (рис. 4.32).

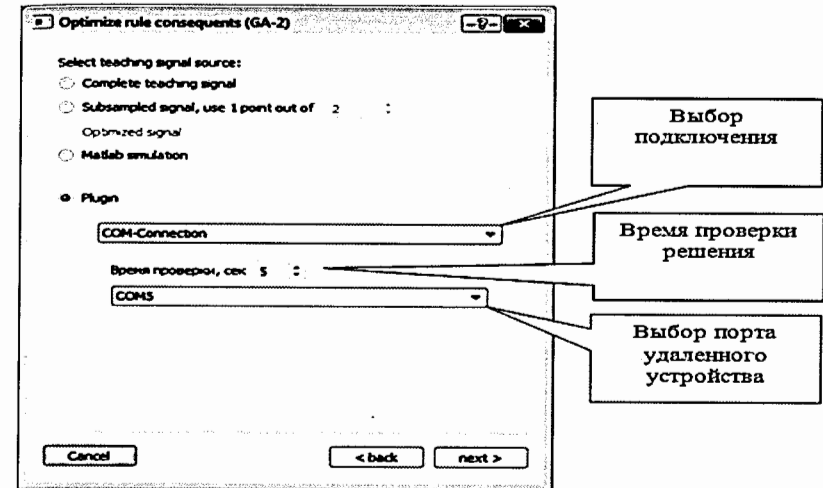


Рис. 4.32. Модуль удаленной настройки для ОБЗ

Рассмотрим следующие варианты проектирования БЗ для НР.

4.2.2. Проектирование БЗ для НР с использованием ОБЗ

На рис. 4.33 представлены возможные методы проектирования. В таком контексте возможны шесть вариантов разработки БЗ для НР (рис. 4.33).

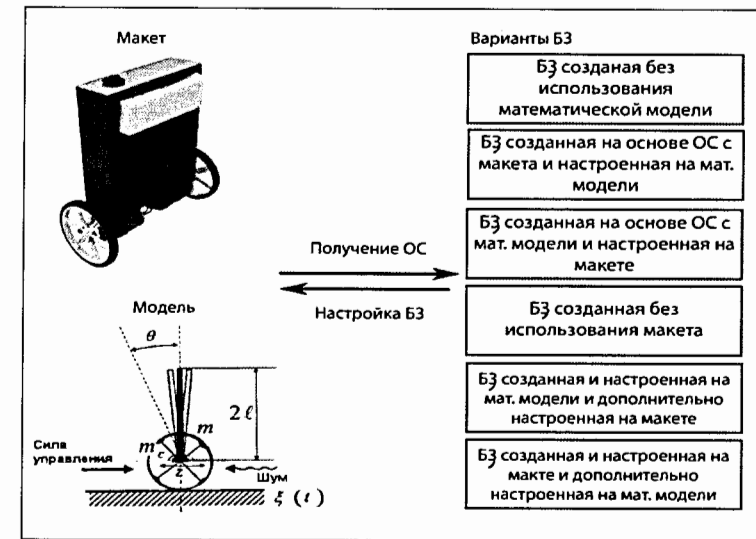


Рис. 4.33. Варианты проектирования БЗ

Для проектирования БЗ для НР на основе математической модели была проведена верификация ОУ. В дальнейшем эта модель использовалась для настройки БЗ для НР (FC1, FC2, FC5 и FC6).

Параметры верифицированной модели представлены в табл. 4.6 (БЗ 1).

На рис. 4.18 и 4.21 представлен ОС, используемый для создания FC1, FC3 и FC5. Для получения ОС с макета используется ГА-ПИД-регулятор. Часть ОС, полученного с макета, представлена на рис. 4.14 и 4.15. В дальнейшем этот сигнал используется для создания FC2, FC4 и FC5.

На первом этапе создания БЗ (см. главу 2) полученные ОС используются для формирования лингвистических переменных для входных значений.

Результаты первого этапа проектирования представлены на рис. 4.34 и 4.35.

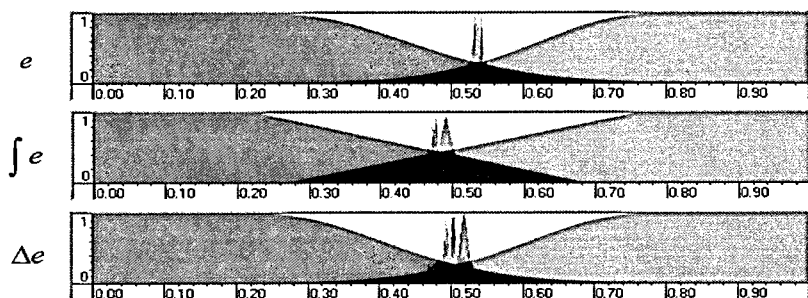


Рис. 4.34. Функции принадлежности входных переменных (FC1, FC2 и FC5) на основе ОС с модели

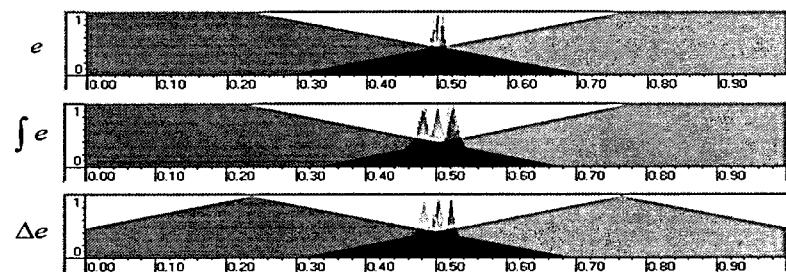


Рис. 4.35. Функции принадлежности входных переменных (FC3, FC4 и FC6) на основе ОС с макета

В данной работе количество нечетких множеств в каждой лингвистической переменной было ограничено до 5.

На следующем этапе проектирования БЗ для НР осуществляется формирование и оптимизация количества правил НР (глава 2). Результат данного этапа представлен на рис. 4.36. Выходные значения на данном этапе равны 0, так как их настройка производится на следующем этапе проектирования НР.

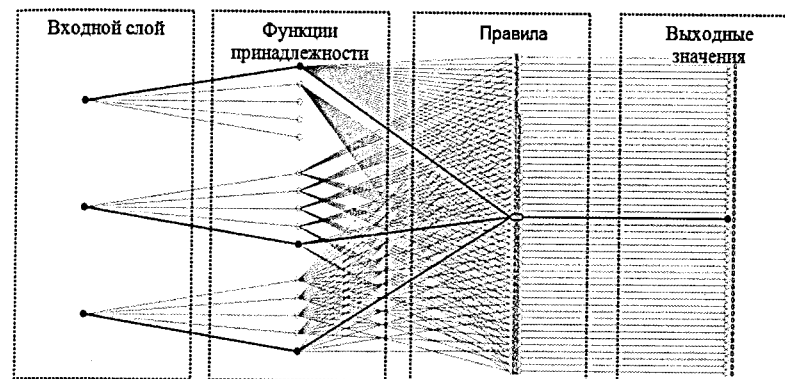


Рис. 4.36. Нейронная сеть нечеткого регулятора

Рассмотрим полные БЗ, состоящие из 125 правил. Такой подход используется для более точного сравнения источников ОС и методов оптимизации на этапе настройки выходных значений НР.

Рассмотрим методы оптимизации БЗ с использованием математической модели и с использованием удаленной настройки БЗ.

В табл. 4.7 проводится сравнение полученных НР по методам получения ОС и методам настройки.

Таблица 4.7.

	Источник ОС	Метод настройки	Количество правил
FC1	Математическая модель	Математическое моделирование	125
FC2	Макет (ГА-ПИД)	Математическое моделирование	125
FC3	Математическая модель	Удаленное соединение	125
FC4	Макет (ГА-ПИД)	Удаленное соединение	125
FC5	Математическая модель	Математическое моделирование и дополнительная настройка с использованием удаленного соединения	125
FC6	Макет (ГА-ПИД)	Удаленное соединение и дополнительная настройка на мат. модели	125

4.2.3. Моделирование и эксперимент

Эксперимент и моделирование проводились в двух ситуациях управления. Первая ситуация (С1) является типичной для системы управления (начальный угол, равный -1° , и ускорение, равное 1 м/с^2). Цель управления - поддерживать маятник в равновесии (угол отклонения 0°). Вторая ситуация является непредвиденной (С2). Начальный угол и ускорение в С2 равны 5° и 1 м/с^2 соответственно.

Такая ситуация характеризует возмущение, вызванное внешним воздействием на ОУ. Рассмотрим моделирование в типовой ситуации управления (рис. 4.37 и 4.40).

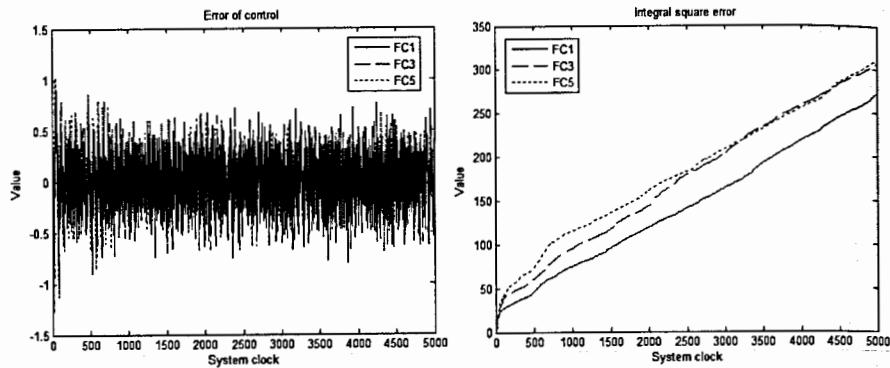


Рис. 4.37. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки. НР на основе ОС с математической модели, типовая ситуация управления С1. Результаты моделирования

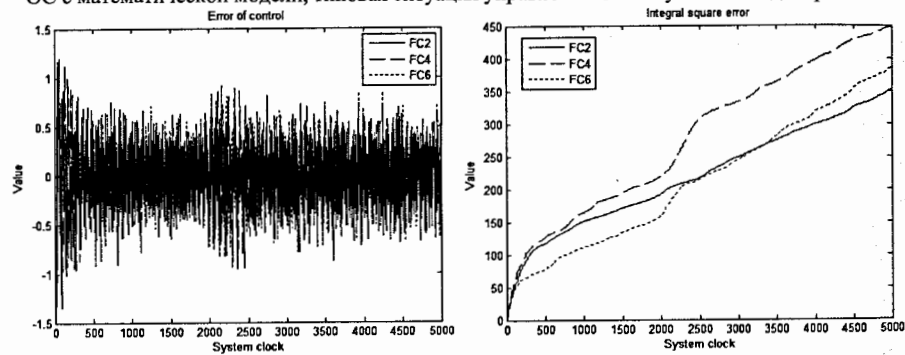


Рис. 4.38. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки. НР на основе ОС с макета, типовая ситуация управления С1. Результаты моделирования

Рассмотрим результаты эксперимента в типовой ситуации управления С1.

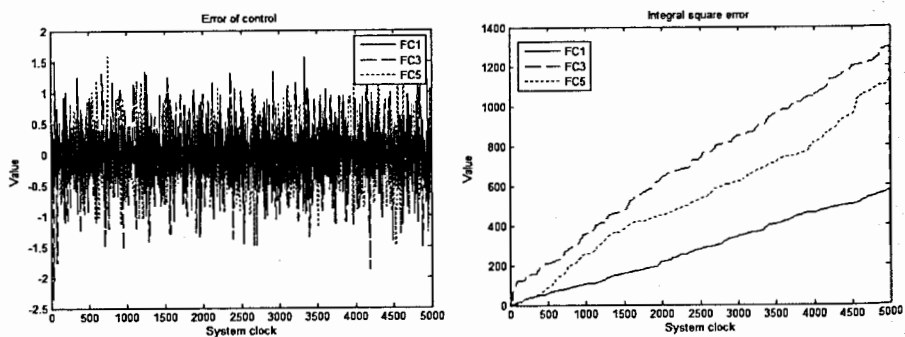


Рис. 4.39. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки. НР на основе ОС с математической модели, типовая ситуация управления С1. Результаты эксперимента

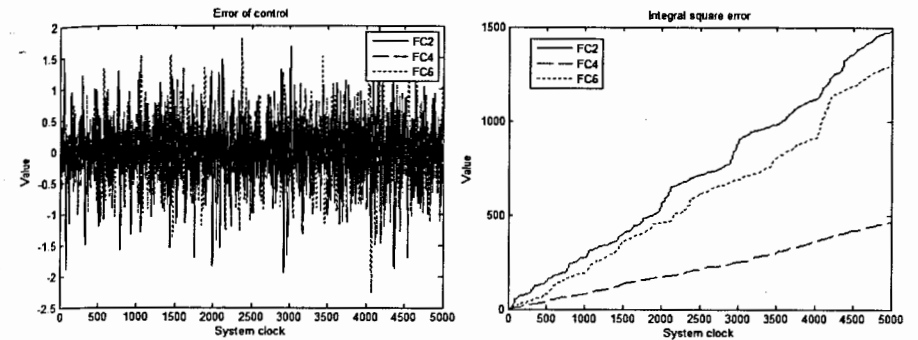


Рис. 4.40. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки. НР на основе ОС с макета, типовая ситуация управления С1. Результаты эксперимента

На рис. 4.41 представлено сравнение интегралов квадратичной ошибки для всех рассматриваемых регуляторов в типовой ситуации управления С1.

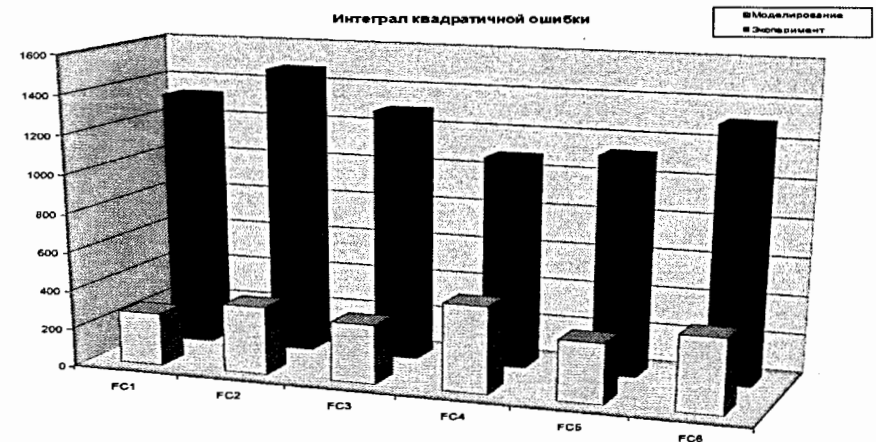


Рис. 4.41. Интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления

Меньший по высоте уровень интеграла квадратичной ошибки на рис. 4.41 свидетельствует о лучшей работе регулятора. Из диаграммы на рис. 4.41 видно, что в эксперименте FC4 справился с задачей управления в типовой ситуации лучше других регуляторов. Результаты моделирования показывают, что FC1, разработанный и оптимизированный с использованием математической модели, справляется с задачей управления лучше остальных регуляторов. Это объясняется тем, что для настройки FC1 используется математическая модель, а для настройки FC4 - реальный ОУ (макет) с недостаточно определенными параметрами.

Рассмотрим результаты моделирования и эксперимента в непредвиденной ситуации управления С2 (рис. 4.42 – 4.45).

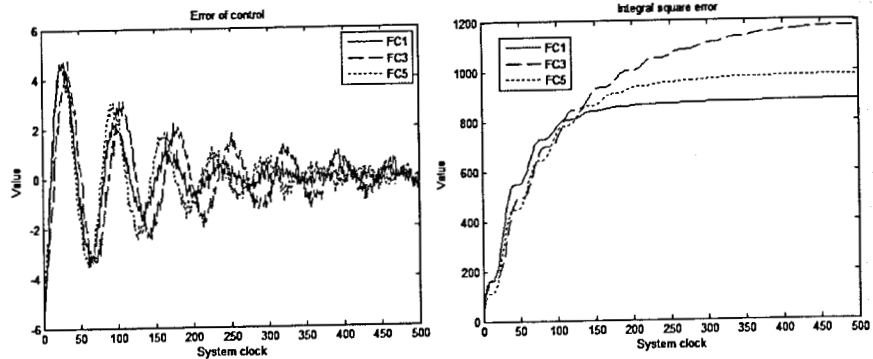


Рис. 4.42. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки НР на основе ОС с математической модели, непредвиденная ситуация управления. Результаты моделирования

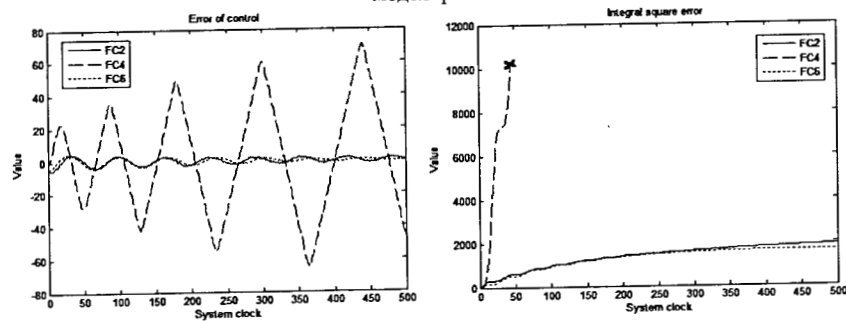


Рис. 4.43. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки, НР на основе ОС с макета, непредвиденная ситуация управления. Результаты моделирования

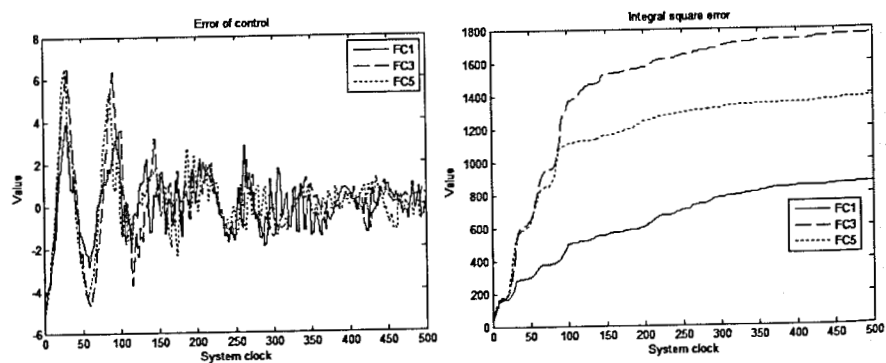


Рис. 4.44. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки, НР на основе ОС с математической модели, непредвиденная ситуация управления. Результаты эксперимента

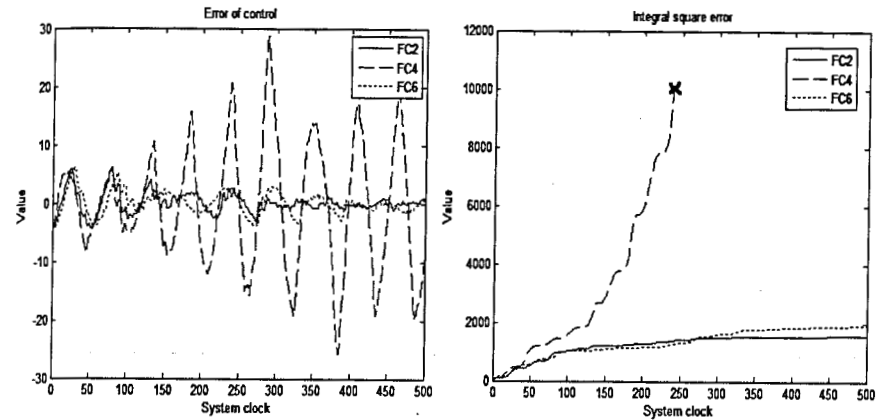


Рис. 4.45. Слева - ошибка управления, справа - интеграл квадратичной ошибки, НР на основе ОС с макета, непредвиденная ситуация управления. Результаты эксперимента

На рис. 4.46 представлено сравнение интегралов квадратичной ошибки всех НР.

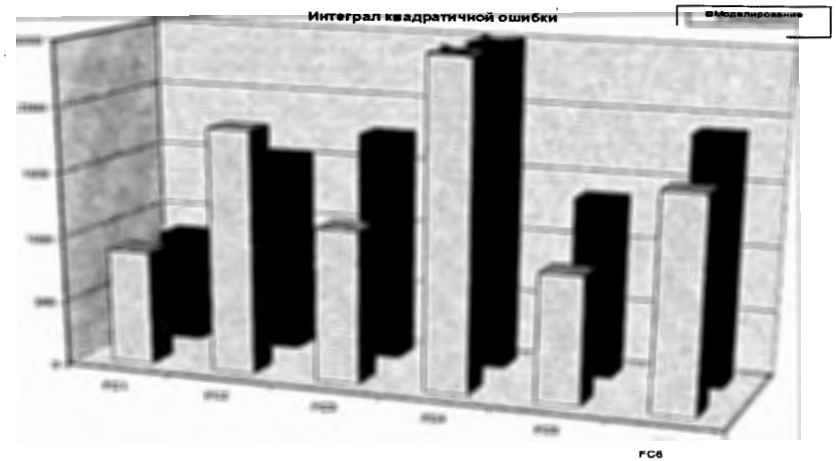


Рис. 4.46. Интеграл квадратичной ошибки. Непредвиденная ситуация управления

Как видно из рис. 4.46, контроллер FC4 в непредвиденной ситуации не справляется с управлением.

4.2.4. Анализ результатов моделирования и экспериментов

Для оценки качества процесса управления используются показатели переходного процесса (рис. 4.26). К таким показателям относятся сложность управления, устойчивость, величина перерегулирования, рассчитанные по формулам (4.5) – (4.8).

На рис. 4.47 представлена диаграмма уровня перерегулирования систем управления.

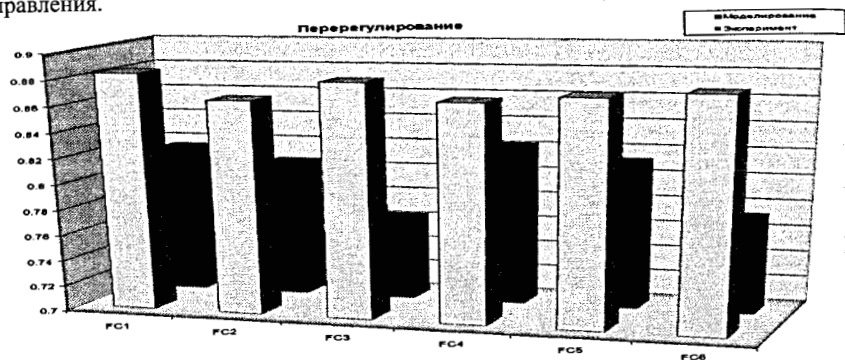


Рис. 4.47. Перерегулирование систем управления в типовой ситуации. Моделирование и эксперимент

При моделировании НР, разработанный на основе верифицированной математической модели, имеет более высокий показатель перерегулирования, что характеризует работу такого регулятора как более эффективную. В эксперименте более эффективное управление с точки зрения перерегулирования демонстрирует FC4, оптимизированный на основе удаленного соединения.

Худшими по качеству управления регуляторами с точки зрения перерегулирования являются FC3 и FC2 в эксперименте и моделировании соответственно.

На рис. 4.48 представлено качество управления по критерию устойчивости.

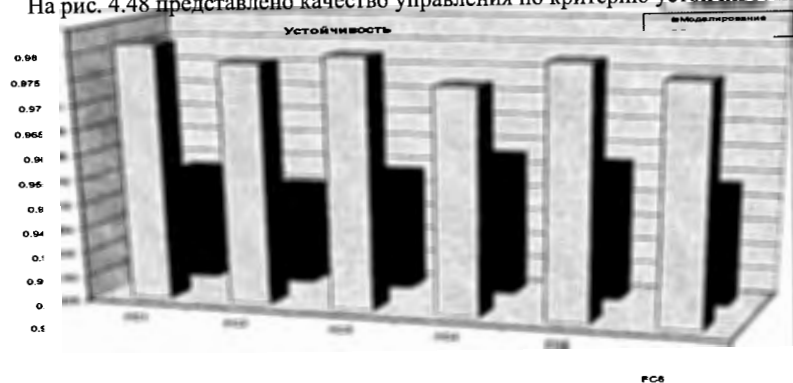


Рис. 4.48. Устойчивость систем управления в типовой ситуации. Моделирование и эксперимент

Более высокий уровень устойчивости свидетельствует о лучшем уровне качества управления. При моделировании в типовой ситуации управления более устойчивым регулятором оказался FC1, однако FC4 с точки зрения устойчивости оказался худшим.

Однако результаты эксперимента показали, что самым устойчивым регулятором оказался FC4, а самым неустойчивым – FC2.

На рис. 4.49 представлено качество управления по критерию сложности управления в типовой ситуации.

В типовой ситуации управления FC4 обладает более простым и, следовательно, эффективным управлением.

Анализ результатов моделирования в типовой ситуации показывает, что НР, настроенные с использованием математической модели, обладают более высоким качеством управления.

Однако анализ результатов эксперимента в типовой ситуации показывает, что этим качеством обладают НР, настроенные с использованием удаленного соединения.

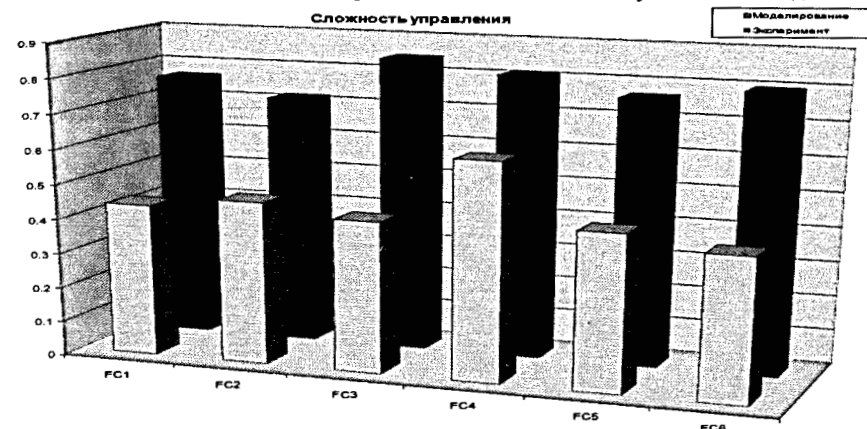


Рис. 4.49. Сложность управления в типовой ситуации. Моделирование и эксперимент

Проведем анализ качества управления в непредвиденной ситуации управления (рис. 4.50 – 4.52).

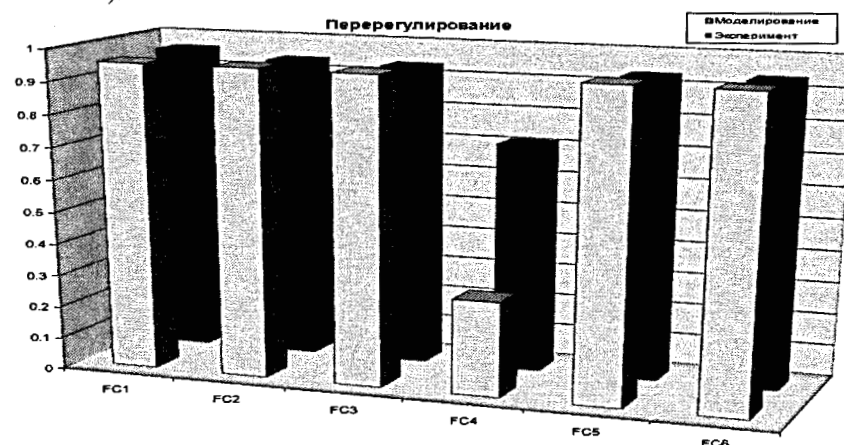


Рис. 4.50. Перерегулирование систем управления в непредвиденной ситуации. Результаты моделирования и эксперимента

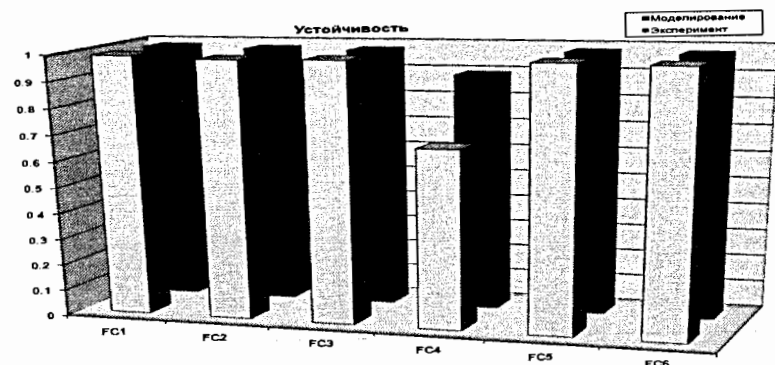


Рис. 4.51. Устойчивость систем управления в непредвиденной ситуации. Результаты моделирования и эксперимента

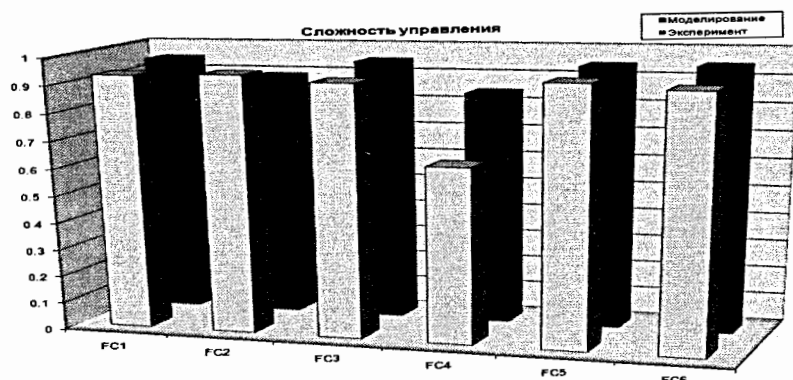


Рис. 4.52. Сложность управления в непредвиденной ситуации. Результаты моделирования и эксперимента

Результаты моделирования и эксперимента показали, что в непредвиденной ситуации управления FC4 не обладает достаточной устойчивостью и имеет низкую оценку качества с точки зрения перерегулирования.

Эффективным управлением с точки зрения сложности управления обладают регуляторы FC1, FC3, FC5 и FC6.

В непредвиденной ситуации результаты моделирования и эксперимента показывают, что высоким уровнем робастности обладают НР, разработанные с использованием математической модели. Для сравнения качества управления используем сумму показателей качества с равными весами в обеих ситуациях управления и рассчитаем общее качество управления по формуле (рис. 4.53)

$$\text{Общее качество} = \sum_i^2 w_i \cdot O_{1i} + w_2 \cdot O_{2i} + w_3 \cdot P_i, \quad (4.9)$$

где $w_1 = w_2 = w_3 = 0,16$.

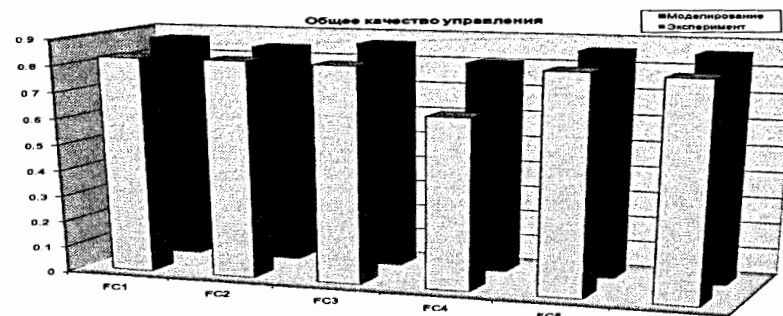


Рис. 4.53. Общее качество управления в двух ситуациях управления

4.2.5. Выводы

Результаты моделирования и эксперимента показывают, что FC4, разработанный без использования математической модели, не обладает достаточной робастностью.

FC1, разработанный только на основе математической модели ОУ, обладает лучшей робастностью. Следует отметить, что и FC5, разработанный на основе совместного использования математической модели и дистанционной настройки, обладает достаточно хорошим качеством управления. Этот регулятор FC5 в типовой и непредвиденной ситуациях справляется с задачей управления на достаточно высоком уровне.

Из рис. 4.39 видно, что хорошо справляются с задачей управления в типовой и непредвиденной ситуациях управления четыре регулятора:

- FC1 (ОС с математической модели и настройка с использованием математической модели),
- FC3 (ОС с математической модели и настройка с использованием дистанционного соединения с ОУ);
- FC5 (ОС с математической модели, настройка с использованием математической модели и дополнительная настройка с использованием дистанционного соединения);
- FC6 (ОС с макета, настройка с использованием дистанционного соединения и дополнительная настройка на математической модели).

Оптимизация БЗ с использованием дистанционного соединения с ОУ непосредственно напрямую с ОБЗ дает ряд преимуществ:

- позволяет не строить математическую модель и при этом получать необходимые знания об ОУ для построения БЗ;
- для проектирования ИСУ в ОБЗ достаточно получить информативные показатели и параметры поведения ОУ;
- дистанционное соединение позволяет оптимизировать БЗ в определенных (типовых) условиях функционирования, тем самым создавать множество БЗ с высоким качеством управления для различных ситуаций управления.

Результаты моделирования и экспериментов показывают, что для проектирования качественной и робастной ИСУ недостаточно использовать только математическую модель или реальный ОУ. Только совместное использование этих

информационных ресурсов дает синергетический эффект повышения качества проектируемых ИСУ.

4.3. Беспроводная настройка

Рассмотрим возможность беспроводной настройки БЗ для динамически неустойчивого объекта. В качестве среды передачи данных будем использовать модуль радиосвязи, который представлен на рис. 4.54.

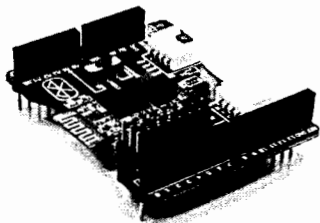


Рис. 4.54. Модуль радиосвязи Bluetooth

Установим физические ограничения временной задержки при приеме/передаче данных в коммуникационной среде. Временная задержка составляет 40 мс, что для типовых систем управления, рассмотренных ранее, является критичным параметром. Исходя из этого ситуацию управления с такой величиной задержки можно считать экстремальной. Для решения задачи управления изменим закон формирования управляющего воздействия (4.2).

Задающий сигнал системы стабилизации будет теперь зависеть от интегральной ошибки (4.10), это позволит системе функционировать с критической временной задержкой:

$$ref = -a \cdot \int edt, \quad (4.10)$$

где a – экспериментально подобранный параметр, равный 0,25.

В выражении (4.10) угол задающего сигнала зависит от накопленной интегральной ошибки. Важно отметить, что дополнительно на величину задающего сигнала было наложено ограничение, и ее значение не должно выходить за пределы диапазона $[-16, 16]$, а введение закона управления и новой ситуации управления требует создания новых БЗ на основе информационных технологий проектирования, рассмотренных ранее.

4.3.1. Проектирование регуляторов

Рассмотрим два источника для получения ОС:

- реальный объект управления (FC1);
- математическая модель (FC2).

Проектирование ОС с макета устройства осуществлялось с использованием ГА-ПИД-он-лайн-регулятора, график ошибки управления при работе данного регулятора и сходимость коэффициентов представлены на рис. 4.55 и 4.56.

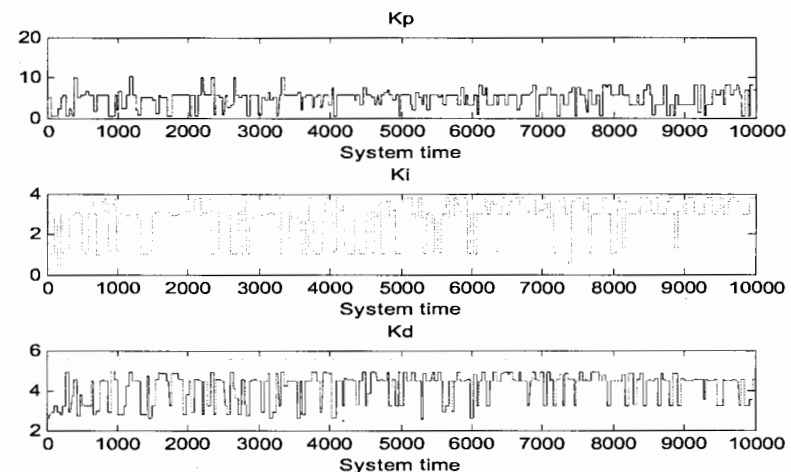


Рис. 4.55. Коэффициенты усиления ГА-ПИД-он-лайн-регулятора

Отметим, что в дальнейшем в качестве постоянных коэффициентов ПИД-регулятора будем использовать значения, подобранные с помощью данного алгоритма.

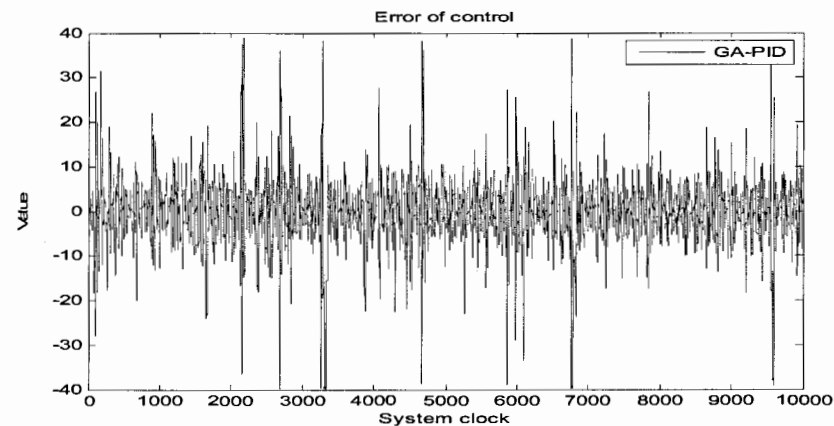


Рис. 4.56. Угол отклонения макета

Для проектирования ОС с модели использовалась модель, параметры которой представлены в табл. 4.5; отметим, что параметр такта системы был увеличен до 40 мс.

После установления разработчиком модели нечеткого вывода, типа нечетких правил и количества входных и выходных переменных с помощью ГА1 создаются функции принадлежности лингвистических переменных. Результаты этого этапа для двух БЗ представлены на рис. 4.57.

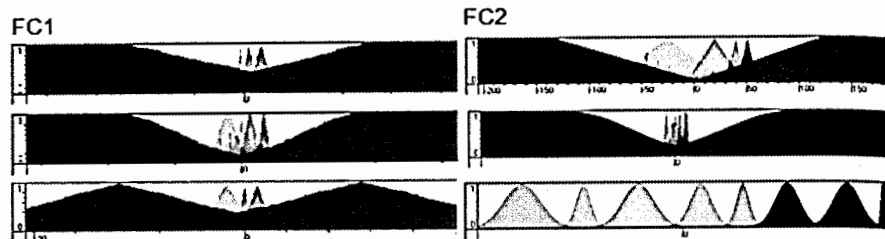


Рис. 4.57. Нечеткие множества входных лингвистических переменных

Следующий этап - создание и настройка ННС. В данном случае используются полные БЗ, состоящие из 336 и 125 правил (табл. 4.9). Настройка БЗ осуществлялась на макете и модели для соответствующих источников ОС.

Результатом проектирования НР стали две БЗ, представленные в табл. 4.9.

Таблица 4.9

	Кол-во правил	Источник сигнала	Метод настройки
FC1	336	Модель	Математическое моделирование
FC2	125	Робот	Беспроводная настройка

4.3.2 Моделирование и эксперимент

Сравним классический ПИД-регулятор с разработанными НР. Угол отклонения макета и рост интегральной квадратичной ошибки представлены на рис. 4.58.

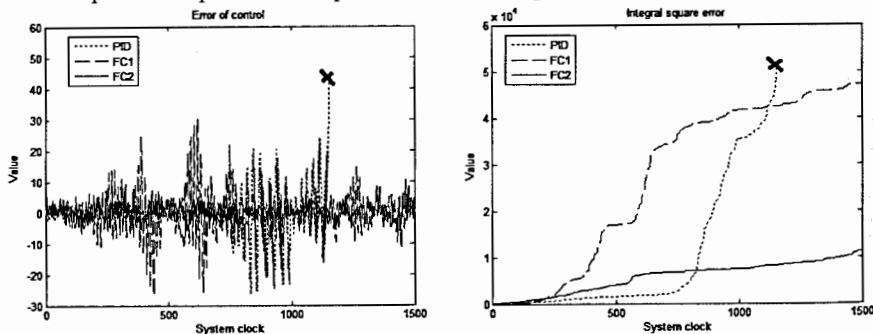


Рис. 4.58. Угол отклонения и интеграл квадратичной ошибки

Рисунок 4.59 иллюстрирует изменения задающего сигнала в процессе работы регуляторов.

Из представленных рисунков видно, что НР на основе ОС с макета справился с задачей управления в экстремальной ситуации с использованием дистанционной настройки лучше остальных регуляторов.

Отметим также что ПИД-регулятор с постоянными коэффициентами, подобранными с помощью ГА-ПИД-он-лайн, не справился с задачей управления.

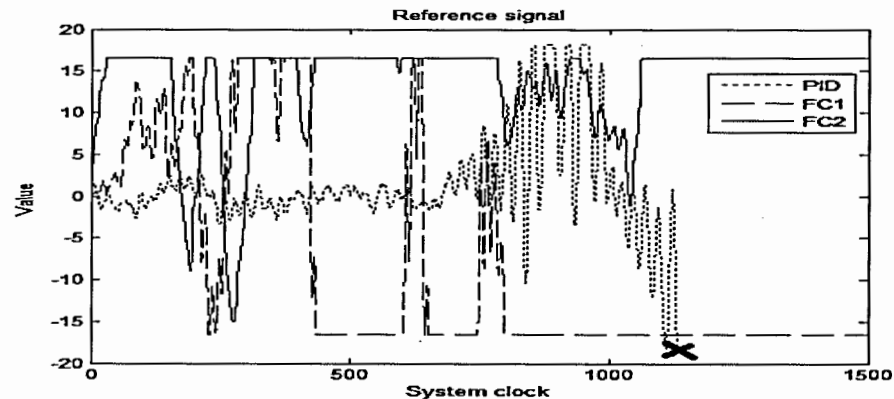


Рис. 4.59. Задающий сигнал регуляторам

Подбор коэффициентов ПИД-регулятора для данной ситуации оказался крайне трудоемким процессом и, как демонстрируют результаты эксперимента, не увенчался успехом, что еще раз показывает превосходство ИСУ над классическими САУ.

4.4. Общие выводы

1. Классические системы управления не всегда успешно справляются с задачей управления в случае, если ОУ является глобально неустойчивым или существенно нелинейным, при наличии шумов или времени задержки в каналах измерения, а также при наличии стохастических шумов, особенно типа рэлеевских (с несимметричной функцией плотности распределения).
2. Нечеткие контроллеры, основанные на традиционных инструментариях мягких вычислений, в которых структура нечеткой нейронной сети строится вручную экспертом, уступают в качестве управления и робастности нечетким контроллерам, построенным на основе оптимизатора баз знаний.
3. Результаты моделирования широкого класса объектов управления показали, что разработанная технология ИТП ИСУ и разработанный инструментарий ОБЗ демонстрируют хорошие качества управления и робастность, несмотря на изменения (непредсказуемые) широкого класса факторов, таких как внешние шумы, параметры модели ОУ, время задержки в каналах измерения, цель управления.

Рекомендуемая литература к главе 4

1. Grasser F., D'Arrigo A., Colombi S. and Rufer A. Joe. A mobile inverted pendulum // IEEE Transaction Electronics. 2002. V. 49, No. 1. P. 107 - 114.

2. Choi D., Oh J.-H. Human-friendly motion control of a wheeled inverted pendulum by reduced-order disturbance observer // IEEE International Conference on Robotics and Automation Pasadena, CA, USA, May 19-23, 2008. P. 2521 – 2526.
3. Nawawi S. W., Ahmad M. N. and Osman J. H. S. Real-time control system for a two-wheeled inverted pendulum - mobile robot // Advanced Knowledge Application in Practice / I. Fuerstner (Ed). InTech. 2010. P. 299 – 312.
4. Gocmen A. Design of two wheeled electric vehicle. Master Sci. Thesis. Atilim University, Temmuz, 2011.
5. Takeneka T., Hirano M., Izumi H., Kuwabara K., Koyama K., Kobashi Sh. Inverted pendulum mobile vehicle. Patent US 8,224,891 B2. Date of Patent. Jul. 24, 2012.
6. Castro A. Modeling and dynamic analysis of a two-wheeled inverted pendulum. Master Science Thesis. Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA. 2012.
7. Nasir A., Ahmad N., Ghazali R., Pakheri N. Performance comparison between fuzzy logic controller (FLC) and PID controller for a highly nonlinear two-wheels balancing robot // 1st International Conference on Informatics and Computational Intelligence. IEEE Computer Society. 2011. P. 176 – 181.
8. Nahid F.S., Karthik V., Karun M.V. Implementation of intelligent control for controlling the two wheel inverted pendulum // Intern. Confer. Computing and Control Engineering (ICCCE 2012), 12 & 13 April, 2012. Published by Coimbatore Institute of Information Technology, 2012.
9. Ульянов С.В., Решетников А.Г. Метод извлечения знаний из физически измеряемого сигнала обучения: проектирование баз знаний нечеткого регулятора // Системный анализ в науке и образовании. 2013. №1. Эл. № ФС77-51141 от 14.09.2012г. <http://www.sanse.ru/archive/27>.
10. Жданов А.А. Автономный искусственный интеллект. М.: БИНОМлаб. Знаний, 2008.
11. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. М.: ВНИИгеосистем, 2011.
12. Ульянов С.В., Решетников А.Г., Керимов Т.А. Дистанционная настройка базы знаний для интеллектуального управления автономным роботом на основе оптимизатора баз знаний Ч 1: технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании. 2013. №1. Эл. № ФС77-51141 от 14.09.2012г. <http://www.sanse.ru/archive/27>.

Контрольные вопросы к главе 4

1. Структура математической и компьютерной моделей ОУ.
2. Этапы проектирования БЗ для нечеткого регулятора.
3. Верификация и тестирование модели ОУ.
4. Методика проведения эксперимента в автономном и удаленном режимах функционирования ОУ.
5. Интерпретация результатов моделирования и натурного эксперимента.
6. Структура нейронной сети проектирования БЗ.

Глава 5. Проектирование ИСУ роботом-манипулятором

В современном производстве большое внимание уделяется повышению эффективности за счет увеличения уровня автоматизации и применения различных робототехнических устройств. Большую часть в области комплексной автоматизации промышленного производства занимают роботы-манипуляторы. Однако сфера применения манипуляционных устройств на этом не ограничивается: роботы-манипуляторы как автономные устройства, так и в составе комплексов находят применение в аэрокосмической области, медицине и др. Манипулятор может быть, например, роботом сервисного обслуживания или решать специальные задачи военно-промышленного комплекса. Сложность робота-манипулятора как ОУ, неопределенность среды функционирования ставят задачу разработки системы управления, способной функционировать в условиях неполной информации о среде функционирования, возмущений и информационного риска.

5.1. Постановка задачи управления

Традиционная система управления представляет собой совокупность одного или нескольких ОУ и управляющей системы. В общем случае система управления состоит из звена регулирования, ОУ, а также ИС в цепи обратной связи. Для обеспечения заданных динамических показателей в системах управления находят применение различные типы регуляторов. Широкое распространение получили пропорциональные (П), пропорционально-интегральные (ПИ), пропорционально-дифференциальные (ПД) и ПИД-регуляторы, совмещающие все три типа регулирования. Интегральная составляющая регулятора позволяет устранить в системе статическую ошибку, а дифференциальная составляющая – улучшить динамические показатели, форсируя переходный процесс.

Для пояснения работы ПИД-регулятора в применении к роботу-манипулятору с тремя степенями свободы рассмотрим прямую цепь контура управления.

На рис. 5.1 $E = [\varepsilon_1 \ \varepsilon_2 \ \varepsilon_3]$ – ошибка управления, $K_{pi}, K_{di}, K_{ii}, i = 1, 3$, – пропорциональные, дифференциальные и интегральные коэффициенты ПИД-регулятора, i – номер соответствующего звена робота-манипулятора, $U = [u_1 \ u_2 \ u_3]$ – управляющее воздействие, $Q = [q_1 \ q_2 \ q_3]$ – регулируемая величина.

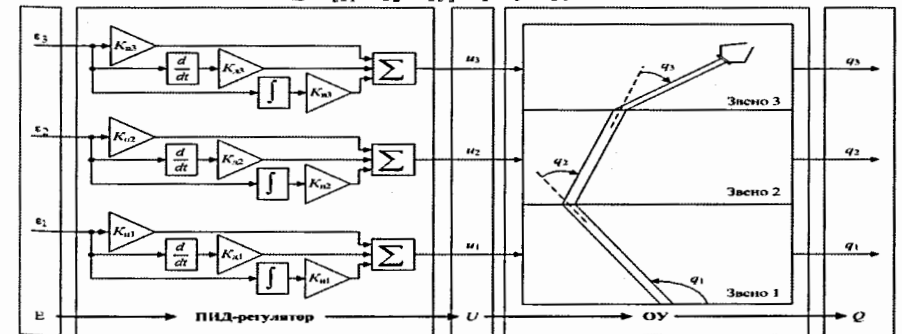


Рис. 5.1. Прямая цепь системы управления с ПИД-регулятором

Задача управления в общем случае сводится к нахождению коэффициентов ПИД-регулятора $K_{pi}, K_{di}, K_{ii}, i = 1, 3$, при которых обеспечивается желаемый характер движения. Определив соответствующие коэффициенты равными нулю, ПИД-регулятор можно преобразовать в П-, ПД- или ПИ-регулятор.

5.2. Описание макета системы

На рис. 5.2 представлен макет, используемый для тестирования технологий проектирования ИСУ с использованием ОБЗ – манипулятора с тремя степенями свободы.

В качестве измерительной системы (рис. 5.2, акселерометры) в макете используются три платы с установленными на них акселерометрами с тремя степенями свободы ADXL335.

Ядром системы является микроконтроллер UPD78F1166 (рис. 5.2, плата управления) компании *Renesas*. Информация о текущих положениях звеньев и характеристиках качества управления выводится на дисплей и последовательный (UART) интерфейс.

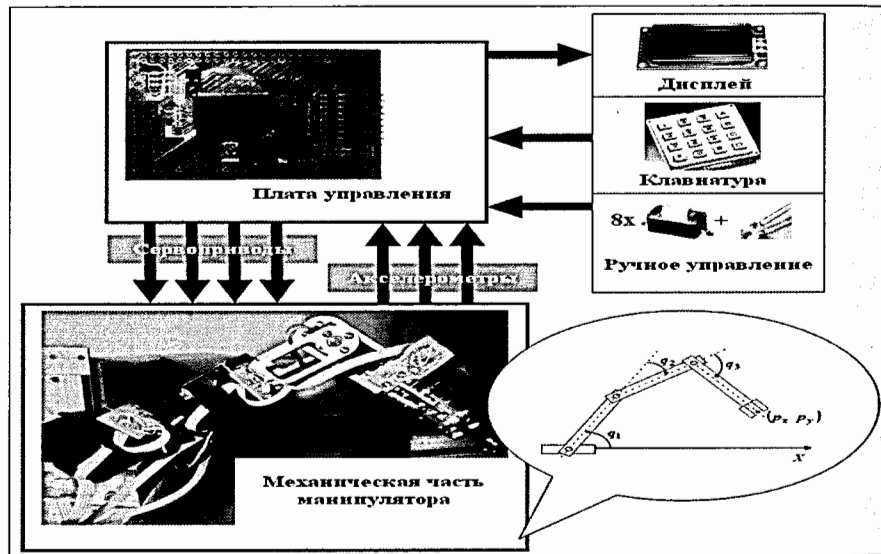


Рис. 5.2. Макет робота-манипулятора

Поддерживается режим как автоматического, так и ручного управления (возможность перемещения каждого из трех звеньев и устройства захвата манипулятора с помощью кнопок ручного управления).

В робототехнике, как правило, строится математическая модель робота-манипулятора, проводится моделирование ОУ, идентификация параметров математической модели и затем сравнение результатов моделирования на математической модели ОУ и реальном физическом роботе-манипуляторе.

В отличие от традиционного подхода в данном случае поведение звеньев макета робота-манипулятора было формализовано таблицами соответствий «ширина управляющего импульса сервопривода – угол перемещения», что позволило описать поведение макета в среде MATLAB/SIMULINK, т. е. была создана модель реального ОУ без привлечения математической модели манипулятора.

Создание модели реального ОУ позволило ускорить идентификацию модели ОУ и получение приемлемых параметров управления.

5.3. Исследование ИСУ на основе генетического алгоритма

Как было отмечено при постановке задачи управления, в общем случае необходимо найти коэффициенты ПИД-регулятора $K_{pi}, K_{di}, K_{ii}, i = 1, 3$, при которых обеспечивается желаемый характер движения звеньев робота-манипулятора.

Для определения коэффициентов $K_{pi}, K_{di}, K_{ii}, i = 1, 3$, аналитическими методами необходимы первоначальные знания о системе управления и характере поведения ОУ, т. е. корректное определение коэффициентов ПИД-регулятора возможно с привлечением эксперта.

Включение в систему управления элементов интеллектуальных вычислений может позволить описать требования к системе управления в терминах качественных критериев.

Так, определение параметров управления возможно с использованием ГА, для чего необходимо лишь корректно определить функцию пригодности (*fitness*-функцию) ГА, например следующим образом: $fitness = (PTS = 1) \cap (I_T \rightarrow 0)$, где PTS (*Position Task Solution*) – решение задачи позиционирования манипулятором с тремя степенями свободы, а I_T – быстродействие системы управления. Задача позиционирования считается решенной, если по завершении заданного числа итераций I_{max} выполняется условие

$$\begin{cases} PTS = 1, & \text{if } |q_{1ref} - q_1| + |q_{2ref} - q_2| + |q_{3ref} - q_3| \leq 1^\circ, \\ PTS = 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5.1)$$

где $q_{1ref}, q_{2ref}, q_{3ref}$ – желаемые положения звеньев, q_1, q_2, q_3 – текущие положения звеньев. Быстродействие системы I_T определяется количеством итераций от начала воздействия, в течение которых осуществляется позиционирование каждого из звеньев с допустимой ошибкой $2\Delta < 1^\circ$:

$$I_T = I \left((|q_{1ref} - q_1| < 1^\circ) \cap (|q_{2ref} - q_2| < 1^\circ) \cap (|q_{3ref} - q_3| < 1^\circ) \right). \quad (5.2)$$

Исходя из заданной функции пригодности выбор коэффициентов $K_{pi}, K_{di}, K_{ii}, i = 1, 3$, определяется с учетом обеспечения гарантированного решения задачи позиционирования с максимальным быстродействием.

Интеллектуальная надстройка в виде звена ГА без разрушения нижнего исполнительного уровня позволяет оперировать качественными критериями системы.

Структурная схема системы управления на ГА приведена на рис. 5.3, где Q_{ref} – воздействующий (задающий) сигнал, Q' – измеренная регулируемая величина, $s(t)$ – ограничение управляющего воздействия, $K = [K_{p1}, K_{d1}, K_{i1}; K_{p2}, K_{d2}, K_{i2}; K_{p3}, K_{d3}, K_{i3}]$ – матрица коэффициентов ПИД-регулятора, $d(t)$ – задержка в ИС, $m(t)$ – внешнее воздействие среды.

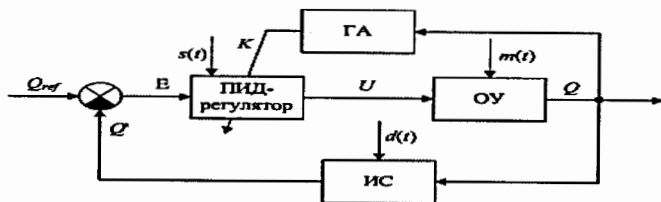


Рис. 5.3. Структурная схема системы управления на ГА

Выбор коэффициентов ПИД-регулятора в системе управления на основе ГА осуществляется один раз для одного или ряда случаев (штатные ситуации управления). Эти коэффициенты в процессе работы остаются неизменными. В результате система управления на основе ГА справляется с задачей точного позиционирования манипулятора в штатных ситуациях.

Однако система управления на основе ГА не обеспечивает в этом случае гарантированного управления в условиях непредвиденных ситуаций управления, что демонстрируется на рис. 5.4.

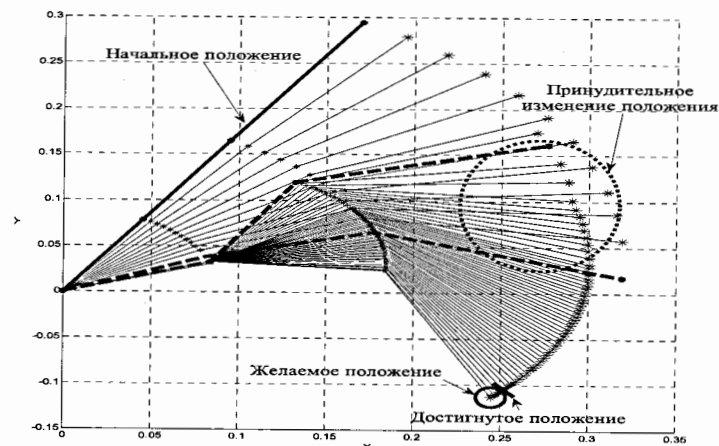


Рис. 5.4. Работа системы управления на основе ГА: в штатной ситуации управления (слева); в непредвиденной ситуации управления (справа)

На рис. 5.4 в качестве непредвиденной предполагается ситуация, одновременно включающая внешнее воздействие (принудительное перемещение второго звена, рис. 5.5, а) и внутренние изменения регулирующего звена (ограничение управляющего воздействия на рис. 5.5, б).

Применение системы управления на основе ГА ограничено требованием наличия описания постоянных условий внешней среды и известных структур управляющего звена и ОУ.

Расширение применимости системы управления возможно с помощью увеличения интеллектуальности системы управления – использования динамической настройки коэффициентов ПИД-регулятора, что возможно с включением элементов технологии мягких вычислений.

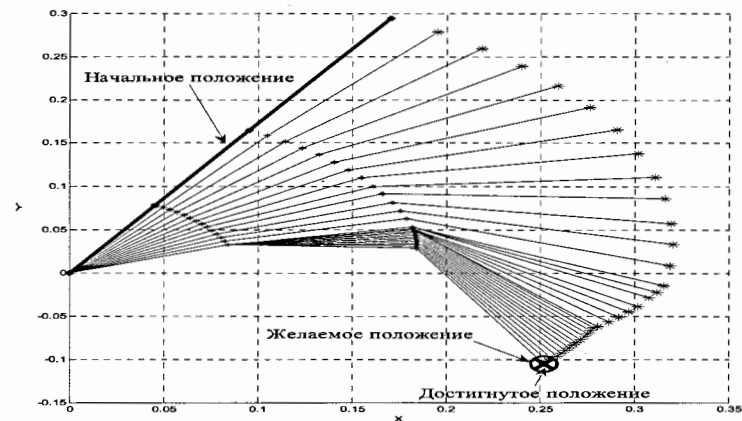


Рис. 5.5, а. Принудительное перемещение второго звена

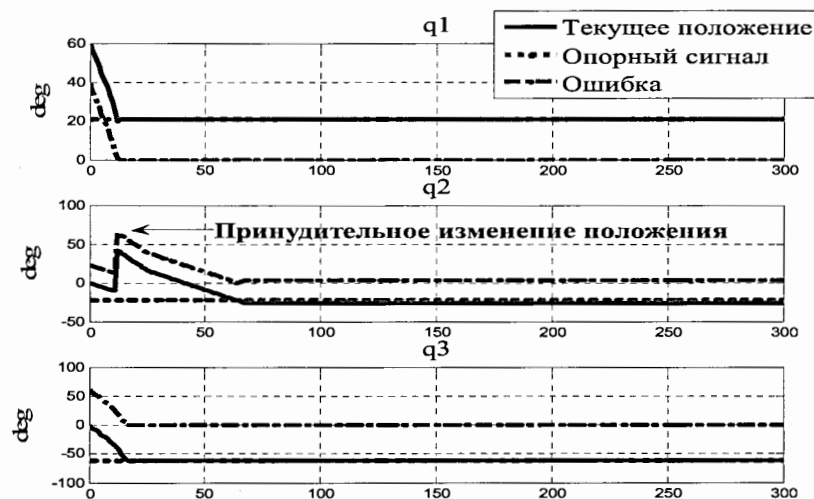


Рис. 5.5, б. Динамика изменения положений звеньев

5.4. Проектирование ИСУ с применением оптимизатора баз знаний на основе технологии мягких вычислений

Основным элементом ИСУ с применением технологий мягких вычислений является НР, управляющий коэффициентами усиления ПИД-регулятора. НР осуществляет управление за счет интегрированной в него БЗ, включающей данные о виде и параметрах функций принадлежности входных и выходных нечетких переменных, а также набор нечетких продукционных правил.

Создание БЗ производится с помощью интеллектуального инструментария оптимизатора баз знаний на основе мягких вычислений в следующей последовательности:

- создание обучающего сигнала – определение типовой ситуации управления (например, штатная ситуация), формирование таблицы коэффициентов ПИД-регулятора и ошибок управления с помощью ГА;
- формирование модели нечеткого вывода – определение типа нечеткой модели, интерпретации нечетких операций, числа входных и выходных переменных;
- создание лингвистических переменных для входных значений;
- создание базы правил;
- настройка базы правил;
- оптимизация левых и правых частей правил БЗ.

На рис. 5.6 и 5.7 приведены два возможных варианта реализации ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях для управления роботом-манипулятором с тремя степенями свободы:

ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и, соответственно, одной БЗ (рис. 5.6).

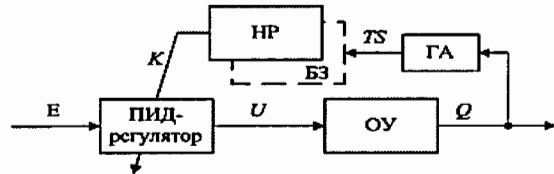


Рис. 5.6. ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР

ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (три независимых НР – одна БЗ управляет одним звеном), рис. 5.7.

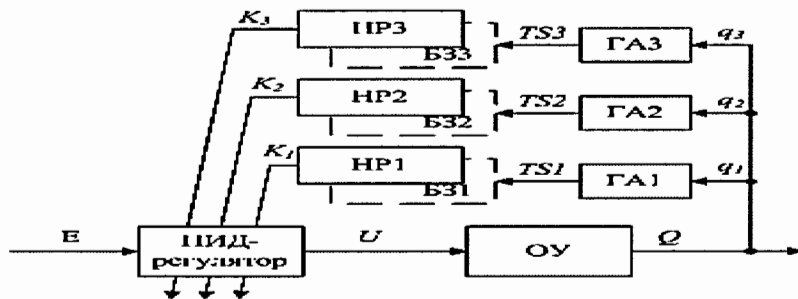


Рис. 5.7. ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (с тремя НР)

Рассмотрим более подробно процесс создания БЗ для ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

1. *Создание ОС.* Первоначально необходимо определить типовую ситуацию управления. В качестве типовых ситуаций управления можно рассматривать штатные ситуации управления.

В рабочем пространстве робота-манипулятора выделим группу из десяти точек, которые определим как штатные ситуации управления (рис. 5.8).

За начальное положение манипулятора принимается конфигурация: $q_1 = 60^\circ$; $q_2 = 0^\circ$; $q_3 = 0^\circ$.

Для создания ОС были использованы три эксперимента (из штатных), для каждого из которых были созданы ОС1, ОС2 и ОС3, для чего с помощью моделей MATLAB/SIMUSINK были воспроизведены ситуации управления, в которых параметры ПИД-регулятора определялись с помощью ГА.

На рис. 5.9 в качестве примера приведен ОС1, на котором в левом столбце $[e_{гp1}, e_{гd1}, e_{гi1}; e_{гp2}, e_{гd2}, e_{гi2}; e_{гp3}, e_{гd3}, e_{гi3}]$ – вектор входных переменных пропорциональных, дифференциальных и интегральных ошибок первого, второго и третьего звеньев манипулятора, в правом столбце $[K_{p1}, K_{d1}, K_{i1}; K_{p2}, K_{d2}, K_{i2}; K_{p3}, K_{d3}, K_{i3}]$ – вектор выходных переменных (определенных ГА) пропорциональных, дифференциальных и интегральных коэффициентов ПИД-регулятора первого, второго и третьего звеньев манипулятора соответственно.

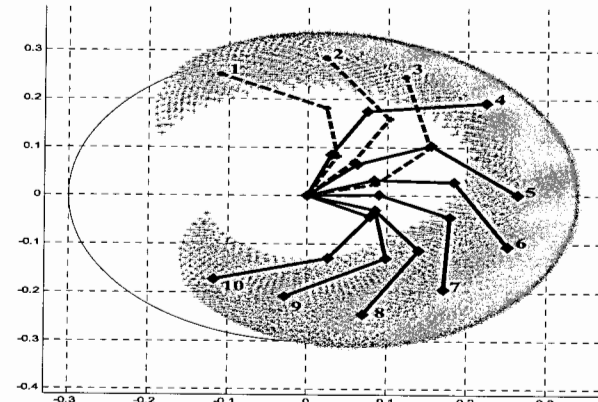


Рис. 5.8. Тестовое пространство

Итоговый ОС, используемый для получения БЗ, состоит из последовательно соединенных ОС1, ОС2 и ОС3.

2. *Формирование модели нечеткого вывода.*

Конкретизируется:

- тип нечеткой модели: Сугено 0 (нулевого порядка);
- интерпретация нечетких операций – нечеткая конъюнкция как произведение;
- число входных и выходных переменных: 9 и 9.

3. Создание лингвистических переменных для входных значений.

С помощью ГА в составе ОБЗ определяются оптимальное число и форма функций принадлежности.

При создании БЗ первоначально было задано создание пяти функций принадлежности для каждой из девяти входных переменных, т. е. вектор $[n_1, n_2, n_3; n_4, n_5, n_6; n_7, n_8, n_9] = [5, 5, 5; 5, 5, 5; 5, 5, 5]$, что привело бы к созданию $n_1 \times n_2 \times n_3 \times n_4 \times n_5 \times n_6 \times n_7 \times n_8 \times n_9 = 1953125$ нечетких правил.

После работы ГА вектор $[n_1, n_2, n_3; n_4, n_5, n_6; n_7, n_8, n_9]$ принял значение $[4, 4, 4; 4, 4, 4; 3, 3, 3]$, а максимальное число нечетких правил составило 110592 (на рис. 5.10 приведены число и форма функций принадлежности для входных переменных 1 – 3).

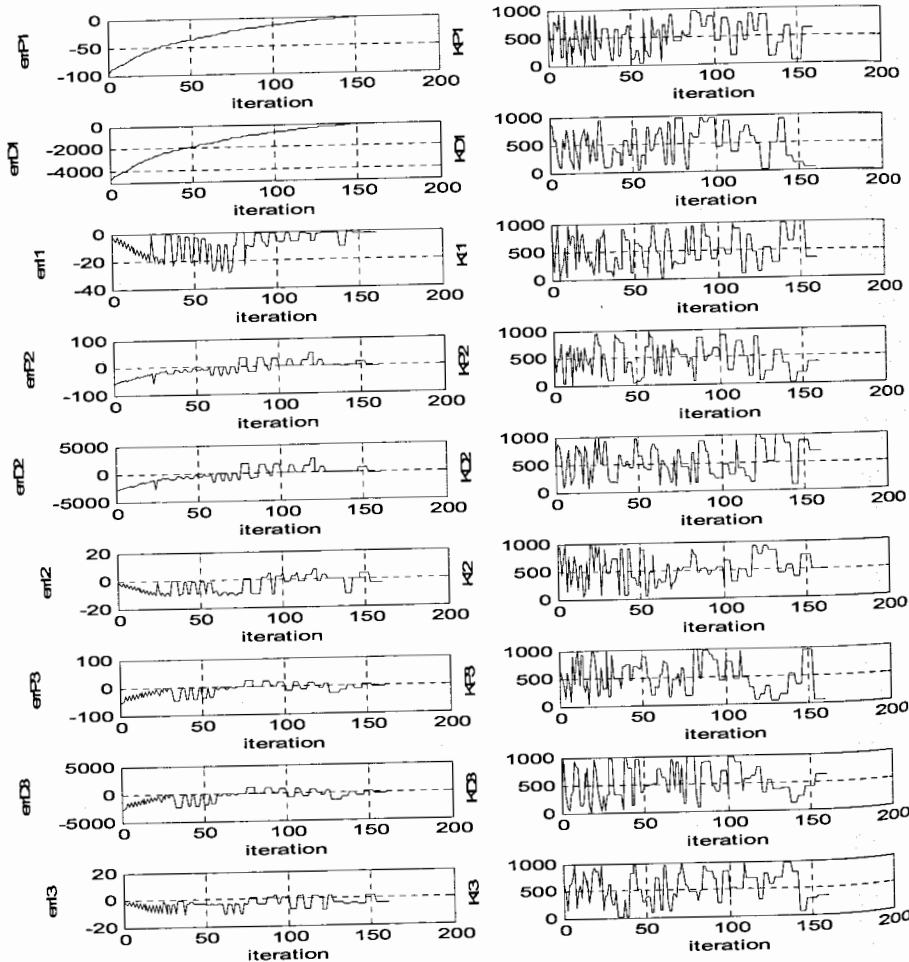


Рис. 5.9. ОС1 для ИСУ на ОБЗ с одним НР

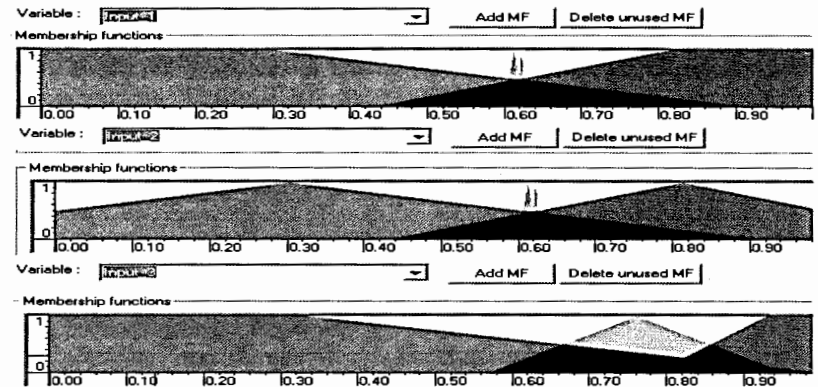


Рис. 5.10. Функции принадлежности для входных значений 1 – 3

4. Создание базы правил.

Благодаря использованию алгоритма отбора правил (прохождение заданного порога активации) из 110592 правил были отобраны 33 наиболее робастных.

5. Настройка базы правил. Оптимизация левых и правых частей правил БЗ.

Используется традиционный метод обратного распространения ошибки. Вид созданной БЗ для выхода 1 приведен на рис. 5.11.

В данном разделе приводилась зависимость максимального числа нечетких правил от количества функций принадлежности для входных переменных n_i ; максимальное число нечетких правил для созданной ранее БЗ при трех - четырех функциях принадлежности составляло 110592 правила. Предположим меньшее количество функций принадлежности, для каждой входной переменной равное трем. Тогда зависимость максимального числа нечетких правил от числа степеней свободы манипулятора имеет вид, приведенный на рис. 5.12.

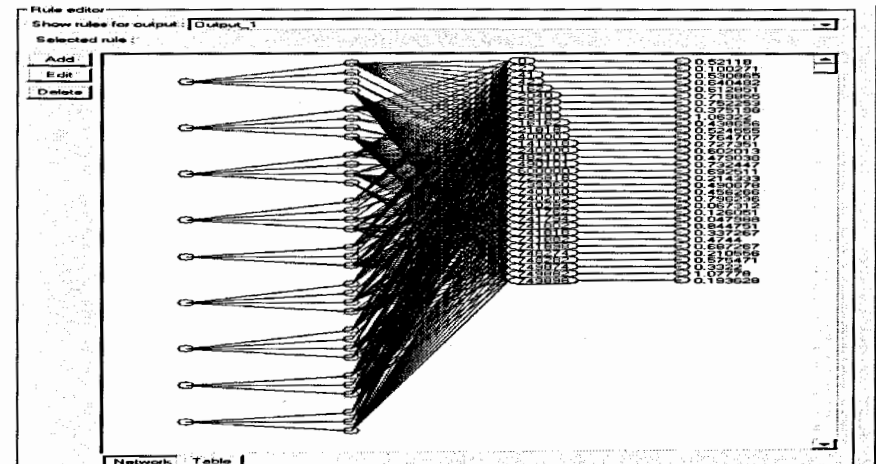


Рис. 5.11. БЗ: пример для выхода 1



Рис. 5.12. Зависимость максимального числа нечетких правил от числа степеней свободы манипулятора

При необходимости введения дополнительных звеньев, расширения функций уже существующих или добавления прочих устройств, требующих координационного управления, каждая степень свободы будет увеличивать максимальное число нечетких правил более чем на полтора порядка. Это приводит к увеличению сложности создания БЗ и, как следствие, к увеличению времени создания БЗ, повышению требований к вычислительным ресурсам процессора, на котором создаются БЗ, и объему памяти системы, в которой размещается БЗ.

При возникновении ситуаций, когда сложность реализации единой БЗ высока, одним из реальных выходов может быть разделение БЗ на несколько, соответственно использовать не один НР, а несколько НР. Например, возможно использование предложенной ранее ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с тремя независимыми НР (рис. 5.7).

Рассмотрим разделение управления согласно рис. 5.7, при котором один НР управляет одним звеном манипулятора. Необходимо создать три БЗ для соответственно трех НР. Число входных и выходных переменных для каждой из баз снизится в три раза и, как следствие, снизится максимальное число нечетких правил.

Рассмотрим процесс создания БЗ.

5.5. Применение оптимизатора баз знаний на основе мягких вычислений: декомпозиция управления

Используем рассмотренную ранее последовательность создания БЗ для ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с тремя НР.

1. Создание обучающего сигнала.

Созданы три ОС для трех БЗ (соответственно трех звеньев). Каждый из ОС, в свою очередь, состоит из двух ОС (соответственно двух типовых экспериментов).

Конечные ОС для создания трех независимых БЗ (соответственно ОС1, ОС2 и ОС3) содержат в левом столбце вектор входных переменных пропорциональных, дифференциальных и интегральных ошибок ($[err_{p1}, err_{d1}, err_{i1}]$, $[err_{p2}, err_{d2}, err_{i2}]$ и

$[err_{p3}, err_{d3}, err_{i3}]$ соответственно для первого, второго и третьего звеньев манипулятора); в правом столбце – вектор выходных переменных (определенных ГА) пропорциональных, дифференциальных и интегральных коэффициентов ПИД-регулятора ($[K_{p1}, K_{d1}, K_{i1}]$, $[K_{p2}, K_{d2}, K_{i2}]$ и $[K_{p3}, K_{d3}, K_{i3}]$ соответственно для первого, второго и третьего звеньев манипулятора).

Пример ОС1 для создания БЗ1 приведен на рис. 5.13.

2. Формирование модели нечеткого вывода.

Для каждой из трех БЗ:

- тип нечеткой модели: Сугено 0 (нулевого порядка);
- интерпретация нечетких операций: нечеткая конъюнкция как произведение;
- число входных и выходных переменных: 3 и 3.

3. Создание лингвистических переменных для входных значений.

С помощью ГА1 в составе ОБЗ определяются оптимальное число и форма функций принадлежности.

При создании БЗ1, БЗ2 и БЗ3 и оптимизации ГА1 число функций принадлежности составило [3, 3, 5], [5, 5, 9] и [7, 7, 8], максимальное число нечетких правил 45, 225 и 392 соответственно (на рис. 5.14 приведены число и форма функций принадлежности входных переменных БЗ1).

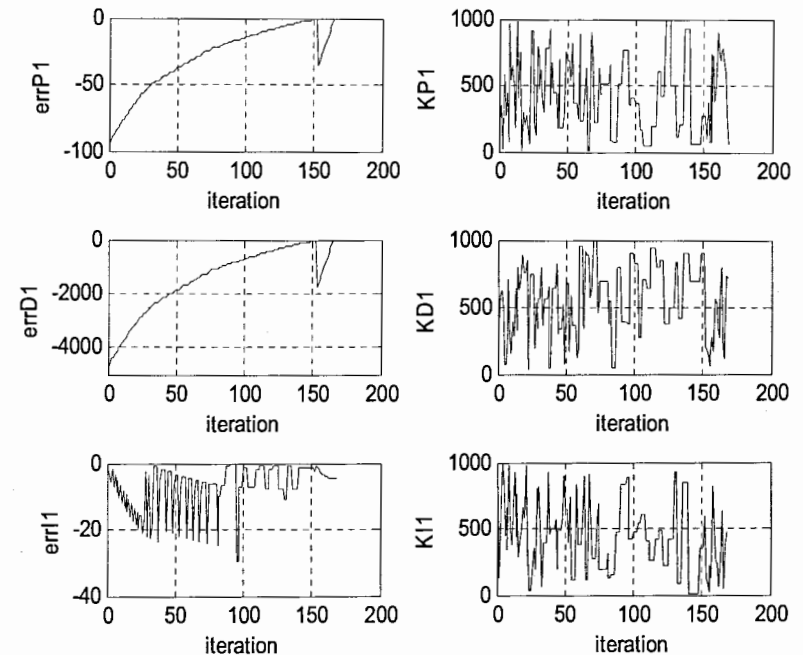


Рис. 5.13. ОС1 для БЗ1

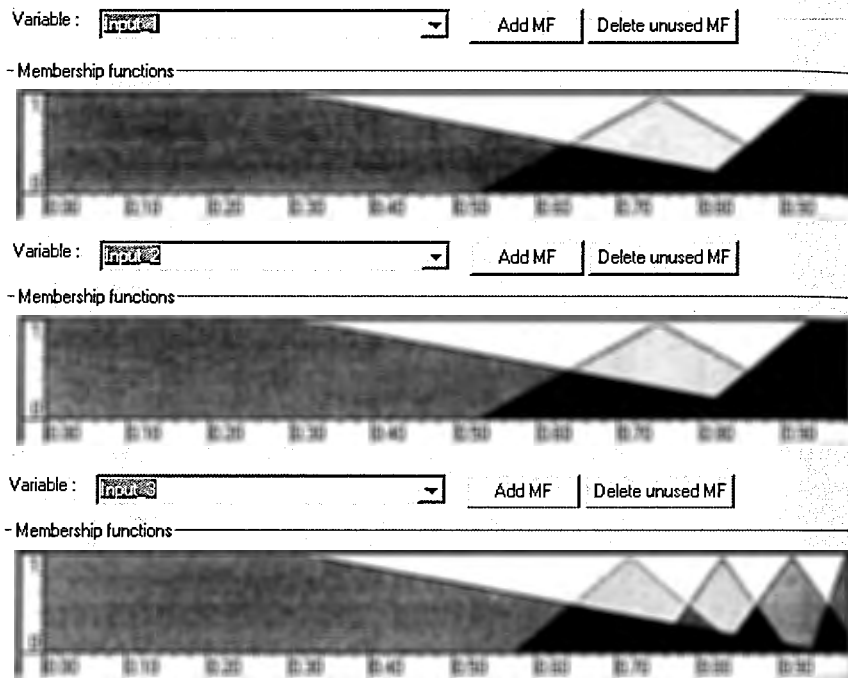


Рис. 5.14. Функции принадлежности для входных значений БЗ1

4. Создание базы правил.

Для БЗ1 из 45 правил отобрано 18, для БЗ2 из 225 правил – 26, для БЗ3 из 392 правил – 48.

Напомним, что при создании БЗ для ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР максимальное число нечетких правил составляло 110592, из которых было отобрано 33 наиболее робастных.

В рассматриваемом случае с разделенным управлением максимальное число правил (для БЗ3) составляет 392, что существенно снижает время отбора наиболее робастных правил.

Однако в целом количество отобранных правил ($18+26+48 = 92$ – суммарное количество отобранных правил БЗ1, БЗ2 и БЗ3) более чем в 2 раза превышает количество отобранных правил при использовании ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

Следовательно, размещение конечных БЗ при использовании ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением потребует большего объема памяти конечного устройства, в котором размещается система.

5. Настройка базы правил. Оптимизация левых и правых частей правил БЗ.

Используется традиционный метод обратного распространения ошибки. На рис. 5.15 приведен вид созданной БЗ1 для выхода 1.

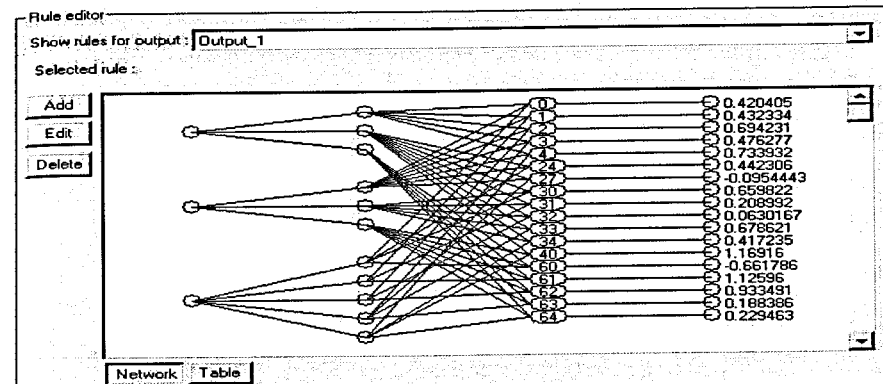


Рис. 5.15. БЗ1: пример для выхода 1

На рис. 5.16 приведена работа двух предлагаемых вариантов реализации ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях для управления роботом-манипулятором с тремя степенями свободы в непредвиденной ситуации управления, ранее предложенной для системы управления на основе ГА (рис. 5.4).

Из рис. 5.16 и 5.4 видно, что оба из двух предложенных вариантов реализации ИСУ на ОБЗ с применением технологий мягких вычислений в отличие от системы управления на основе ГА справляются с задачей точного позиционирования. Причем структура ИСАУ с использованием единой БЗ обеспечивает решение за меньшее количество итераций, чем структура ИСАУ с разделенным управлением.

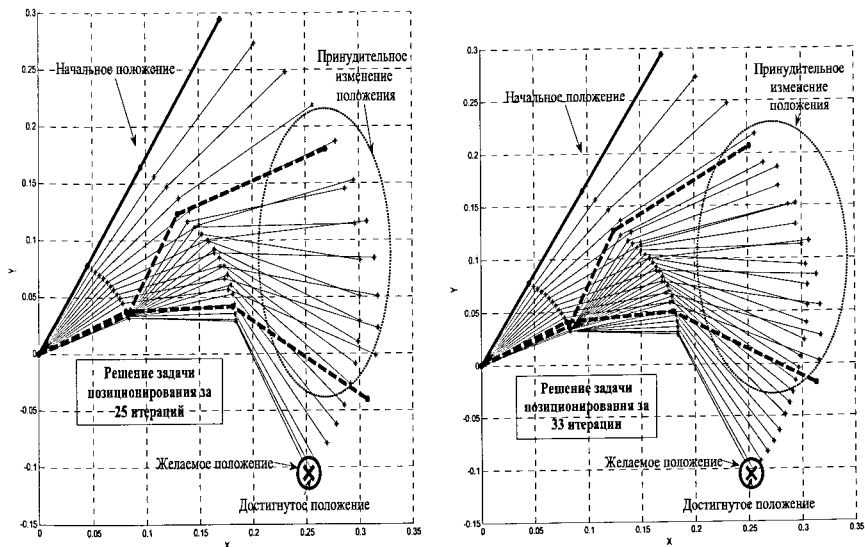


Рис. 5.16. Работа ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР в непредвиденной ситуации управления (слева); работа ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с тремя НР (справа)

5.6. Оценка качества работы систем управления

Для оценки и сравнения результатов испытаний рассмотренных типов систем управления – системы управления на основе ГА, ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (как для моделей MATLAB/SIMULINK, так и для макета робота-манипулятора) введена система критериев качества, учитывающая методы оценки переходных процессов теории автоматического управления [10]. Данные методы были адаптированы для конкретного ОУ (манипулятора с тремя степенями свободы) в следующем виде.

1. *Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления PTS_{KCS}* (Position Task Solution in known control situations).

Задача позиционирования считается решенной, если по завершении заданного числа итераций $I_{\max} = 300$ выполняется условие

$$\begin{cases} PTS = 1, & \text{if } |q_{1ref} - q_1| + |q_{2ref} - q_2| + |q_{3ref} - q_3| \leq 1^\circ, \\ PTS = 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (5.3)$$

где $q_{1ref}, q_{2ref}, q_{3ref}$ – желаемые положения звеньев, q_1, q_2, q_3 – текущие положения звеньев;

$$PTS \text{ выполнение} \equiv \frac{\sum_{i=1}^N PTS}{N}, \quad (5.4)$$

где N – число экспериментов.

2. *Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления PTS_{ACCS}* (Position Task Solution in the above considered control situations).

3. *Быстродействие I_T* .

Количество итераций от начала воздействия, в течение которых осуществляется позиционирование каждого из звеньев с допустимой ошибкой $2\Delta < 1^\circ$, определяется как

$$I_T = I \left| \left(|q_{1ref} - q_1| < 1^\circ \right) \cap \left(|q_{2ref} - q_2| < 1^\circ \right) \cap \left(|q_{3ref} - q_3| < 1^\circ \right) \right|; \quad (5.5)$$

$$I_T \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N I_T}{NI_{\max}}. \quad (5.6)$$

4. *Относительное значение перерегулирования σ* .

Отношение максимального отклонения текущего положения к установившемуся значению положения звена

$$\sigma = \max \left[\max \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, \max \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, \max \left| \frac{q_{3ref} - q_3}{q_{3ref}} \right| \right]; \quad (5.7)$$

$$\sigma \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \sigma}{N}. \quad (5.8)$$

5. *Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершении заданного числа итераций ε* .

$$\begin{cases} \varepsilon = \left| \frac{q_{1ref} - q_1}{q_{1ref}} \right|, & \text{if } \left(|q_{1ref} - q_1| > |q_{2ref} - q_2| \right) \cap \left(|q_{1ref} - q_1| > |q_{3ref} - q_3| \right); \\ \varepsilon = \left| \frac{q_{2ref} - q_2}{q_{2ref}} \right|, & \text{if } \left(|q_{2ref} - q_2| > |q_{1ref} - q_1| \right) \cap \left(|q_{2ref} - q_2| > |q_{3ref} - q_3| \right); \\ \varepsilon = \left| \frac{q_{3ref} - q_3}{q_{3ref}} \right|, & \text{if } \left(|q_{3ref} - q_3| > |q_{1ref} - q_1| \right) \cap \left(|q_{3ref} - q_3| > |q_{2ref} - q_2| \right) \end{cases}; \quad \varepsilon \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sum_{i=1}^N \varepsilon}{N}. \quad (5.9)$$

6. *Время одной итерации t* .

Реальное время выполнения одной итерации I выбранного типа системы управления t выполнение $\equiv 1 - \frac{t}{t_{const}}$, $t < t_{const}$. (5.10)

7. *Сложность реализации управления P* .

Оценка изменения коэффициентов управления:

$$P \text{ выполнение} \equiv 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{dK}{dt} \right)^2 dt}}{\max(K)}. \quad (5.11)$$

8. *Общая оценка управления FCB (Full Control Behavior)*.

$$FCB \equiv w_1 \cdot P[PTS_{KCS}] + w_2 \cdot P[PTS_{ACCS}] + w_3 \cdot P[I_T] + w_4 \cdot P[\sigma] + w_5 \cdot P[\varepsilon] + w_6 \cdot P[t] + w_7 \cdot P, \quad (5.12)$$

где w_i – весовые коэффициенты, значения которых приведены в табл. 5.1.

Таблица 5.1.
Значения весовых коэффициентов

Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления	PTS _{KCS}	w ₁	0,1
Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления	PTS _{ACCS}	w ₂	0,4
Быстродействие	I _T	w ₃	0,2
Относительное значение перерегулирования	σ	w ₄	0,05
Относительная ошибка позиционирования звеньев по завершении заданного числа итераций	ε	w ₅	0,1
Время одной итерации	t	w ₆	0,1
Сложность реализации управления	P	w ₇	0,05

9. Порядок проведения испытаний.

Для каждого из рассмотренных типов систем управления (управления на основе ГА, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением) проводится серия экспериментов, которая оценивается по введенным выше критериям качества.

Серия экспериментов состоит из двух этапов:

- работа в штатных ситуациях управления,
- работа в непредвиденных ситуациях управления.

В качестве штатных ситуаций управления выступают десять экспериментов в соответствии с группой точек рабочего пространства, определенных как тестовые (рис. 5.8).

За начальное положение манипулятора принимается конфигурация:

$$q_1 = 60^\circ; q_2 = 0^\circ; q_3 = 0^\circ.$$

В качестве нештатных ситуаций управления выступают три случая:

- 1) на 11-й итерации положение второго звена принудительно изменяется до значения $q_2 = 45^\circ$;
- 2) изменены начальные условия: $q_1 = 60^\circ; q_2 = 45^\circ; q_3 = -43^\circ$;
- 3) изменены начальные условия: $q_1 = 60^\circ; q_2 = 45^\circ; q_3 = -43^\circ$, и на 11-й итерации положение второго звена принудительно изменяется до $q_2 = 45^\circ$.

Каждая из трех непредвиденных ситуаций тестируется на десяти точках тестового пространства. Таким образом, проводится 30 экспериментов для непредвиденных ситуаций управления.

10. Моделирование и эксперимент: оценка качества управления.

Сравнение критериев качества управления для системы управления на основе ГА, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением для моделей MATLAB/SIMULINK и макета робота-манипулятора приведено соответственно на рис. 5.17 и 5.18.

Из результатов сравнения трех типов систем управления видно, что использование системы управления на ГА решает задачу точного позиционирования в половине из предложенных случаев. Однако система управления на основе ГА не обеспечивает гарантированного управления в условиях непредвиденных ситуаций управления (что демонстрировалось также ранее на рис. 5.4), в целом качество управления достаточно низкое.

В системе управления на основе ГА коэффициенты ПИД-регулятора не изменяются, что, с одной стороны, облегчает проектирование системы управления, а с другой, лишает систему управления возможности перестроения и адаптации.

Из результатов сравнения видно, что использование ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР позволяет получить максимальные оценки критериев качества «Решение задачи позиционирования в штатных ситуациях управления» и «Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления», а также добиться улучшения всех показателей, кроме критериев «Время одной итерации» и «Сложность реализации управления», так как динамическая настройка коэффициентов требует дополнительных вычислений.

ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР позволяет собрать в единую БЗ информацию о взаимном поведении одновременно трех звеньев робота-манипулятора, однако высокая сложность реализуемой БЗ требует значительных вычислительных ресурсов для создания и размещения.

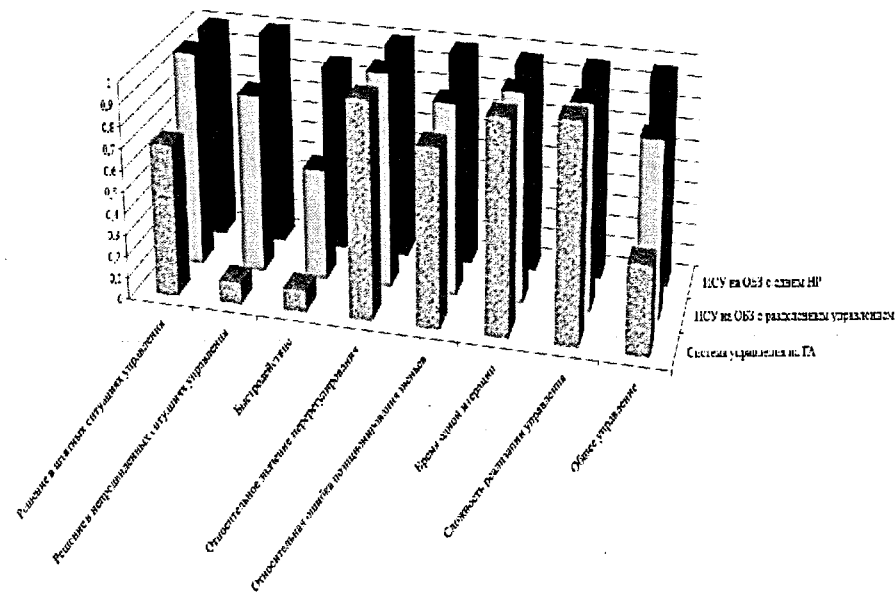


Рис. 5.17. Сравнение результатов работы системы управления на основе ГА, ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением при тестировании моделей MATLAB/SIMULINK

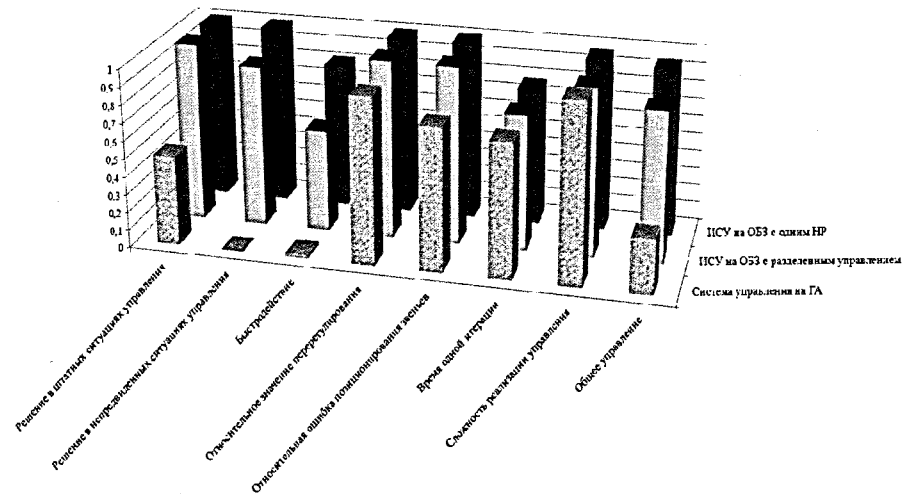


Рис. 5.18. Сравнение результатов работы системы управления на основе ГА, ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением при физическом тестировании модуля манипулятора

Разделение управляющего звена на три независимых НР (одна БЗ управляет одним звеном) позволяет за счет некоторого снижения качества управления значительно упростить процессы создания, оптимизации и размещения БЗ.

Из результатов сравнения видно, что при использовании ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (с тремя НР) все показатели качества несколько ухудшаются, что происходит в результате рассогласования работы разделенных независимых БЗ.

11. Формирование законов управления.

Рассмотрим законы управления, формируемые описанными типами систем управления: системой управления на основе ГА, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (рис. 5.19). На рис. 5.19 используются следующие обозначения законов управления: «GA» – формируемый системой управления на основе ГА, «FC» – формируемый ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, «FC Decomposition» – формируемый ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением.

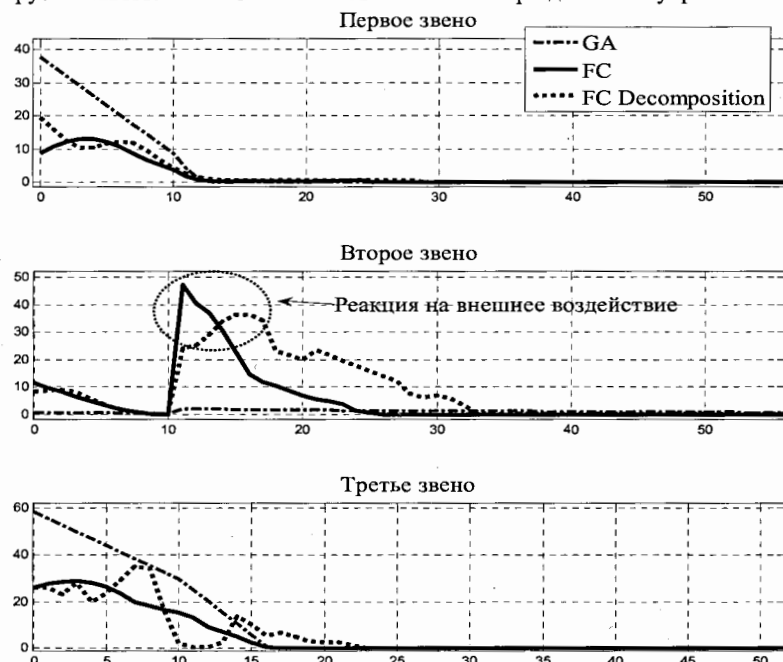


Рис. 5.19. Законы управления, формируемые системой управления на ГА, ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением

Из рис. 5.19 видно, что законы управления, формируемые системой управления на основе ГА для первого и третьего звеньев, имеют заведомо большую амплитуду по сравнению с аналогичными законами управления, формируемыми ИСАУ на ОБЗ на

мягких вычислениях, однако для второго звена в законе управления, формируемом системой управления на основе ГА, не отражается реакция на внешнее воздействие, в результате чего задача точного позиционирования не решается. Законы управления, формируемые ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, по сравнению с ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР при сравнимой амплитуде имеют большее перерегулирование.

Таким образом, минимальный расход полезного ресурса при формировании законов управления обеспечивается при использовании ИСАУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

5.7. Выводы

В результате сравнения работы рассмотренных типов систем управления роботом-манипулятором с тремя степенями свободы можно сделать следующие выводы:

- структура системы управления на основе ГА проста для реализации, однако вследствие постоянства параметров управления решение задачи точного позиционирования возможно только для штатных ситуаций (для которых были подобраны коэффициенты ПИД-регулятора);
- единая БЗ ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР содержит наиболее полную информацию о поведении всех звеньев, что позволяет ИСАУ работать как в штатных, так и в непредвиденных ситуациях управления. Однако создание единой БЗ – сложный и длительный процесс, требующий значительных вычислительных ресурсов, а в дальнейшем – большого объема памяти для размещения БЗ;
- декомпозиция управления в структуре ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (за счет незначительного снижения качества управления вследствие рассогласования поведения звеньев в результате независимости создания и функционирования БЗ) позволяет значительно упростить процессы создания и размещения БЗ.

Рекомендуемая литература к главе 5

1. International assessment of research and development in robotics. WTEC Panel Report. 2006.
2. Черноусько Ф. Л., Болотник Н.Н., Градецкий В.Г. Манипуляционные роботы: Динамика, управление, оптимизация. М: Наука, 1989.
3. Hvilshoj M., Bogh S. "Little Helper" – An Autonomous Industrial Mobile Manipulator Concept // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2011. V. 8, No. 1.
4. Филлипс Ч., Харбор Р. Системы управления с обратной связью. М.: Лаборатория базовых знаний, 2001.
5. Bucz Š., Kozakova A. PID Controller design for specified performance introduction to PID controllers – Theory, Tuning and Application to Frontier Areas (Ed. by R. C. Panda). InTech, 2012.
6. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: Технологии мягких вычислений. М.: ВНИИгеосистем, 2011.

7. Сорокин С.В., Нефедов Н.Ю., Решетников А.Г., Ульянов С.В. Архитектура подсистемы нечеткого вывода для оптимизатора баз знаний // Программные продукты и системы. 2013. №1.
8. Николаева А.В., Петров С.П., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором. Ч.1: Технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. 2012. №3.
9. Михайлов В.С. Теория управления. Киев: Выща школа, 1988.

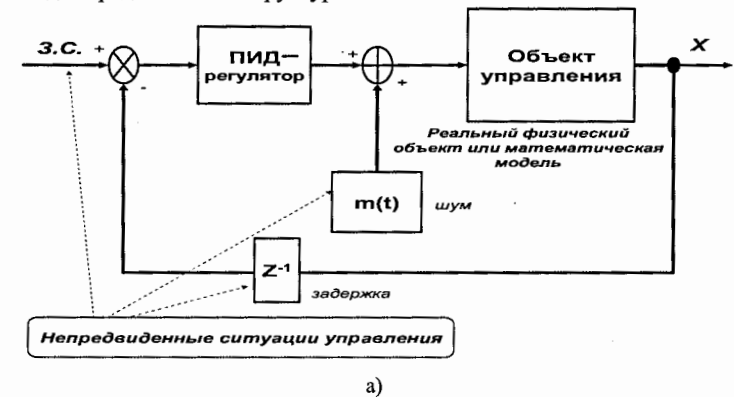
Контрольные вопросы к главе 5

1. Структура САУ роботом-манипулятором на основе ПИД-регулятора.
2. Структура системы управления роботом-манипулятором на основе генетического алгоритма.
3. Проектирование ИСУ роботом-манипулятором с применением ОБЗ на основе мягких вычислений.
4. Применение ОБЗ на основе мягких вычислений: декомпозиция управления.
5. Оценка качества работы ИСУ роботом-манипулятором.
6. Формирование законов управления роботом-манипулятором.

Приложение. Нечеткость и условия неопределенности в робастных системах управления

Одним из критичных факторов, влияющих на качество систем управления, функционирующих в условиях неопределенности, является информационный риск, наличие которого в контуре управления существенно снижает информационную и структурную безопасность жизненно важных ОУ. Материальный и моральный урон, наносимый от данного фактора, хорошо известен. Источниками информационного риска в системах принятия решений и управления являются следующие: 1) проявление негативного человеческого фактора в контуре управления; 2) отсутствие необходимой информации о нештатной ситуации; 3) структурные нарушения в объекте и системе управления; 4) задержки сигналов ошибки в контурах и обратных связях управления; 5) шумы в датчиках съема, измерения и сбора данных; 6) неполное описание среды функционирования и динамики ОУ и мн. др.

Рисунок П.1 иллюстрирует типовые источники непредвиденных ситуаций управления для традиционных структур САУ.



б)

Рис. П.1. Структура САУ (а) и типовые источники непредвиденных ситуаций управления (б)

Во многих ситуациях существующий и наблюдаемый разброс в источниках непредвиденных ситуаций на рис. П.1б в действительности не хаотичен, а характеризуется определенным статистическим или вероятностным распределением $p(x)$, где x является вектором случайных событий, характеризующим непредвиденную ситуацию управления.

При обнаружении сигналов, описывающих поведение ОУ на рис. 6.1а, важен не только факт их наличия, но и величина необходимых информативных параметров, несущих данные об опасности возникновения нештатной ситуации, которая содержится в таких сигналах.

Целью данного приложения является описание существующих объективных информационных и логических ограничений на описание непредвиденных ситуаций управления, которые необходимо учитывать при их возможном возникновении в виде оценок приращения информационного риска для разработки корректных математических моделей продукционных правил БЗ нечеткого логического вывода в ИР.

Рассматриваются возможные подходы к построению аппроксимаций и оценок робастности таких моделей, роли видов интеллектуальных вычислений (ИВ) в компенсации неточностей описания моделей непредвиденных ситуаций управления и смежных вопросов, таких как синергизм информации при разработке процессов самоорганизации информационных процессов в ИСУ и др.

Предварительно кратко рассмотрим некоторые методы теории и систем управления оценки и учета неопределенностей в структурах робастных САУ.

П.1. Учет факторов неопределенности в структурах робастных САУ

Современные технологии робастного многопараметрического управления типа H_2/H_∞ или смешанного μ -синтеза традиционных регуляторов и др. позволяют учитывать наличие степени неопределенности в параметрах и/или в динамическом поведении ОУ.

В данных технологиях (по аналогии с традиционным подходом в теории автоматического управления – ТАР) проектирование робастных регуляторов основано на предположении, что динамическое поведение нелинейного ОУ можно аппроксимировать с достаточной точностью линеаризованной динамической моделью. В этом случае в постановке задачи проектирования регуляторов изменения (возмущения) параметров во времени и качественное описание нелинейных характеристик ОУ учитываются в структуре системы управления и рассматриваются как «уровни неопределенности» Δ . Так, например, дробно-линейное преобразование с так называемой $M-\Delta$ -конфигурацией применяется в анализе задач с неопределенностями, когда система приводится к виду, изображенному на рис. П.2.

На рис. П.2 ω – внешние возмущения, z – выход, $M = M(s) = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix}$ – передаточная функция, и $\Delta(s)$ – матричная функция, описывающая разного рода неопределенности.

В этом случае можно записать соотношения между сигналами на схеме рис. П.2 в следующем виде:

$$e_1 = (I - M_{11}\Delta)M_{12}\omega, \quad z = (M_{12}\Delta[I - M_{11}\Delta]^{-1}M_{22})\omega.$$

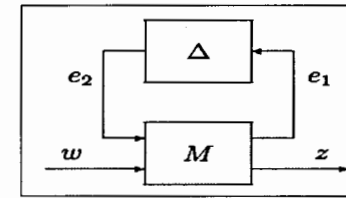


Рис. П.2. Структуры с $M-\Delta$ -конфигурацией

Таким образом, параметр неопределенности $\Delta(s)$ вводится в структуру САУ и дает возможность провести анализ и синтез выбора оптимальной (адаптивной) структуры САУ.

На рис. П.3 приведены структуры САУ с неопределенными параметрами.

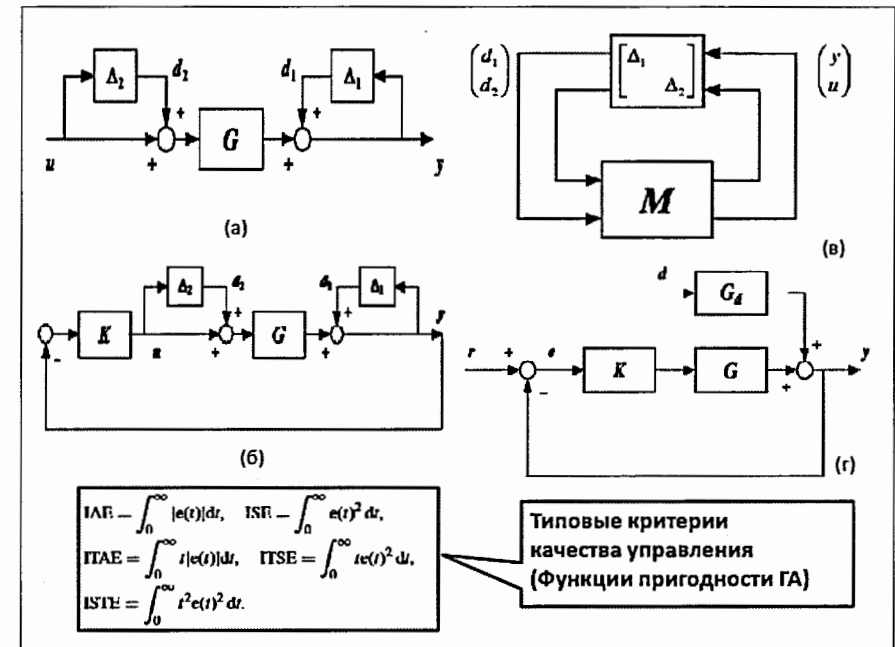


Рис. П.3. Модели САУ с неопределенными параметрами структуры: а) модель с неопределенной структурой; б) модель с обратной неопределенной связью; в) структура с $M-\Delta$ -конфигурацией; г) типовая структура с обратной связью

Для ОУ с передаточной функцией G на рис. П.3, а имеем передаточную функцию с неопределенностью вида $G_\Delta = (I - \Delta_1)^{-1}G(I + \Delta_2)$, $\Delta_1, \Delta_2 \in H_\infty$.

Для анализа робастности структура с $M-\Delta$ -конфигурацией на рис. П.3, в матрица M для передачи сигналов d_1, d_2 к сигналам y, u задается как

$M = \begin{bmatrix} (I + GK)^{-1} & (I + GK)^{-1} \\ -K(I + GK)^{-1} & -K(I + GK)^{-1}G \end{bmatrix}$ и критерий робастности задается параметром в виде

$$\gamma = \left\| \begin{bmatrix} G \\ I \end{bmatrix} (I + GK)^{-1} \begin{bmatrix} -K & I \end{bmatrix} \right\|_{\infty}.$$

Для простой одноконтурной САУ имеем

$$\gamma = \left\| \begin{bmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{bmatrix} M^T \begin{bmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{bmatrix} \right\|_{\infty} = \|M^T\|_{\infty} = \|M\|_{\infty}.$$

При этом сама величина параметра Δ определяется экспертом.

В результате существенных изменений во времени параметры и/или нелинейные неизвестные характеристики описываются в линеаризованной модели ОУ с избыточной мерой неопределенности.

В табл. П.1 приведены известные в литературе достоинства и недостатки применяемых в робастном анализе методов.

Отметим, что для достаточно большой меры неопределенности может не существовать регулятора, который справляется с задачей управления в такой ситуации, в частности, для всех мер и форм неопределенности. Более того, спроектированный регулятор, если он существует, может быть своего рода «консервативным» в смысле отсутствия в его структуре возможности учета наихудших случаев непредвиденных (нештатных) ситуаций управления.

Таблица П.1.

Название	Преимущества	Недостатки
H_{∞} -синтез	Работает как с устойчивостью, так и с чувствительностью системы, замкнутый контур устойчив, прямой однопроходный алгоритм синтеза	Требует особого внимания к параметрической робастности объекта управления
H_2 -синтез	Работает как с устойчивостью, так и с чувствительностью системы, замкнутый контур устойчив, точное формирование передаточной функции контроллера	Большое количество итераций
LQG-синтез	Использование доступной информации о помехах	Не гарантируются запасы устойчивости, требуется точная модель объекта, большое количество итераций
LQR-синтез	Гарантированное обеспечение робастной устойчивости, безынерционный регулятор.	Требуются обратная связь по всему вектору состояния, точная модель объекта, большое количество итераций
μ -синтез	Работает с широким классом неопределенностей	Большой порядок контроллера

Существует ряд стратегий в технологии нелинейного управления, таких как линеаризация с обратной связью, преобразования обратной динамики, скользящий режим, нелинейное демпфирование, адаптация (например, оценка параметров в on line) и др. Однако не существует общей методологии нелинейного управления, в которой достоверно получаемые решения полностью непротиворечивы, а также согласованы с требованиями качества управления и формами неопределенности.

Для решения подобных задач разрабатывается теория ИСУ. Одним из основных назначений и преимуществ эффективного применения ИСУ является возможность гарантированного достижения цели управления с максимальным качеством управления на верхнем уровне и минимальным расходом полезного ресурса системы «объект управления + регулятор» на нижнем (исполнительском) уровне иерархической САУ.

На содержательном уровне данная возможность отражает назначение целенаправленной деятельности ИСУ в общем случае непредвиденных ситуаций управления.

При этом эффективность применения ИСУ зависит от уровня интеллектуальности разработанной системы (формы, вида и глубинного представления знаний). Важную роль при формировании уровня интеллектуальности САУ играет выбор используемого инструментария технологии ИВ для проектирования соответствующей БЗ при заданной цели управления.

Динамическое поведение ОУ и системы управления (регулятора) служит источником объективных знаний для формирования БЗ, полнота (soundness) которой зависит от достоверности извлекаемой из конкретного источника информации. Неточность (imperfect) измерения (обусловленная объективной природой объекта) и недостоверность (unreliable) представления извлекаемой информации (например, из-за присутствия человеческого фактора в контуре управления) приводит к повышению информационного риска и возникновению непредвиденных ситуаций управления, компенсация которых для обеспечения робастности управления осуществляется применением необходимого уровня ИВ.

В фиксированных ситуациях управления ИВ с БЗ (спроектированные с помощью оптимизатора БЗ – ОБЗ) обладают повышенной робастностью, соответствующие законы управления содержат меньше избыточной информации, используют минимальное количество датчиков и исходной информации и способны реализовать элементы самоорганизации поведения ОУ в непредвиденных ситуациях управления. Следует подчеркнуть, что наличие избыточности информации в законах управления является физической объективностью, которая присутствует вследствие использования в процессах оптимизации БЗ случайного поиска в виде ГА, а также следует из законов теории информации о необходимости наличия избыточности в ненадежных каналах передачи данных с помехами. Этот факт является неизбежной платой за возможность получить решение задачи оптимального управления существенно-нелинейными ОУ в условиях неопределенности исходной информации и многокритериальности условий оптимизации.

П.2. Проблемы разработки ИСУ на технологиях мягких вычислений

Одной из трудностей разработки ИСУ для непредвиденных ситуаций управления и в условиях информационного риска является решение проблемы проектирования соответствующей БЗ, использующей объективные знания о поведении ОУ и нечетких гибридных ПИД-регуляторов. Поэтому одной из сложных и ключевых проблем разработки основы информационной технологии проектирования ИСУ для такого

широкого класса ОУ является процесс извлечения объективных знаний. На их основе осуществляется реализация этапов проектирования робастных БЗ в непредвиденных ситуациях управления для исполнительного уровня иерархической структуры управления, учитывающего в производственных правилах БЗ реальные физические и информационные ограничения. В частности, в качестве информационных ограничений рассматриваются информационные оценки приращения риска, которые учитываются в части логической посылки «Если...» производственных правил «Если А, то В».

Взаимосвязи вопросов корректности (неточности) описания моделей ОУ и роль технологии ИВ рассмотрим на примере решения задач робастного интеллектуального управления на основе технологий мягких вычислений.

П.2.1. Технология мягких вычислений и описание неопределенностей

С точки зрения применения в системной инженерии технология мягких вычислений базируется на двух основных идеях: 1) на обобщении понятия числа путем введения качественной (лингвистической) шкалы, что привело к созданию нечетких множеств, нечетких чисел и лингвистических переменных с соответствующими операциями над ними; и 2) на введении понятия нечеткого логического вывода, что привело к созданию нечеткой логики с различными моделями нечеткой импликации и производственных правил.

Обобщение понятия числа происходит за счет введения новой (субъективной) качественной шкалы и отображения в нее с помощью функции принадлежности (ФП) лингвистической аппроксимации его количественной характеристики.

Типовые ФП $\mu_A(x)$, представляющие нечеткое множество А, приведены на рис. П.4.

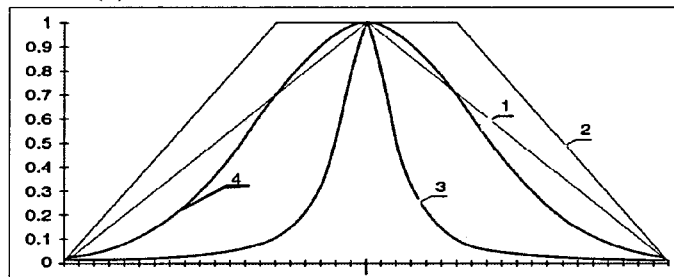


Рис. П.4. Типы функций принадлежности:
1 – треугольная; 2 – трапецидальная; 3 – Белла; 4 – гауссовская

ФП определяют степень достоверности принадлежности элемента $x \in X$ нечеткому множеству $\{\mu_A(x) \geq 0, x \in X\}$. Более точно, пусть X есть некоторое универсальное множество (универсум). Тогда нечеткое множество A в X определяется как упорядоченное множество пар $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$, где $\mu_A(x) \in [0, 1]$ называется ФП элемента x к нечеткому множеству A .

ФП приписывает каждому элементу из X значение из интервала $[0, 1]$, которое называется степенью принадлежности x к A или нечеткой мерой. Поэтому нечеткая мера может быть рассмотрена как степень истинности того, что элемент x принадлежит A . Более точные определения возможны на основе аксиоматик t -норм или t -конорм, традиционно применяемых в нечеткой логике.

Пример типовых ФП величины напряжения в виде лингвистической аппроксимации «низкое – low», «среднее – medium» и «высокое – high» на количественной шкале $[0, 100]$ показан на рис. П.5.

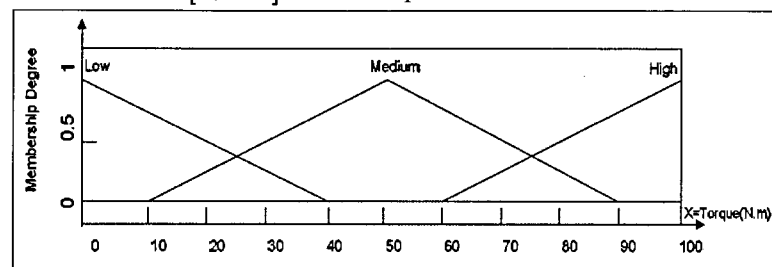


Рис. П.5. Пример функций принадлежности лингвистических переменных «низкое – low», «среднее – medium» и «высокое – high» усилие

Отметим, что такие ФП описывают так называемые нечеткие множества 1-го рода. Для расширения возможности описания меры неопределенности лингвистическими переменными вводятся ФП нечетких множеств 2-го рода, представленных на рис. П.6.

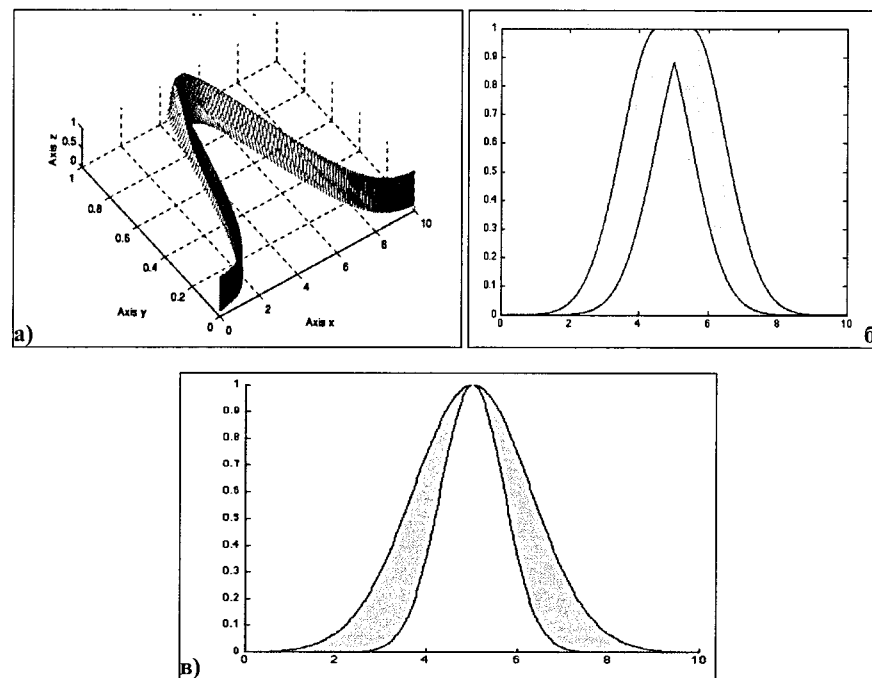


Рис. П.6. Функции принадлежности нечетких множеств 2-го рода: а) 3-мерное представление ФП; б) гауссовская ФП с мерой неопределенности (П.1); в) гауссовская ФП с мерой неопределенности (П.2).

Так, для описания на рис. П.6, б применяется ФП вида

$$\mu_A(x) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right\}, \quad m \in [m_1, m_2] \quad (\text{П.1})$$

и

$$\mu_A(x) = \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-m}{\sigma}\right)^2\right\}, \quad \sigma \in [\sigma_1, \sigma_2] \quad (\text{П.2})$$

– для представления ФП на рис. П.6, в.

Одним из основных отличий нечетких множеств является наличие нестандартных операций над ними, которые позволяют осуществлять гибкие интерпретации над результатами их применения, например, в моделях нечеткого логического вывода.

На рис. П.7 приведен пример нестандартной операции отрицания $\bar{A} \equiv \neg A \rightarrow \mu_{\bar{A}}(x)$ Сугено с ФП следующего вида:

$$\mu_{\bar{A}^\lambda}(x) = \frac{1 - \mu_A(x)}{1 + \lambda \mu_A(x)}, \quad \lambda > -1. \quad (\text{П.3})$$

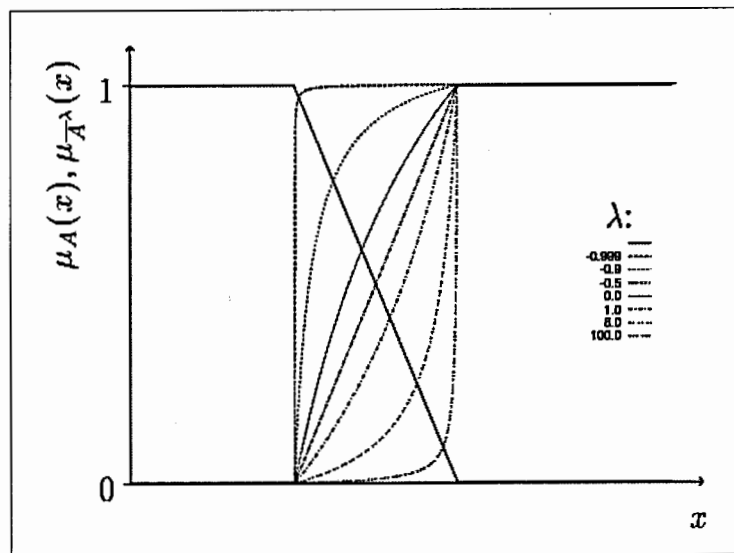


Рис. П.7. График ФП отрицания Сугено

В зависимости от значения параметра λ можно усилить или ослабить отрицание, что невозможно в булевой логике.

На рис. П.8 приведена ситуация, для которой не выполняется закон исключения третьего.

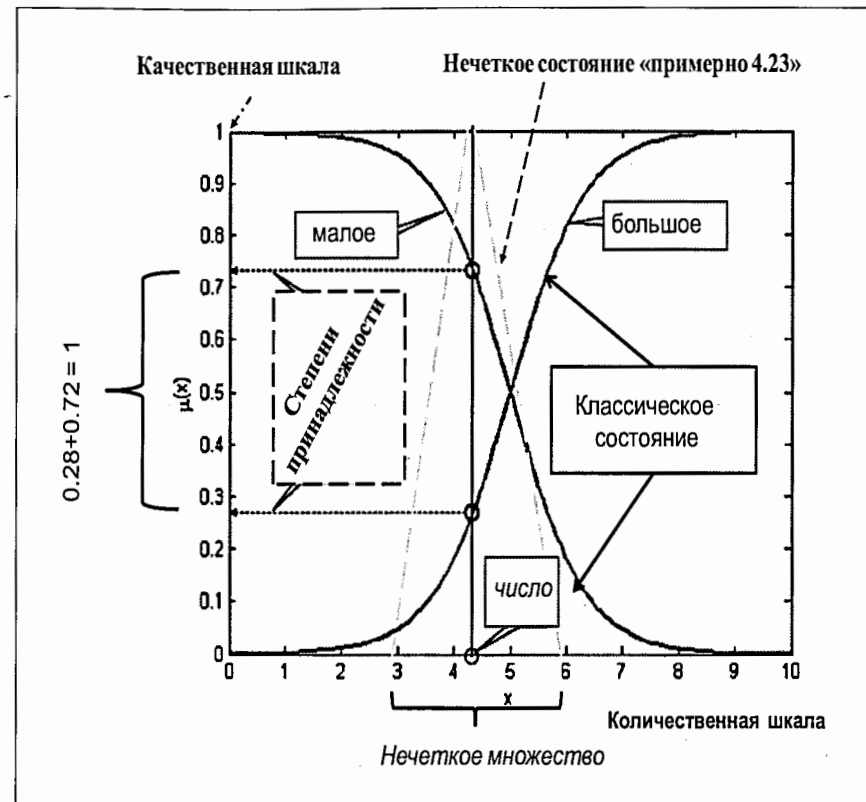


Рис. П.8. Иллюстрация невыполнения в нечеткой логике закона исключения третьего

Конкретному состоянию (синглетон) в виде числа 4,23 (одновременно «приблизительно 4», например, с треугольной ФП) на интервале $[0, 10]$ числовой шкалы измерений соответствуют две лингвистические переменные «большое» и «малое» число со степенями принадлежности на качественной лингвистической шкале 0,28 и 0,72 ($0,28 + 0,72 = 1$) соответственно.

В этом случае нечеткое состояние «приблизительно 4» в виде 4,23 характеризуется двумя лингвистическими переменными «большое» и «малое» число и позволяет расширить возможности качественного описания количественной характеристики. Это приводит к нестандартному выводу о возможности одновременного рассмотрения, например, числа 4,23 на шкале $[0, 10]$ как лингвистической переменной «большой» или «маленький» или «приблизительно 4» с различными значениями функции принадлежности на заданной качественной лингвистической шкале.

Однако этот на первый взгляд парадоксальный факт в условиях существенной неопределенности исходной информации на практике привел к хорошим результатам.

П.2.2. Модели нечеткого вывода

Рассмотрим основные модели нечеткого вывода, которые могут быть реализованы в ИСУ.

Правило нечеткого вывода в модели Мамдани имеет вид

IF x_1 is $\mu_{j_1}^1(x_1)$ AND x_2 is $\mu_{j_2}^2(x_2)$ AND ...

AND x_n is $\mu_{j_n}^n(x_n)$ THEN y is $\mu_{j_l}^{n+1}$,

где l – номер правила; x_1, \dots, x_n – входной вектор; μ_i^k – i -е терм-множество k -й входной переменной, $k \in \{1, \dots, n\}$, $i \in \{1, \dots, m_k\}$; μ_i^{n+1} – i -е терм-множество выходной переменной; j_l^k – индекс, показывающий, какое из терм-множеств k -й переменной используется в правиле l . Результат нечеткого вывода в модели Мамдани определяется следующим образом:

$$F(x_1, \dots, x_n) = \frac{\sum_{l=1}^M \bar{y}_l \prod_{i=1}^n \mu_{j_l^i}^i(x_i)}{\sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_{j_l^i}^i(x_i)},$$

где \bar{y}_l – модальное значение нечеткого множества $\mu_{j_l^{n+1}}^{n+1}$; Π – используемая t -норма, M – число правил. В модели Сугено правила имеют вид

IF x_1 is $\mu_{j_1}^1(x_1)$ AND x_2 is $\mu_{j_2}^2(x_2)$ AND ...

AND x_n is $\mu_{j_n}^n(x_n)$ THEN y is $f^l(x_1, \dots, x_n)$,

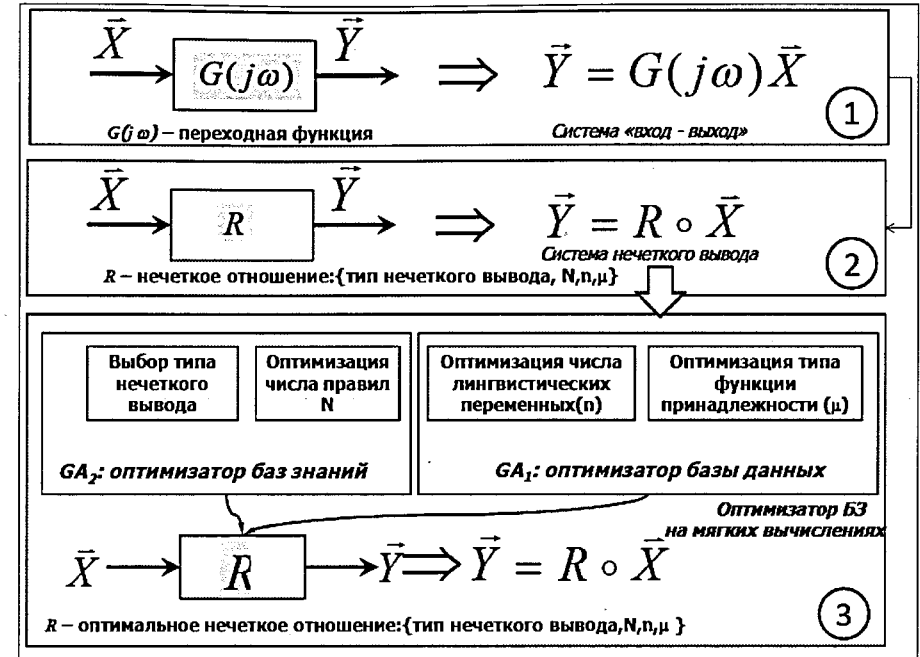
где f^l – некоторая функция входного вектора. Результат нечеткого вывода в этой модели определяется по формуле

$$F(x_1, \dots, x_n) = \frac{\sum_{l=1}^M f^l(x_1, \dots, x_n) \prod_{i=1}^n \mu_{j_l^i}^i(x_i)}{\sum_{l=1}^M \prod_{i=1}^n \mu_{j_l^i}^i(x_i)}.$$

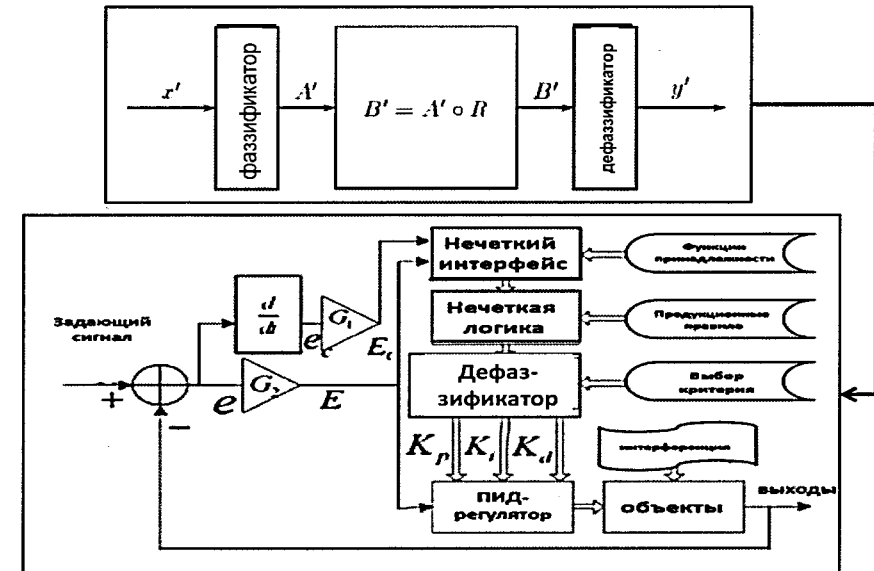
Как правило, при использовании модели Сугено в качестве функций f рассматривают полиномы. Так, в модели Сугено 0-го порядка эта функция имеет вид $f(x_1, \dots, x_n) = a_0$, а в модели Сугено 1-го порядка $f(x_1, \dots, x_n) = \sum_{k=1}^n a_k x_k + a_0$.

На рис. П.9, а, б представлены идеология построения нечетких систем и логическая структура нечеткого регулятора. Структура нечеткого регулятора и модель нечеткого логического вывода для нечетких множеств 2-го рода приведены на рис. П.11.

В дальнейшем по тексту под термином БЗ понимается стандартное для теории нечетких систем управления определение БЗ в виде конечного множества продукционных логических правил (look-up table) определенной модели нечеткого вывода с конкретными типами и параметрами ФП, формирующих законы управления ОУ. Параметры и тип ФП хранятся в базе данных НР. В реальных системах нечеткого вывода допускается наличие нескольких выходных переменных, значение каждой из которых определяется независимо друг от друга. Отметим следующие особенности, которые можно наблюдать на примере этих моделей.



а)



б)

Рис. П.9. Идеология построения нечетких систем (а) и логическая структура нечеткого регулятора (б)

Структура моделей нечеткого вывода показана на рис. П.10.

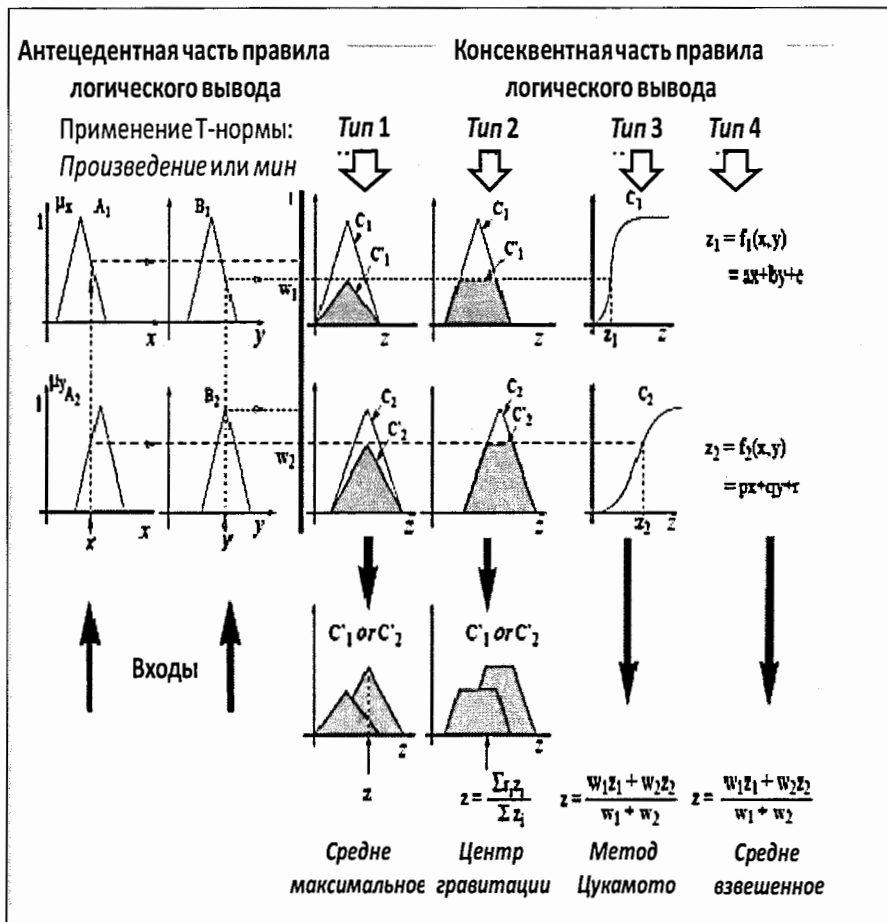
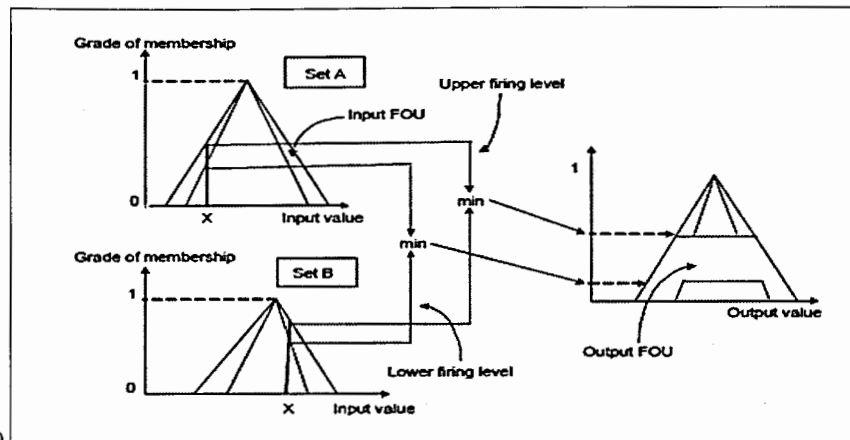
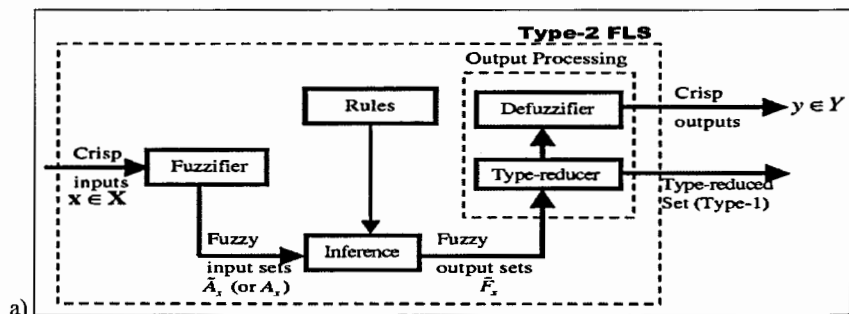


Рис. П.10. Структуры моделей нечеткого вывода



б) Рис. П.11. Структура нечеткого регулятора (а) и модель нечеткого логического вывода (б) для нечетких множеств 2-го рода

Вид предпосылки правила не зависит от модели нечеткого вывода и определяется только индексами выбранных для данного правила терм-множеств. Множество всех правил образуется декартовым произведением терм-множеств всех переменных, и число правил $M = \prod_{k=1}^n m_k$. Вид заключения правила зависит от используемой модели нечеткого вывода, при этом некоторые модели используют терм-множества для выходных переменных, а некоторые — не используют. Для расчета результата нечеткого вывода всегда необходимо вычислять значения $\prod_{i=1}^n \mu_{j_i}^k(x_k)$, которые будем называть уровнем активации правила l . При этом правила с нулевым уровнем активации не оказывают влияния на результат. Вычисление результата нечеткого вывода может быть организовано как процесс накопления частичных результатов, вычисляемых для каждого активированного правила.

П.3. Принципы и отличия построения нечетких систем управления на основе мягких вычислений

Здесь опишем схематично основные принципы и дополнительные отличия построения нечетких систем управления на основе мягких вычислений (подробности приведены в главах 1 и 2).

Нечеткие модели логического вывода на фазовом пространстве лингвистических переменных позволили разработать нечеткие ИСУ, эффективно решающие задачи управления в условиях существенной неопределенности исходной информации, слабой формализации описания ОУ, нечеткости целей управления и т. п.

На рис. П.12 показана основная идея построения фазового портрета лингвистических переменных, отражающих качественные особенности динамических характеристик ОУ. Одним из основных результатов теории нечетких систем для теории и систем управления является теорема о наличии универсального аппроксиматора, утверждающая существование возможности аппроксимации сложных слабоструктурированных ОУ конечным числом продукционных правил в БЗ в виде нечеткого регулятора.

Однако алгоритма определения такого (необходимого и достаточного) конечного числа продукционных правил не установлено, и в этом смысле теорема не конструктивна.

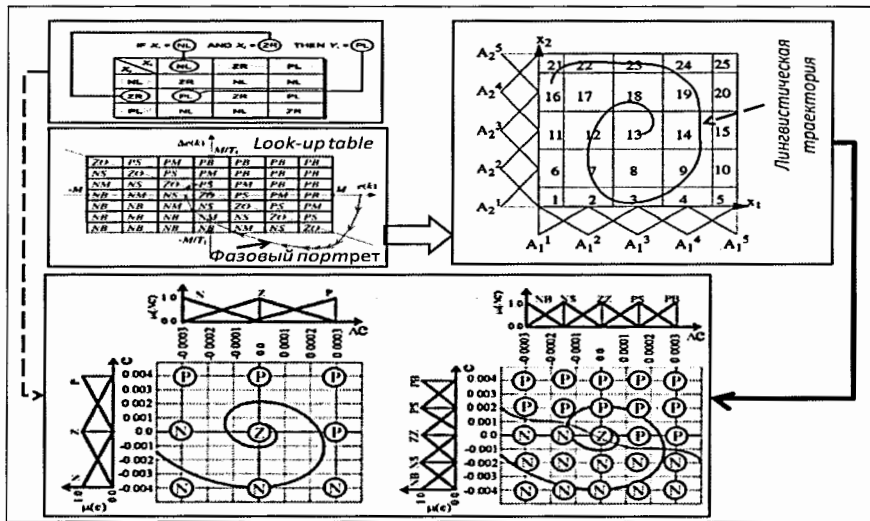


Рис. 6.12. Фазовый портрет лингвистических переменных

На рис. 6.13 показана схема решения задачи определения необходимых параметров универсального аппроксиматора на основе ОБЗ на мягких вычислениях.

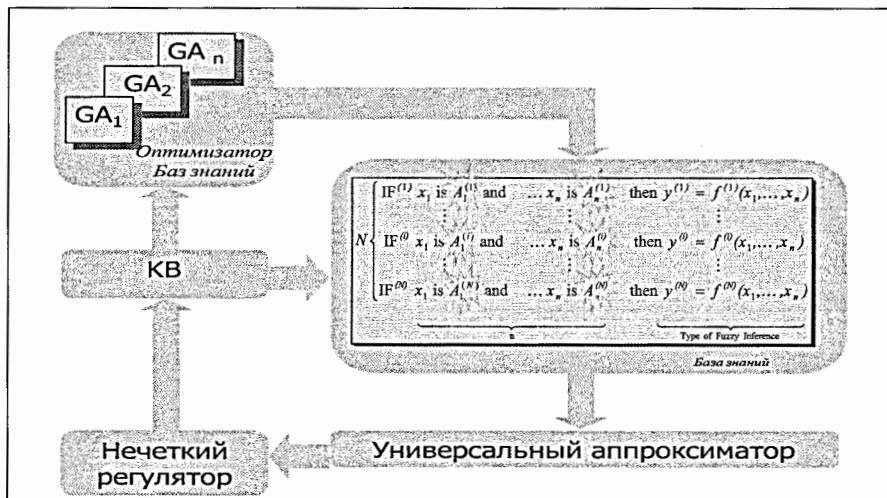


Рис. 6.13. Структурная схема определения параметров универсального аппроксиматора на основе ОБЗ на мягких вычислениях

Существует однозначное соответствие между структурами нечетких регуляторов и нечетких нейронных сетей (рис. П.14).

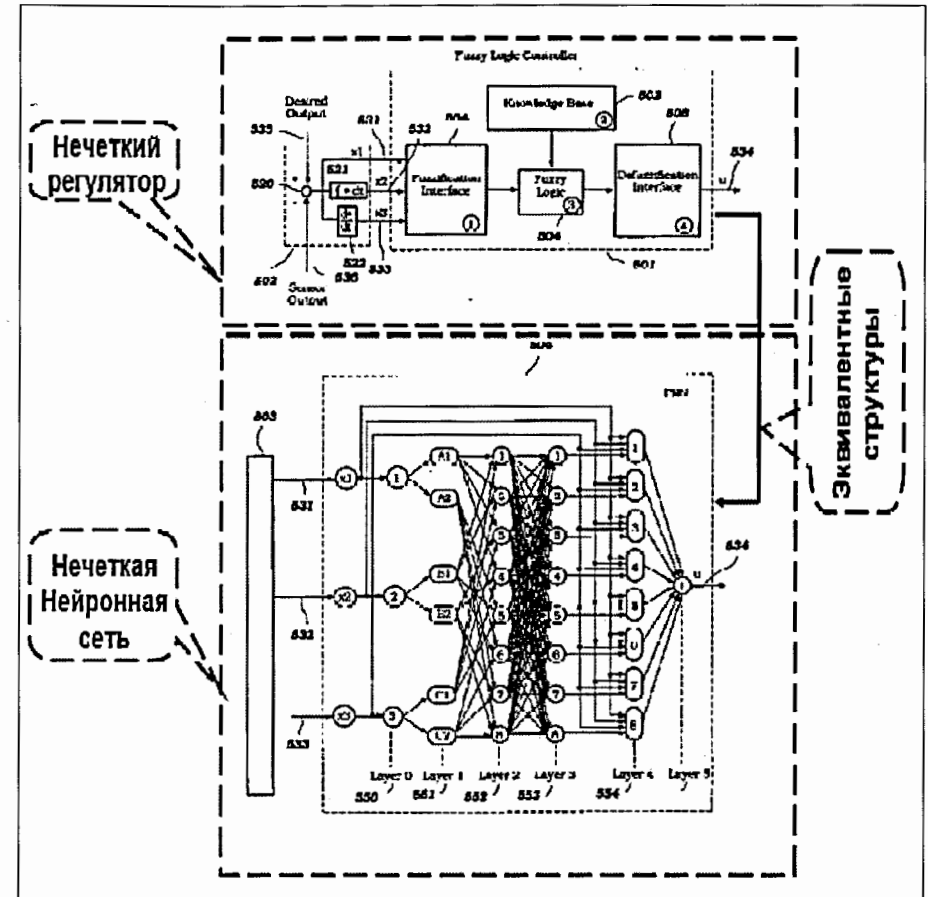


Рис. П.14. Соответствие между структурами нечеткого регулятора и нечеткой нейронной сети

Данные определения и их применение в интеллектуальных НР на основе ОБЗ на мягких вычислениях рассмотрены в главе 3.

Одной из основных проблем эффективного применения технологии мягких вычислений в задачах управления являлось решение следующих задач:

- объективное определение вида ФП и ее параметров в продукционных правилах в БЗ;
- определение оптимальной структуры нечетких нейронных сетей в задачах обучения (аппроксимация обучающего сигнала с требуемой (заданной) ошибкой и с минимальным количеством продукционных правил в БЗ);
- применение генетического алгоритма (ГА) в задачах многокритериального управления.

Так, например, на рис. П.15 показано влияние выбора числа и вида ФП на вид поверхности нечеткого вывода, которые оказывают существенное влияние на решение первой из указанных выше проблем.

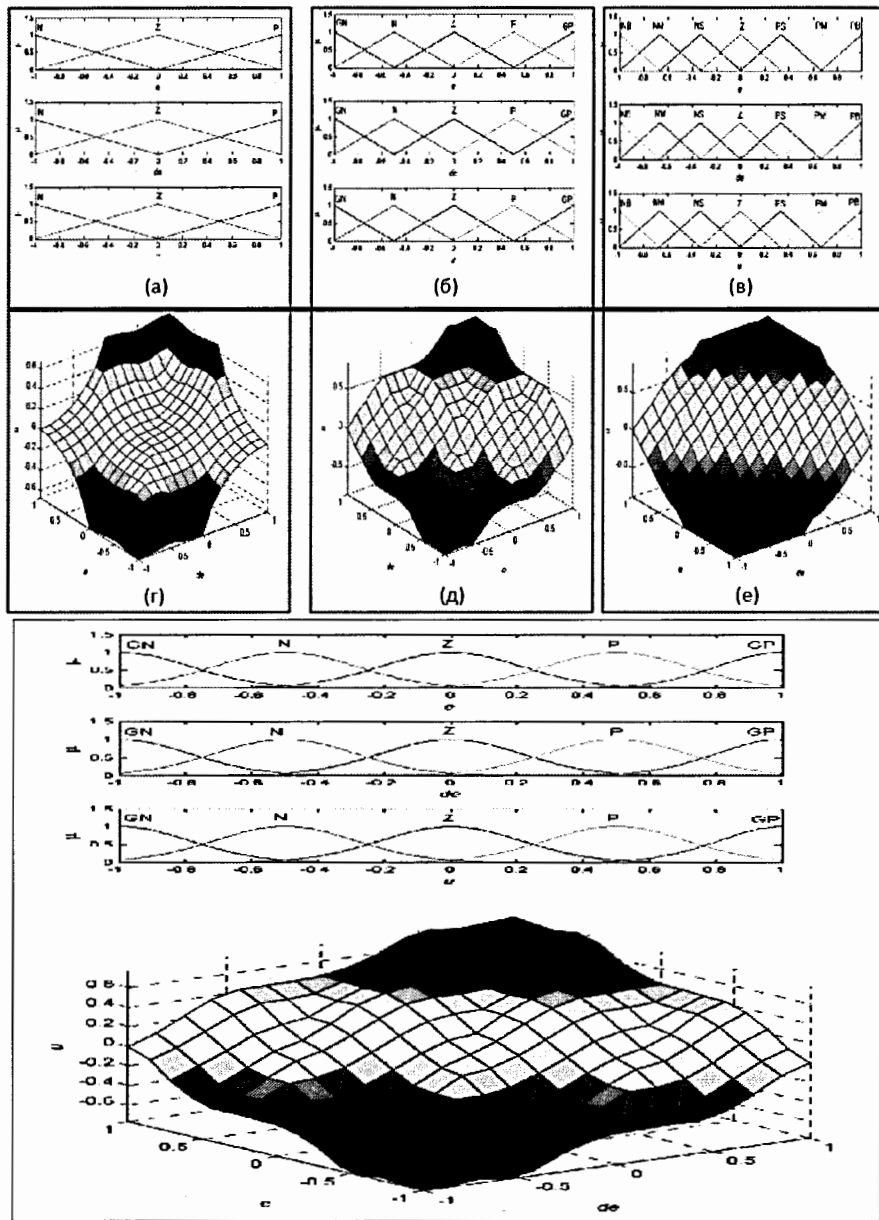


Рис. П.15. Влияние числа (а) – (е) и вида (внизу) ФП на вид нечеткого вывода

На рис. П.16 показан результат влияния асимметрии ФП на вид поверхности нечеткого вывода.

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе ОБЗ с применением технологии мягких вычислений. Разработанный интеллектуальный инструментальный позволил проектировать робастные БЗ на основе решения одной из алгоритмически трудно решаемых задач теории искусственного интеллекта – извлечения, обработки и формирования объективных знаний без использования экспертных оценок. В данном оптимизаторе используются три ГА, которые позволяют проектировать оптимальную структуру нечеткого регулятора (вид и число ФП, их параметры, а также число самих правил нечеткого вывода), аппроксимирующего обучающий сигнал с требуемой ошибкой.

Объединение методологий стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментарии ОБЗ позволило повысить уровень робастности проектируемых БЗ и решать сложные задачи формирования объективных знаний.

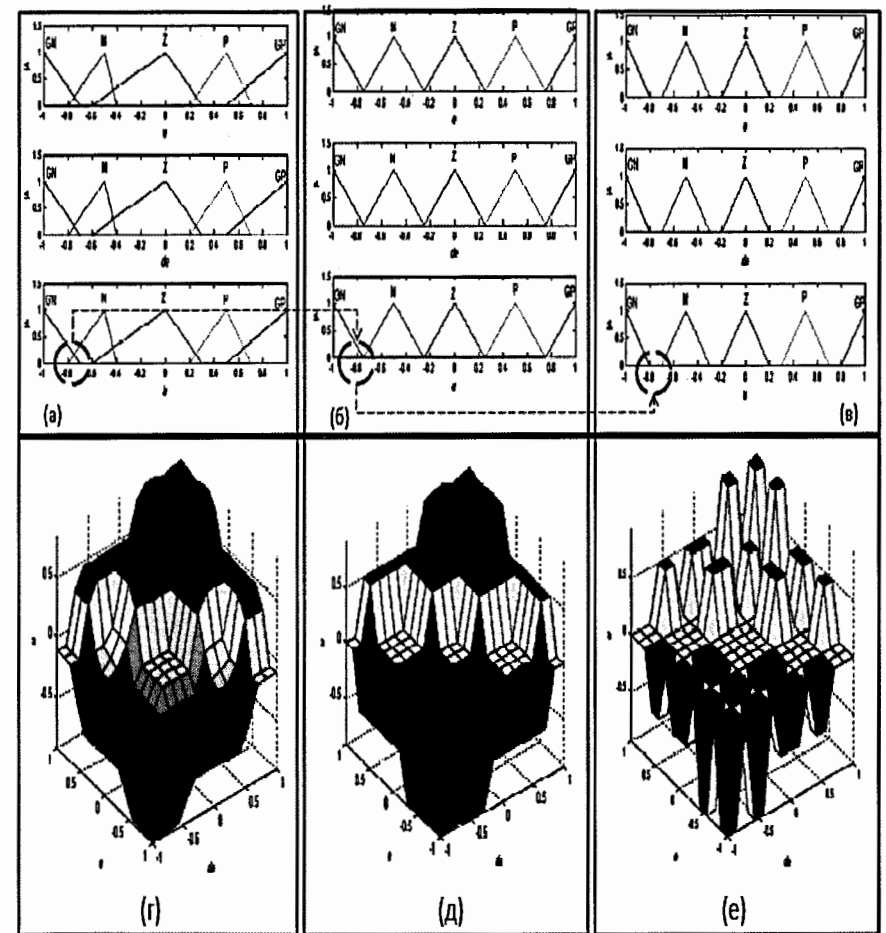


Рис. П.16. Влияние асимметрии ФП на вид нечеткого вывода

П.4. Структура ОБЗ с учетом приращения информационного риска

Оптимизатор БЗ на мягких вычислениях является новым эффективным программным инструментарием построения БЗ робастных ИСУ с использованием новых критериев оптимизации в виде новых типов функций пригодности ГА (рис. П.17).

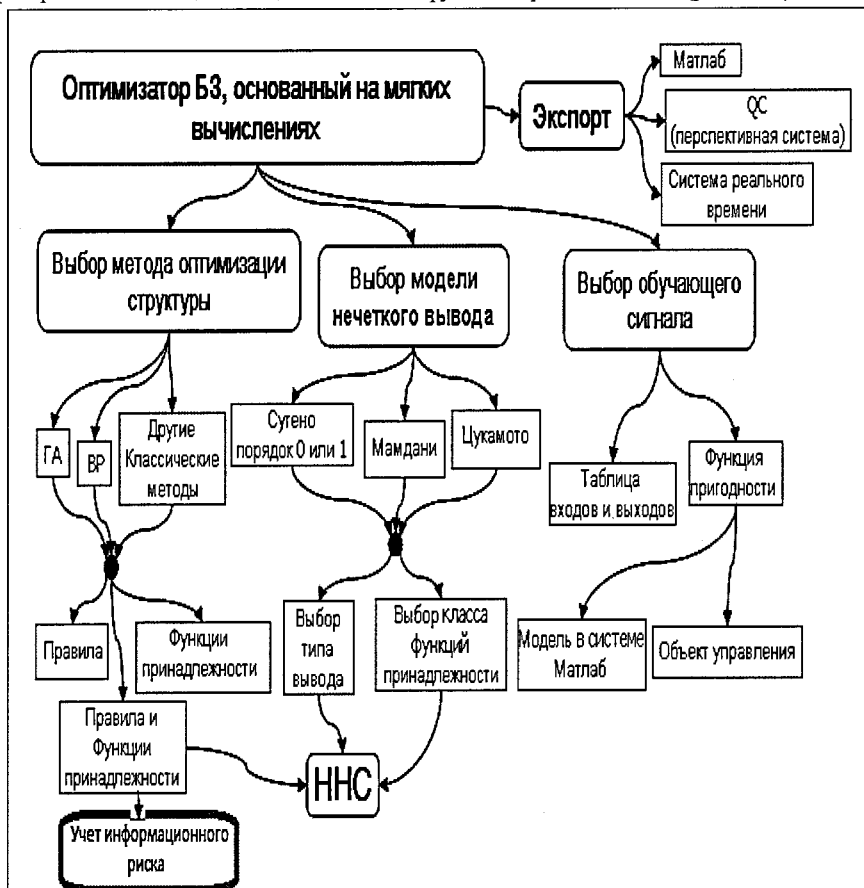


Рис. П.17. Структура ОБЗ с новым блоком описания информационного риска

В качестве таковых используются термодинамические и информационно-энтропийные критерии. Входом ОБЗ является обучающий сигнал, который может быть получен либо на этапе стохастического моделирования поведения ОУ (с использованием его математической модели), либо экспериментально, т.е. непосредственно из измерений динамических параметров физической модели ОУ.

При этом общее и доступное число наблюдений в практических задачах идентификации ситуации управления и оценки ее наиболее информативных параметров всегда ограничено, что приводит к потере информации и опасности возрастания приращения информационного риска.

Учебное издание

Ульянов Сергей Викторович
Решетников Геннадий Павлович

Технологии интеллектуальных вычислений
Мягкие и дробные вычисления
в интеллектуальном управлении

УНЦ-2013-54

Редактор *Е. В. Сабеева*

Получено 30.10.2013. Подписано в печать 31.03.2014.
Формат 60 × 90/16. Усл. печ. л. 15,25. Уч.-изд. л. 23,2. Тираж 70. Заказ № 58229.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6
E-mail: publish@jinr.ru
www.jinr.ru/publish/