

**АКАДЕМИЯ НАУК РЕСПУБЛИКИ МОЛДОВА
ИНСТИТУТ МАТЕМАТИКИ И ИНФОРМАТИКИ**

на правах рукописи

УДК: 004.415.2

РЕШЕТНИКОВ АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО
УПРАВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ МЯГКИХ И КВАНТОВЫХ
ВЫЧИСЛЕНИЙ АВТОНОМНЫМ РОБОТОМ**

**122.03 –МОДЕЛИРОВАНИЕ, МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ И
ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ**

Диссертация на соискание ученой степени доктора информатики

Научные руководители:

Гайндрик К. В.

член корр. академии наук РМ
доктор хабилитат информатики
профессор

Ульянов С. В.

доктор физ.- мат. наук
профессор

Автор:

Решетников А. Г.

КИШИНЕВ, 2016

ACADEMIA DE ȘTIINTE A MOLDOVEI
INSTITUTUL DE MATEMATICĂ ȘI INFORMATICĂ

Cu titlu de manuscris

C.Z.U: 004.415.2

REȘETNIKOV ANDREI

**PROIECTAREA CONTROLULUI INTELIGENT BAZAT PE
CALCUL CUANTIC ȘI SOFT COMPUTING AL ROBOTULUI
AUTONOM**

122.03. – MODELARE, METODE MATEMATICE, PRODUSE PROGRAM.

Teză de doctor în informatică

Conducători științifici:

C. Gaindric

dr.hab.,m.c.

profesor universitar

S. Ulyanov

dr.ș.f-m.

profesor universitar

Autorul:

A. Reșetnikov

CHIȘINĂU, 2016

© Решетников Андрей, 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

АННОТАЦИЯ.....	6
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	9
ВВЕДЕНИЕ	10
1. ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ	16
1.1 Роль интеллектуальных вычисления и синергетический эффект самоорганизации баз знаний.....	16
1.2. Особенности разработки структуры информационной технологии проектирования робастных самоорганизующихся интеллектуальных систем управления	23
1.3. Критерий робастности в интеллектуальных системах управления	33
1.4. Постановка задачи и особенности метода решения	44
1.5. Выводы по главе 1	46
2. ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ФОРМИРОВАНИЯ БАЗ ЗНАНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ.....	48
2.1. Технологии мягких и квантовых вычислений	48
2.2. Структурный анализ интеллектуальных систем управления с использованием разработанного инструментария	53
2.3. Структура и основные функции инструментария на мягких вычислениях.....	56
2.4. Структура квантовых вычислений и квантового алгоритма самоорганизации	60
2.5. Особенности применения квантовых алгоритмов в задачах интеллектуального робастного управления.....	64
2.6. Модель и этапы вычислений квантового алгоритма самоорганизации	77
2.7. Перспективы развития программного инструментария	80
2.8. Выводы по главе 2	81
3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ И МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ	83
3.1. Корректность моделей объектов управления и технологии интеллектуальных вычислений.....	83
3.2. Интеллектуальные робастные системы управления на основе оптимизатора баз знаний на мягких вычислениях	87

3.3. Верификация математической модели и макета автономного робота	92
3.4. Получение обучающего сигнала для проектирования интеллектуального управления.	97
3.5. Интеллектуальные робастные системы управления на основе квантового оптимизатора баз знаний.....	108
3.6. Выводы по главе 3	119
ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	120
БИБЛИОГРАФИЯ.....	122
ПРИЛОЖЕНИЯ	133
Приложение 1. Настройка ПИД-регулятора и проектирование нечетких регуляторов	133
Приложение 2. Эволюция типовых структур интеллектуальных систем управления	136
Приложение 3. Терминологический глоссарий	142
ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ	145
РЕЗЮМЕ АВТОРА.....	146
БЛАГОДАРНОСТИ	147

АННОТАЦИЯ

диссертации Решетникова Андрея Геннадьевича
«Проектирование интеллектуального управления

на основе мягких и квантовых вычислений автономным роботом».

представленной на соискание ученой степени доктора информатики по специальности 122.03 – Моделирование, математические методы и программное обеспечение. Работа выполнена в Институте системного анализа и управления Государственного университета «Дубна» РФ и Лаборатории информационных систем Института математики и информатики Академии наук Республики Молдова.

Структура работы: диссертация написана на русском языке и состоит из введения, 3 глав, 3 приложений, 60 рисунков, 8 таблиц, выводов, рекомендаций и списка литературы из 152 наименований. Объём работы составляет 147 страниц, из них 121 страницы основного текста. Результаты диссертации опубликованы в 15 научных публикациях.

Ключевые слова: математическое моделирование, программный инструментарий, интеллектуальное управление, мягкие вычисления, квантовые вычисления, квантовый нечеткий вывод, квантовый нечеткий регулятор, нечеткая логика, генетический алгоритм.

Область исследования: интеллектуальные системы управления, функционирующие в нештатных и непредвиденных ситуациях управления на мягких и квантовых вычислениях.

Цель исследования: развитие методов программно-алгоритмической поддержки процесса проектирования интеллектуальных систем управления.

Научная новизна: разработан метод повышения робастности интеллектуальных систем управления на основе применения квантового нечеткого вывода, формирующего синергетический эффект самоорганизации баз знаний в режиме реального времени.

Решена важная научная проблема: предложена технология проектирования квантовых алгоритмических ячеек в интеллектуальных системах управления для повышения робастности функционирования в нештатных и непредвиденных ситуациях управления.

Теоретическая значимость: показано, что предложенный квантовый алгоритм самоорганизации знаний позволяет извлекать скрытую квантовую информацию из классических состояний баз знаний и формировать синергетический эффект самоорганизации БЗ в робастных интеллектуальных системах управления.

Практическая ценность: метод проектирования интеллектуальной системы на основе квантового нечеткого вывода позволяет достигать цели управления в нештатных ситуациях управления, в которой классические системы управления не справляются.

Результаты исследования могут быть использованы для обеспечения устойчивого функционирования объектов управления в нештатных ситуациях управления.

ADNOTARE

la teza ”Proiectarea controlului inteligent bazat pe calcul cuantic și soft computing al robotului autonom”.

prezentată de către Andrei Reșetnicov pentru conferirea gradului științific de doctor în informatică la specialitatea 122.03 – Modelare, metode matematice, produse program.

Teza a fost elaborată în Laboratorul Sisteme inteligente de control al Institutului de analiză și management de la Universitatea din Dubna (Federația Rusă) și Laboratorul ”Sisteme informatice” al Institutului de Matematică și Informatică al Academiei de științe a Republicii Moldova.

Structura tezei: teza este scrisă în limba rusă și constă din introducere, 3 capitole, 3 anexe, 60 de desene, 8 tabele, concluzii și recomandări și 152 titluri bibliografice. Textul tezei conține 121 de pagini. Rezultatele obținute sunt publicate în 15 lucrări științifice.

Cuvinte cheie: modelare matematică, instrumente software, control inteligent , soft computing, quantic computing, deducție cuantică fuzzy, controler quantic fuzzy, logica fuzzy, algoritm genetic.

Domeniul de studiu: sisteme inteligente de control ce funcționează în situații de urgență și imprevizibile în baza calculului quantic și soft computing.

Obiectivele cercetării: dezvoltarea metodelor de suport algoritmic și de program al procesului de proiectare a sistemelor inteligente de control.

Noutatea și originalitatea științifică: a fost elaborată o metodă de îmbunătățire a robusteții sistemelor inteligente de control bazat pe aplicarea deducției cuantice fuzzy, ce formează un efect de autoorganizare synergetică a bazei de cunoștințe în timp real.

Semnificația teoretică: s-a arătat că algoritmul cuantic de autoorganizare a cunoștințelor propus permite de a extrage informația cuantică ascunsă, din stările clasice ale bazelor de cunoștințe și de a forma un efect synergetic de autoorganizare ale bazelor de cunoștințe în sisteme inteligente de control robuste.

A fost rezolvată problema științifică importantă: s-a propus o tehnologie de proiectare a algoritmilor celulelor cuantice în sistemele inteligente de control pentru sporirea robusteții funcționării lor în situații imprevizibile și de urgență.

Valoarea aplicativă a lucrării: metoda de proiectare a sistemelor inteligente de control în baza deducției cuantice fuzzy permite atingerea obiectivelor în situații imprevizibile, în care metodele clasice nu fac față.

Rezultatele cercetării pot fi aplicate pentru a asigura funcționarea durabilă a unor sisteme inteligente de control ce funcționează în situații imprevizibile și de urgență.

ABSTRACT
of the thesis for a doctor's degree performed by Andrey Reshetnikov
"Design of intelligent control based on soft and quantum computing of autonomous robot".

Thesis is submitted for the degree of doctor of Informatics, speciality 122.03 – Modelling, mathematical methods and software. The work is performed in the Laboratory of intelligent control systems of the Institute of system analysis and control of the Dubna University and the Laboratory of information systems in the Institute of mathematics and computer science of Academy of Sciences of Moldova.

Structure: the thesis is written in Russian and consists of introduction, 3 chapters, 3 applications, 60 figures, 8 tables, main summary, recommendations and references which include 152 items. The main text of the dissertation is set forth on 121 pages. The results of the thesis have been published in 15 scientific publications.

Keywords: software tools, intelligent control, soft computing, quantum computing, quantum fuzzy inference, the quantum fuzzy controller, fuzzy logic, genetic algorithm.

Area of research: intelligent control systems, emergency and unpredicted situations of control, quantum soft computing.

Goal of research: development of methods for algorithmic and software support of the process of modeling and designing of robust intelligent control systems

Scientific novelty: A new method is proposed for improving the robustness of intelligent control systems on the basis of application of quantum fuzzy inference, forming a synergetic effect of self-organization of knowledge bases in real-time

An important scientific problem is solved: the thesis proposes a design technology of quantum algorithmically cells of intelligent control systems that contributes to robustness improvement of the behavior of dynamically unstable object in unpredicted and emergency control situation.

Theoretical significance: it is shown that the proposed quantum algorithm of knowledge self-organization allows extracting hidden quantum information from classical states of knowledge bases and generating synergetic effect of self-organization in KB of robust intelligent control systems.

Practical value: the developed design method of intelligent control systems based on quantum fuzzy inference enables achieving the control objects in emergency control situations, in which classical control systems do not accomplishing goal of control.

Results implementation: The research results can be used to improve the functioning reliability of intelligent control systems in emergency and unpredicted situations.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АСУ – автоматизированная система управления;
БЗ – база знаний;
БП – база правил;
ГА – генетический алгоритм;
ГООС – глобальная отрицательная обратная связь;
ИБ – интеллектуальные вычисления;
ИГОС – интеллектуальная глобальная обратная связь;
ИС – информационная система;
ИСУ – интеллектуальная система управления;
ИСАУ – интеллектуальная система автоматического управления;
ИТ – информационная технология;
ИТП – информационная технология проектирования;
КА – квантовый алгоритм;
КАЯ – квантовая алгоритмическая ячейка;
КВ – квантовые вычисления;
КИ – квантовая информация;
КНВ – квантовый нечеткий вывод;
КНР – квантовый нечеткий регулятор;
ЛПР – лицо принимающее решение;
ННС – нечеткая нейронная сеть;
НР – нечеткий регулятор;
ОБЗ – оптимизатор баз знаний;
ОС – обучающий сигнал;
ОУ – объект управления;
ПИД – пропорционально – интегрально - дифференциальный;
САУ – система автоматического управления;
СМОСУ – система моделирования оптимального сигнала управления;
ФП – функция пригодности;
ЭС – экспертная система.

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы и состояние вопроса

Одной из центральных и актуальных проблем современного этапа развития теории управления является разработка интеллектуальных робастных систем управления, функционирующих в условиях непредвиденных и нештатных ситуациях управления, влияющих на процессы извлечения, обработки, представления и формирования объективных знаний, необходимых для принятия управленческих решений. Одновременно это проблема является и одной из самых сложных из ряда проблем, возникших в процессе создания искусственного интеллекта.

В теоретических разработках и при практической реализации систем управления большое внимание уделяется выявлению роли и эффективности интеллектуальных систем управления (ИСУ), а также качественному совершенствованию современных информационных технологий интеллектуального управления сложными и слабоструктурированными физическими объектами управления (ОУ).

Сложность и слабая формализуемость физических систем, в свою очередь, приводит к аппроксимации моделей объекта управления и применению приближенных решений, которые не гарантируют необходимые и достаточные условия достижения цели управления, как в непредвиденных ситуациях, так и в ситуациях неопределённости и информационного риска. Поэтому, в теории систем управления одним из эффективных подходов снижения риска принятия неэффективного решения, из-за неполноты описания модели ОУ, является разработка структур робастных интеллектуальных систем управления.

Использование технологии мягких вычислений, основанной на генетических алгоритмах, нечеткой логике и нечетких нейронных сетях, расширило области эффективного применения нечётких регуляторов (НР) за счет добавления новых функций в виде обучения и адаптации. Однако, в общем случае нештатных ситуаций управления, очень трудно спроектировать «глобально хорошую» и робастную структуру ИСУ. Данное ограничение особенно характерно для непредвиденных ситуаций управления, когда ОУ функционирует в резко изменяющихся и затрудняющих управление условиях (отказ датчиков, появление помех и шумов в измерительной системе, возникновение значительной задержки сигналов управления или измерения показателей, неожиданное изменение структуры ОУ или его свойств и т.п.).

Решение такого рода проблем может быть найдено на основе введения принципа самоорганизации в процесс проектирования базы знаний (БЗ) нечетких регуляторов,

который реализуется и программно поддерживается разработанной моделью квантового нечеткого вывода с применением методологии квантовых мягких вычислений и системной инженерией – System of System Engineering – реализацией синергетического принципа самоорганизации.

Цель исследования

Целью исследования является разработка методов программно-алгоритмической поддержки процесса моделирования, проектирования и разработки робастных интеллектуальных систем управления для слабо формализованных объектов управления, функционирующих в непредвиденных и нештатных ситуациях управления на основе мягких и квантовых вычислений.

Теоретическая и методологическая основа исследования

Решение поставленных задач осуществлялось на основе принципов и методов системного анализа, теории автоматического управления, теории информации, нечеткой логики и нечетких нейронных сетей, генетических алгоритмов, теории квантовой информации и квантовых алгоритмов.

Выполнен анализ научной литературы, статей и монографий. Основой исследования послужили работы, проведенные в области теории и методологии проектирования интеллектуальных систем управления. Среди них работы: А.Н. Аверкина, С.Н. Васильева, С.В. Емельянова, Л. Заде, А.А. Красовского, Б.Н. Петрова, И.М. Макарова, К.А. Пупкова, А.П. Рыжова, С.В. Ульянова, В.Н. Фрадкова, А. В. Язенина, L. Behera, Y. Chen, E. P. Leite, P. Ponte-Cruz и др.

Объектом исследования являются интеллектуальные системы управления, функционирующие на основе мягких и квантовых вычислений в условиях непредвиденных и нештатных ситуаций управления.

Предметом исследования диссертационной работы являются методы и алгоритмы проектирования интеллектуальных систем управления для слабо формализованных объектов управления, функционирующих в нештатных и непредвиденных условиях.

Научная новизна полученных результатов

1. Теоретически и экспериментально подтверждено существование синергетического эффекта самоорганизации в процессе формирования робастной базы знаний из спроектированных не робастных баз знаний.

2. Разработана модель квантового нечеткого вывода, позволяющая вводить принцип самоорганизации баз знаний в процесс проектирования интеллектуальных систем управления.

3. Предложен новый метод верификации математической модели объекта управления с недоопределенными параметрами на основе генетического алгоритма и физического сигнала с реального объекта управления.

4. Разработан многокритериальный генетический алгоритм для проектирования баз знаний нечетких регуляторов.

Теоретическая значимость

1. Показана возможность достижения глобальной робастности интеллектуальной системы управления в режиме реального времени за счет использования новых видов интеллектуальных вычислений

2. Использование квантового алгоритма самоорганизации знаний позволяет извлекать скрытую в классических состояниях квантовую информации для формирования синергетического эффекта самоорганизации баз знаний в робастной интеллектуальной системе управления в режиме реального времени.

Решена важная научная проблема: предложена технология проектирования квантовых алгоритмических ячеек в интеллектуальных системах управления для повышения робастности функционирования в нештатных и непредвиденных ситуациях управления.

Практическая значимость работы

Результаты исследования в виде проблемно независимых программных инструментариев могут быть использованы инженерами и специалистами при проектировании робастных интеллектуальных систем управления, предназначенных для функционирования в нештатных и непредвиденных ситуациях

Защищаемые положения

Защищаемые положения диссертационной работы следуют из научной новизны и практической значимости и состоят в следующем:

1. Предложенная технология проектирования нечеткого регулятора, на основе физически измеряемого сигнала и оптимизатора баз знаний на мягких вычислениях в значительной степени устраняет субъективизм при формировании баз знаний и позволяет проектировать интеллектуальные системы управления без использования традиционной математической модели объекта управления.

2. Метод верификации математической модели с недостаточно определёнными (недоопределёнными) параметрами на основе генетического алгоритма позволяет использовать дополнительный информационный ресурс для формирования обучающего сигнала при проектировании нечетких регуляторов и квантовых регуляторов.

3. Показана возможность повышения робастности автономной встраиваемой

интеллектуальной системы управления в нештатных и непредвиденных ситуациях за счет использования квантовых мягких вычислений.

4. Реализация квантовых типов вычислений на классическом процессоре позволяет ввести свойство самоорганизации нечетких регуляторов в структуру интеллектуальной системы управления и повысить робастность системы.

Апробация работы и публикации

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях и международных конгрессах, в том числе:

- International Conference on Application of Fuzzy Systems and Soft Computing» Turkey, Antalya September 3-4, 2015.
- XXII Научно – практическая конференция студентов, аспирантов и молодых специалистов университета «Дубна», 16-28 марта, Россия, г. Дубна, 2015.
- Tendinte contemporane ale dezvoltarii stiintei: viziuni ale tinerilor cercetatori, Conferinta Stiintifica Internationala a Doctoranzilor, 10 martie, Chisinau, 2015.
- I международная Поспеловская летняя школа - семинар для студентов, магистров и аспирантов, Россия, Светлогорск, 30 июня – 6 июля, 2014.
- Seventh International Conference on Soft Computing, Computing with Words and Perceptions in System Analysis, Decision and Control (ICSCCW-2013), September 2-3, Turkey, Izmir, 2013.
- Международная летняя школа-семинар по искусственному интеллекту для студентов, аспирантов и молодых ученых «Интеллектуальные системы и технологии: современное состояние и перспективы» (ISyT-2013), 1-6 июля, Россия, г. Тверь, 2013.
- XIII Международная научно – практическая конференция «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», 20-22 мая, Россия, г. Коломна, 2013.
- Seventh world conference on intelligent systems for industrial automation (WCIS - 2012), November 25-27, Tashkent, Uzbekistan, 2012.

Публикации и личный вклад

Основой диссертации являются теоретические, методологические и экспериментальные исследования, выполненные автором в 2010 - 2015гг.

Основные результаты получены непосредственно автором и результатом выполненных исследований стала публикация 38 научных работ, из них основных работ 15, в том числе 4 статей в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ и в Computer Science Journal of Moldova.

Автором предложены и обоснованы основные решения, обеспечивающие применение технологии проектирования интеллектуальных систем управления на основе квантовых мягких вычислений.

Непосредственно автором разработано математическое и алгоритмическое обеспечение для поддержки процесса проектирования самоорганизующихся интеллектуальных систем управления на основе новых видов интеллектуальных вычислений, таких как квантовые мягкие вычисления. В Федеральной службе по интеллектуальной собственности Российской Федерации зарегистрировано программное обеспечение “Программная поддержка интеллектуальных регуляторов на основе технологий мягких и квантовых вычислений”.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем работы составляет 147 страниц, из них основного текста 121 страницы. Список цитируемой литературы содержит 152 наименования.

Во введении обоснована актуальность выбранной автором темы исследования, поставлены цель и задачи диссертации, сформулированы достигнутые результаты, приведено краткое содержание диссертации по главам.

В первой главе рассмотрены вопросы и проблемы современного состояния процесса разработки и реализации интеллектуальных систем управления с использованием технологий интеллектуальных вычислений и сложности, возникающие при их реализации. Выполнен аналитический обзор современного состояния решенных и нерешенных проблем проектирования БЗ интеллектуальных систем управления динамическими объектами. Рассмотрены особенности разработки структуры информационной технологии проектирования робастных самоорганизующихся интеллектуальных систем управления с точки зрения использования интеллектуальных вычислений.

В главе представлены 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 используется информационный и термодинамический подходы, объединяющие однородным условием критерии динамической устойчивости, управляемости и робастности.

Во второй главе проводится постановка задачи исследования, описываются особенности методов решений. Показаны основные компоненты и их взаимосвязи в разработанной информационной технологии проектирования (ИТП), основанной на новых

видах вычислений (мягких и квантовых вычислениях). Ключевым пунктом данной ИТП является использование метода извлечения объективного знания о процессе управления независимо от субъективного опыта экспертов и проектирование объективных баз знаний НР, являющихся главной составной частью робастной ИСУ.

В частности, рассмотренный в главе инструментарий на мягких вычислениях для проектирования ИСУ в своей основе использует технологии позволяющие гарантировать целенаправленное проектирование соответствующего уровня робастности за счёт оптимального проектирования общего количества продукционных правил и типов функций принадлежности в базе знаний.

Представлен математический аппарат квантовых мягких вычислений, применительно к проектированию ИСУ. Рассмотрены принципиальные отличительные черты, характеризующие отношение между классической и квантовой типами корреляции. В квантовом варианте присутствует взаимная (смешанная) корреляция между реальным и виртуальным состояниями нормированного сигнала управления. Представлен инструментарий для проектирования квантового нечеткого вывода, как частного случая квантового алгоритма (КА). Основной задачей, решаемой процедурой квантового нечёткого вывода (КНВ) является формирование БЗ с повышенным уровнем робастности из конечного множества БЗ нечетких регуляторов, сформированных с применением технологии мягких вычислений.

В третий главе описано применение разработанного программного продукта, позволяющего проектировать квантовые нечеткие регуляторы для управления динамически неустойчивыми объектами в нештатных ситуациях управления.

Представлено проведенное автором математическое моделирование и физический эксперимент. Исследование качества управления классического регулятора, нечетких регуляторов и квантовых регуляторов на основе разработанных программных инструментариев ОБЗ и КНВ проводилось с использованием математической модели и реального объекта управления в типовых и непредвиденных условиях управления. Описан разработанный автором метод верификации математической модели и реального объекта управления на основе генетического алгоритма, позволяющий повысить качество извлекаемых знаний из физически измеряемого сигнала управления и математической модели. Проводится анализ результатов эксперимента.

В разделе общие выводы и рекомендации сформулированы основные результаты, полученные в работе, выводы и рекомендации по практическому использованию полученных результатов.

1. ОБЗОР ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОМ УПРАВЛЕНИИ

Инженерные методы теории управления и технологии проектирования систем автоматического управления были созданы и сформированы еще в прошлом столетии. Огромный вклад в образование и развитие данного направления внесли научные школы Б.Н. Петрова, С.В. Емельянова, А.А. Красовского и др. [92 – 94, 99, 113 – 116].

Классическая теория автоматического управления позволила автоматизировать широкий класс технических систем на транспорте, в промышленности, сельском хозяйстве и т.д. Особенности этих объектов управления, являются определенная стационарность, линейность, реализуемость, относительная простота, достаточная изученность показателей, реализуемость математических моделей. В классической теории автоматического управления было принято использовать, при проектировании систем управления для подобных ОУ, структурное математическое моделирование и формализованные методы, основанные на теории дифференциальных уравнений, теории оптимального управления и гармонического анализа [96, 108, 109, 118, 147].

На следующем этапе развития данного направления были разработаны принципы проектирования и моделирования нечетких систем автоматического управления в условиях неопределенности, учитывающие индивидуальные особенности поведения объектов управления [121, 121, 132, 150]. Основой данного направления послужила теория лингвистической аппроксимации и нечеткого вывода Л. Заде [76, 77, 100, 101, 131] для создания робастных БЗ интеллектуальных нечётких регуляторов. Основы проектирования интеллектуальных систем автоматического управления (ИСАУ) были заложены в середине семидесятых годов прошлого столетия в рамках разработанной методологии проектирования законов управления. Базисом данной методологии послужили информационно–термодинамические и квантово–релятивистские методы описания ОУ и процессов управления, заложенные в рамках научной школы Б.Н. Петрова.

1.1 Роль интеллектуальных вычисления и синергетический эффект самоорганизации баз знаний

В настоящее время, 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 на основе технологии интеллектуальных вычислений.

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 системы автоматического управления. На содержательном уровне данная возможность отражает назначение целенаправленной деятельности интеллектуальной системы управления 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 играет выбор используемого инструментария технологии ИВ для проектирования соответствующей базы знаний при заданной цели управления.

Из многочисленных моделей интеллектуальных вычислений в данной работе выбраны технологии мягких и квантовых исчислений, и это сделано не случайно. Данные инновационные технологии вычислений составляют программно-алгоритмическую платформу для информационной технологии проектирования самоорганизующихся ИСУ, способных функционировать и гарантировать достижение цели управления в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций управления с требуемым уровнем робастности и неполнотой описания объекта управления.

Именно задача разработки самоорганизующихся ИСУ слабо структурированными объектами управления, способных функционировать и гарантировать достижение цели управления в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций, является наиболее актуальной (и трудно решаемой) в теории систем управления.

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

1. Принцип компенсации информационной неполноты описания модели (слабоструктурированных) ОУ выбором соответствующего уровня интеллектуальных вычислений.

2. Принцип соответствия алгоритма интеллектуального управления уровню сложности и неполноты представления знаний о внешней среде функционирования ОУ (связь информационной энтропии с мерой алгоритмической сложности Колмогорова);

3. Принцип минимума потерь полезного ресурса (минимум обобщенной энтропии – физический закон оптимального управления) в системе «объект управления + регулятор»;

4. Принцип не разрушения и повышения эффективности нижнего исполнительского уровня системы управления за счет самоорганизации баз знаний интеллектуального регулятора;

5. Принцип синергизма извлекаемой скрытой квантовой информации из классических состояний спроектированных процессов управления.

Перечисленные принципы рассмотрены в диссертации с позиции проектирования робастных интеллектуальных нечетких регуляторов в структуре системы управления с дальнейшим объединении баз знаний в единую робастную интеллектуальную систему с применением квантовых вычислений.

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

А. Первая проблема связана с тем, что, 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 баз знаний на основе специализированного программного инструментария, оптимизаторов баз знаний на мягких и далее на квантовых вычислениях, исключает субъективизм экспертных оценок, обеспечивает достижение требуемого уровня робастности интеллектуальной системы управления.

Б. Вторая проблема связана с разработкой и физическим обоснованием математической модели квантового алгоритма управления самоорганизацией знаний для формирования робастных БЗ в реальном времени. В работе показана роль прямых аналогов физических, квантовых и термодинамических эффектов в реализации процесса

гарантированного достижения качества управления на основе технологии квантовых и мягких вычислений. При этом основное внимание уделяется описанию и интерпретации качественных особенностей биологически воспроизводимой (так называемой синергетической биоинспирированной) эволюции самоорганизации, основные компоненты которой описываются квантовыми операторами и составляют физическое содержание разработанной модели квантового алгоритма управления процессом самоорганизации. Т.е. 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 демонстрируют результаты эффективного применения информационной технологии проектирования робастных баз знаний непосредственно в структуре контуров управления ИСУ. При этом, показаны особенности проектирования робастных баз знаний для непредвиденных ситуаций управления, включающих в свою структуру соответствующие программные оптимизаторы БЗ.

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»).

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.

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 и объекта управления.

В инженерном программном инструментарии компании MathWorks (MatLab) не представлен должным образом раздел проектирования ИСУ и баз знаний. 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. Поэтому, часто бытует мнение об «экзотическом» виде других

новых типов интеллектуальных вычислений, имеющих ограниченное применение в практике системной инженерии.

Выделим некоторые особенности разработанного подхода к структурному проектированию моделей интеллектуального управления и его отличия от известных работ [1, 2, 7, 9 – 11, 14, 20, 23, 24, 26, 29, 37, 38, 44, 53, 55, 58, 78, 79 – 88, 90, 92, 106, 107, 110, 117 – 122, 133, 146, 150, 152] по разработке ИСУ.

- Применение интеллектуальных вычислений и квантового алгоритма самоорганизации БЗ позволяет в реальном времени достичь цели управления в непредвиденных ситуациях за счет повышения уровня робастности интеллектуальной системы управления в проблемно-ориентированной области. Вычислительным базисом отмеченных направлений разработок является технология квантовых 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 автономных роботов как объектов физического эксперимента.

- Поэтому из многочисленных моделей ИВ в качестве примера представлены прикладные разработки технологий мягких и квантовых вычислений. При этом рассматривается взаимосвязь технологий ИВ с другими направлениями типа квантового программирования, квантовых облачных (cloud)- и 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 здесь изложены принципиальные вопросы разработки и эффективного применения технологий ИВ.

В приведенных ранее работах по исследованию и разработке ИСУ не решены следующие принципиальные задачи, которые снижают ценность представленных результатов:

- спроектированные структуры ИСУ не удовлетворяют сформулированным ранее пяти физическим и информационно-термодинамическим 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 формирования 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;
- инструментарий 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 др.

Перечисленные недостатки указанных работ устранены на основе применения разработанного оптимизатора на мягких вычислениях [46, 48, 136, 141] и проиллюстрированы в диссертации.

В работе рассмотрены 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, интеллектуальной робототехники и мехатроники, представляющих самостоятельный интерес для теории и систем управления. Обсуждены вопросы разработки и моделирования в MATLAB/SIMULINK интеллектуальных систем управления и оценки их робастности в непредвиденных ситуациях управления.

Следует отметить, что изложенная в работе 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 устранить ряд недостатков методологии инструментария модулей Fuzzy Logic Toolbox и Robust Control, встроенных в MATLAB [17, 34, 35, 39, 52, 53, 56, 151].

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 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.

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 модулей, что не позволяет решать задачи проектирования ИСУ с требуемым уровнем робастности. Примеры сравнения результатов моделирования на ОБЗ с упомянутыми модулями MATLAB приведены на т.н. типовых Benchmarks, которые наглядно показали высокую эффективность применения ОБЗ на мягких вычислениях в исследовании робастности ИСУ, функционирующих в непредвиденных ситуациях управления [98, 124-127, 134, 136].

В настоящей диссертации обсуждаются также более глубокие механизмы разработки новых моделей интеллектуальных вычислений типа квантовых вычислений и проектирования процессов самоорганизации баз знаний 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 ИТ [143], которые отсутствуют в программной среде MATLAB, и успешно решаются с помощью новых видов интеллектуальных вычислений [144]. При этом качество извлеченных знаний и проектирование объективных БЗ находятся в прямой зависимости от точности и адекватности физической и математической модели ОУ.

Следует также подчеркнуть, что стремительная смена элементной базы [16] аппаратной поддержки и вычислительных средств на основе гибридных квантовых чипов [22, 51] позволяют существенно расширить прикладные области применения интеллектуальных контроллеров и встраиваемых ИСУ с ОБЗ на квантовых и мягких вычислениях.

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

1.2. Особенности разработки структуры информационной технологии проектирования робастных самоорганизующихся интеллектуальных систем управления

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. Показано, что для гарантированного достижения цели управления законы управления изменением коэффициентов усиления (coefficient gain schedule), например, нечеткого пропорционально интегрально дифференциального (ПИД) - регулятора должны проектироваться на основе дополнительно извлеченных знаний, позволяющие распознавать физические особенности и информационные ограничения на ОУ. Извлеченные знания используются для самоорганизации данного ОУ при достижении цели управления в конкретной ситуации управления.

Рис. 1.1 показывает типовую структуру ИСУ и описывает рассматриваемую в данной работе проблему проектирования объективной БЗ [140].

На рис. 1.2 представлена структурная схема ИТ. Отражены также этапы проектирования объективной БЗ для робастных ИСУ, основанных на новых видах интеллектуальных вычислений [140]. На рис. 1.2, 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.

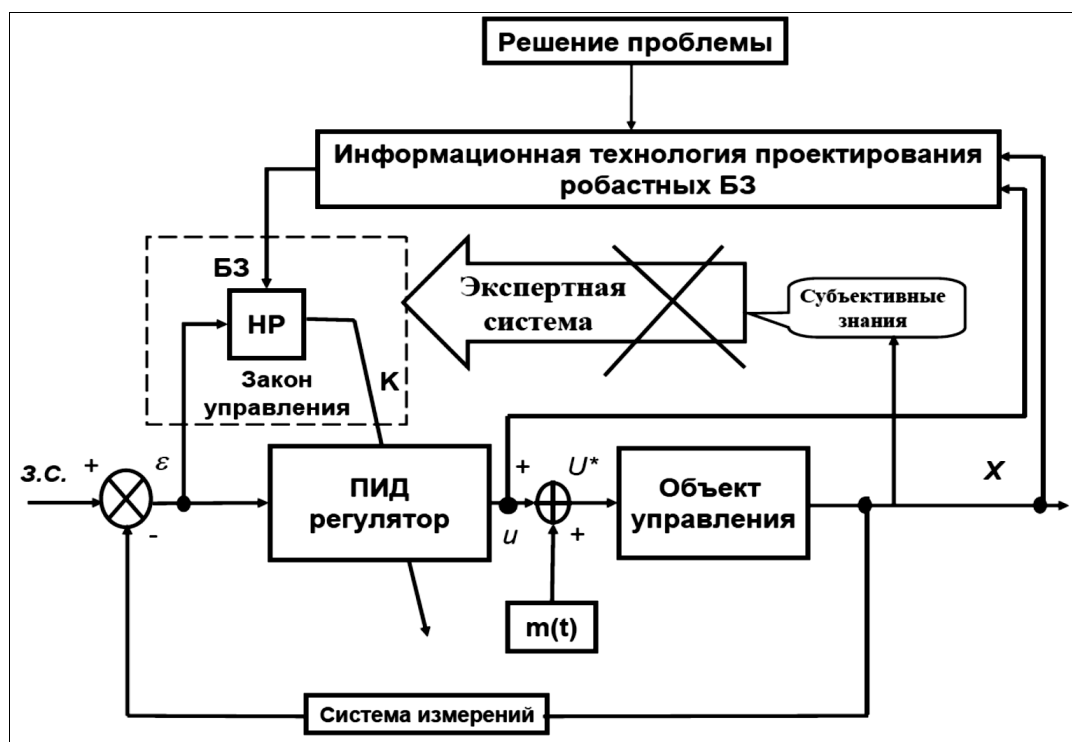


Рис. 1.1. Проблема проектирование робастных баз знаний в условиях непредвиденных ситуаций управления

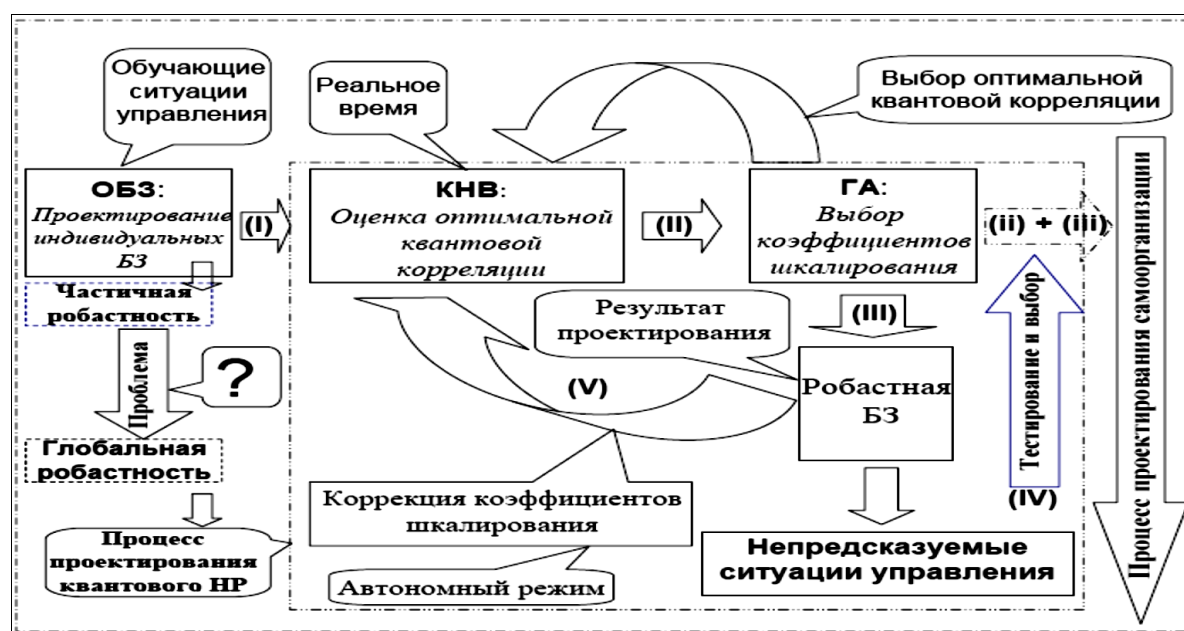


Рис. 1.2. Структура технологии и этапы проектирования робастных баз знаний

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 информационной технологии 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. 1.1 определяет вектор $K = \{k_p, k_D, k_I, \}$ коэффициентов усиления ПИД-регулятора, и означает пропорциональный, дифференциальный и интегральный коэффициенты усиления соответственно.

На рис. 1.1 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 экспертом 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 генетическом алгоритме.

Поэтому задачей технологии проектирования (обозначенной на рис. 1.1, и структурно представленной на рис. 1.2), является формирование объективных робастных баз знаний в ИСУ для непредвиденных ситуаций управления.

На рис. 1.2 (и ниже на рис. 1.3), а также далее по тексту, используются следующие обозначения: з.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.1.2 (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 известны 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 работе, 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: не разрушение исполнительского уровня с гарантированной эффективностью и робастностью управления за счет повышения уровня его интеллектуальности.

Отметим и кратко опишем основные этапы информационной технологии проектирования робастных БЗ, представленной на рис. 1.2.

На первом этапе (I) проектирования с помощью технологии мягких вычислений (блок ОБЗ – оптимизатор баз знаний) формируется конечное множество БЗ для конкретных ситуаций управления, отмеченные на рис.1.2 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. 1.2 выноской вопроса) составляет проблему, которую решает данная информационная технология проектирования.

Последовательный переход (от частичной к глобальной робастности) приводит к процессу проектирования квантового нечеткого регулятора с использованием квантовых стратегий в нечетком логическом выводе (в виде КНВ, обозначенный соответствующей выноской на рис. 1.2. 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_∞

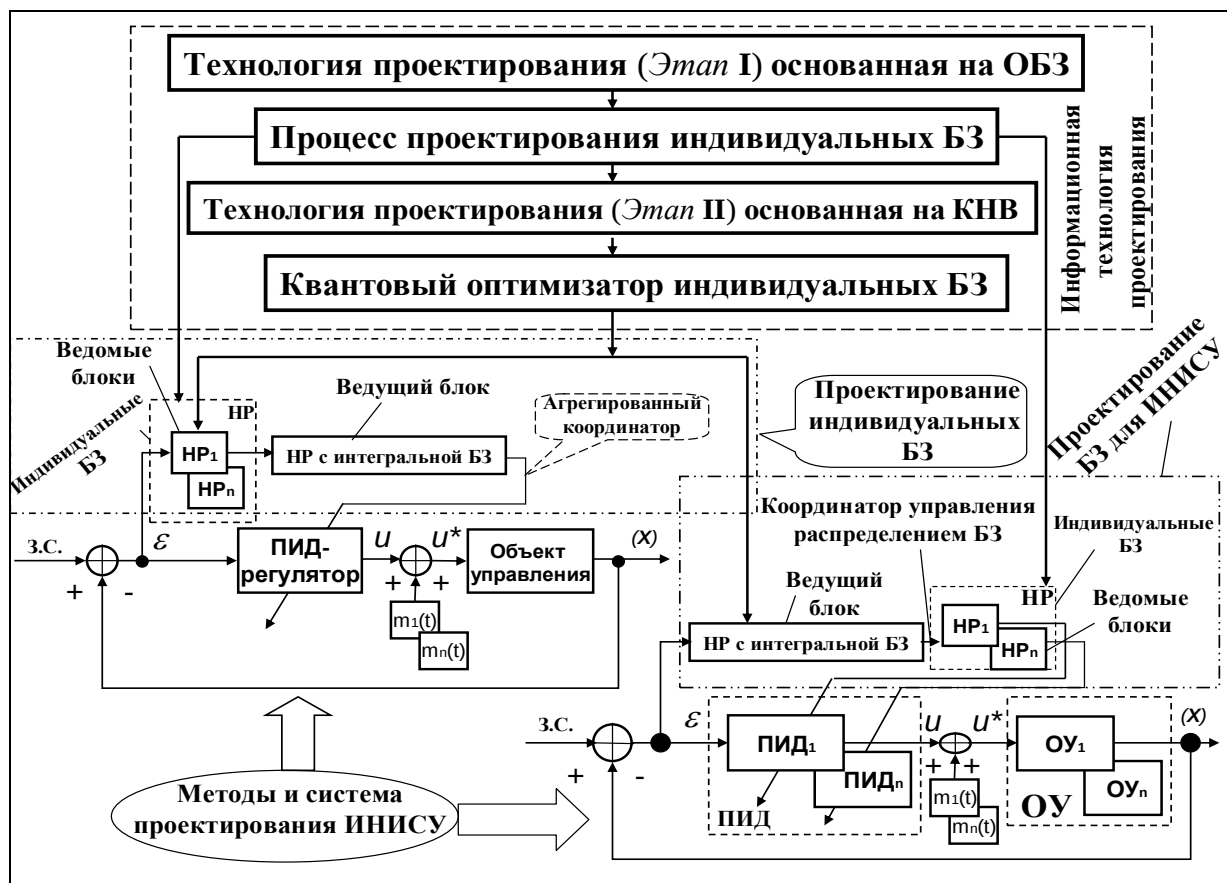
управление, μ – синтез и др. были исследованы автором, и было показано, что они также эффективно проектируются разработанной технологией, представленной на рис. 1.3.



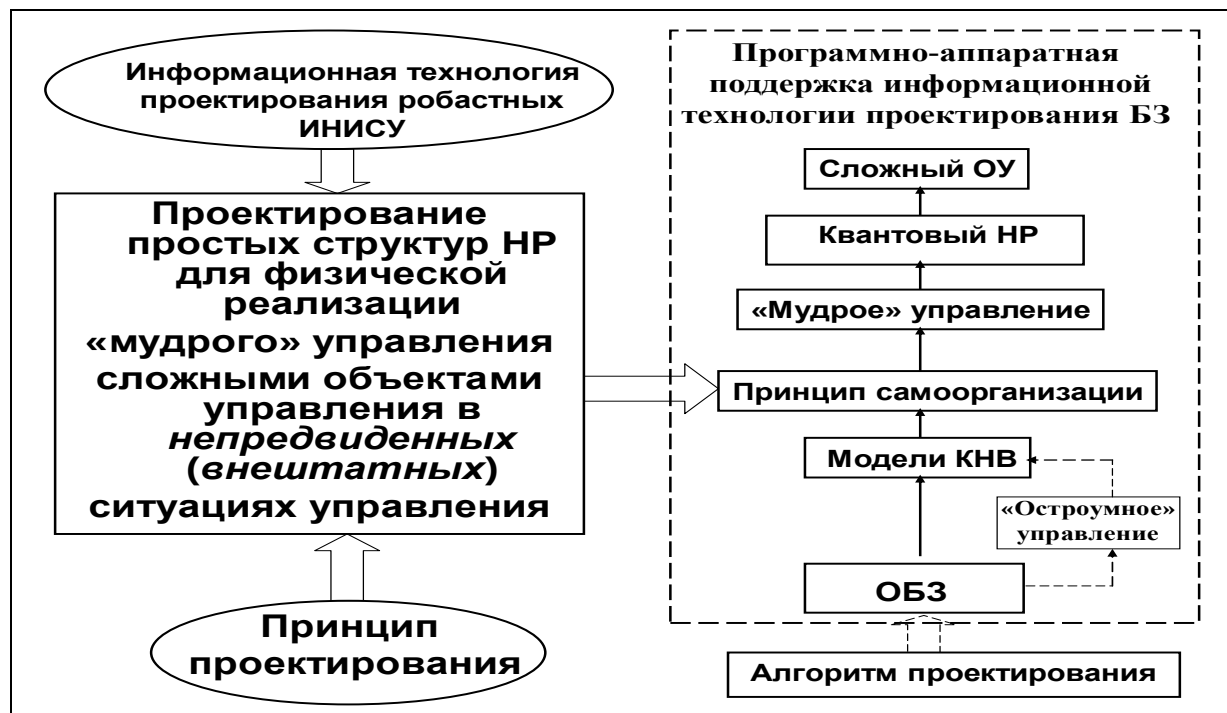
Рис. 1.3. Структура реализации информационной технологии проектирования робастных интеллектуальных регуляторов

После получения результатов работы КНВ блок ГА формирует коэффициенты «шкалирования» для обобщенных коэффициентов усиления ПИД-регулятора. Результаты (ii) этапа (II) и (iii) этапа (III). Остальные подэтапы процесса проектирования показаны соответствующими выносками на рис. 1.2, интерпретация которых представлена ниже.

В результате процесс реализации самоорганизации робастных БЗ в непредвиденных ситуациях управления реализуется суммарным действием перечисленных этапов проектирования, что отражено на рис. 1.4 [139].



а)

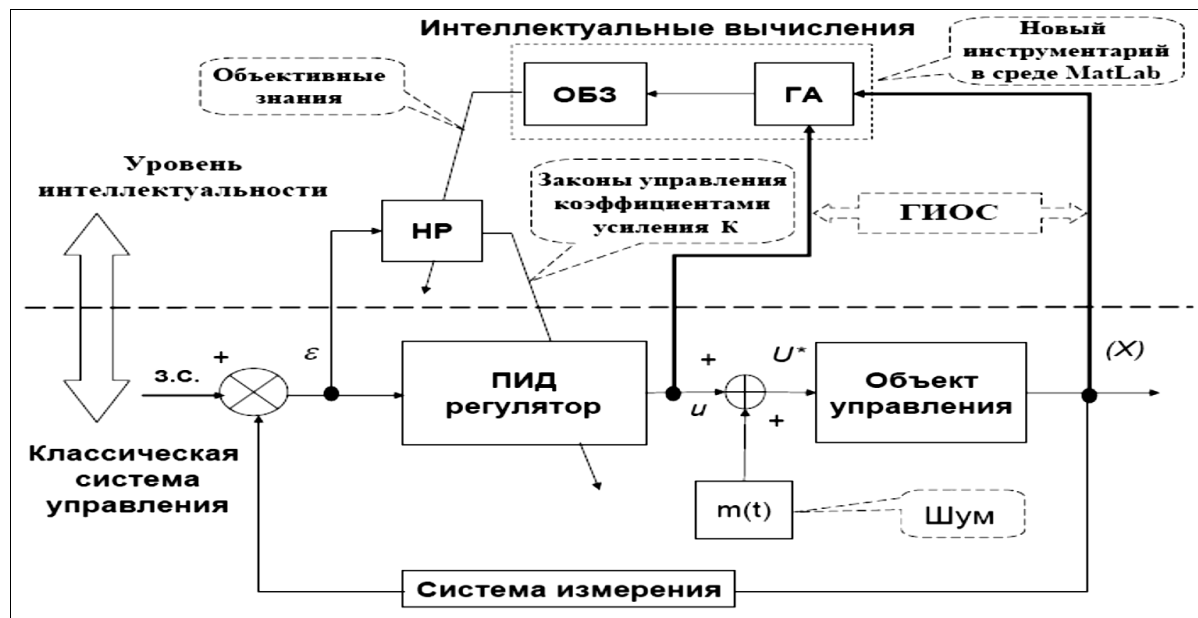


б)

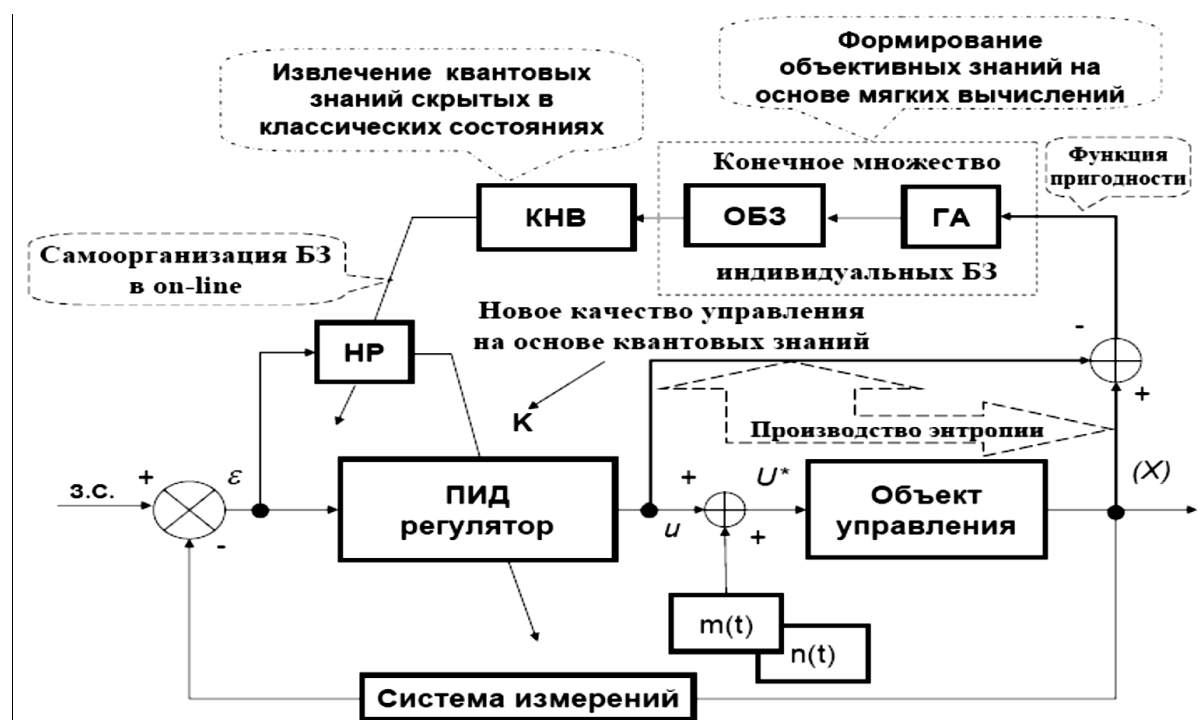
Рис. 1.4. Структура информационной технологии проектирования робастных ИСУ (а) и информационных потоков в алгоритме процессов проектирования (б)

Процессы проектирования робастных БЗ на основе информационной технологии, представленной на рис. 1.4 (а), включает структуры ИСУ.

Более конкретно, структуры робастных автономных ИСУ, основанных на разработанной технологии проектирования показаны на рис. 1.5 [139].



а)



б)

Рис. 1.5. 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. 1.5.

Двусторонняя стрелка «Производство энтропии» на рис. 1.5 (б) означает процесс вычисления производства энтропии сигналами X и u , что эквивалентно наличию блока вычисления «Производство энтропии» в обеих связях. Производство энтропии рассматривается в ГА, как одна из компонент функции пригодности (критерий минимума обобщенной энтропии) и является термодинамической величиной. Поэтому в сумматоре на рис. 1.5 выполняется корректная операция с физически однородными переменными (в соответствии с законами термодинамики открытых систем).

В модели КНВ на рис. 1.5 (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. 1.6 показана структура алгоритмической поддержки интеллектуальных вычислений, реализованных в MATLAB/Simulink [144].



Рис. 1.6. Структура алгоритмической поддержки интеллектуальных вычислений

На рис. 1.7 показана укрупненная структура применения квантовых интеллектуальных вычислений в программной среде Quantum MATLAB toolkit [144].

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. 1.7, осуществляется оптимизация других видов регуляторов.

Структура блока «Quantum soft computing computational intelligence» для раздела “Quantum computational intelligence” отображена на рис. 1.8 [144].

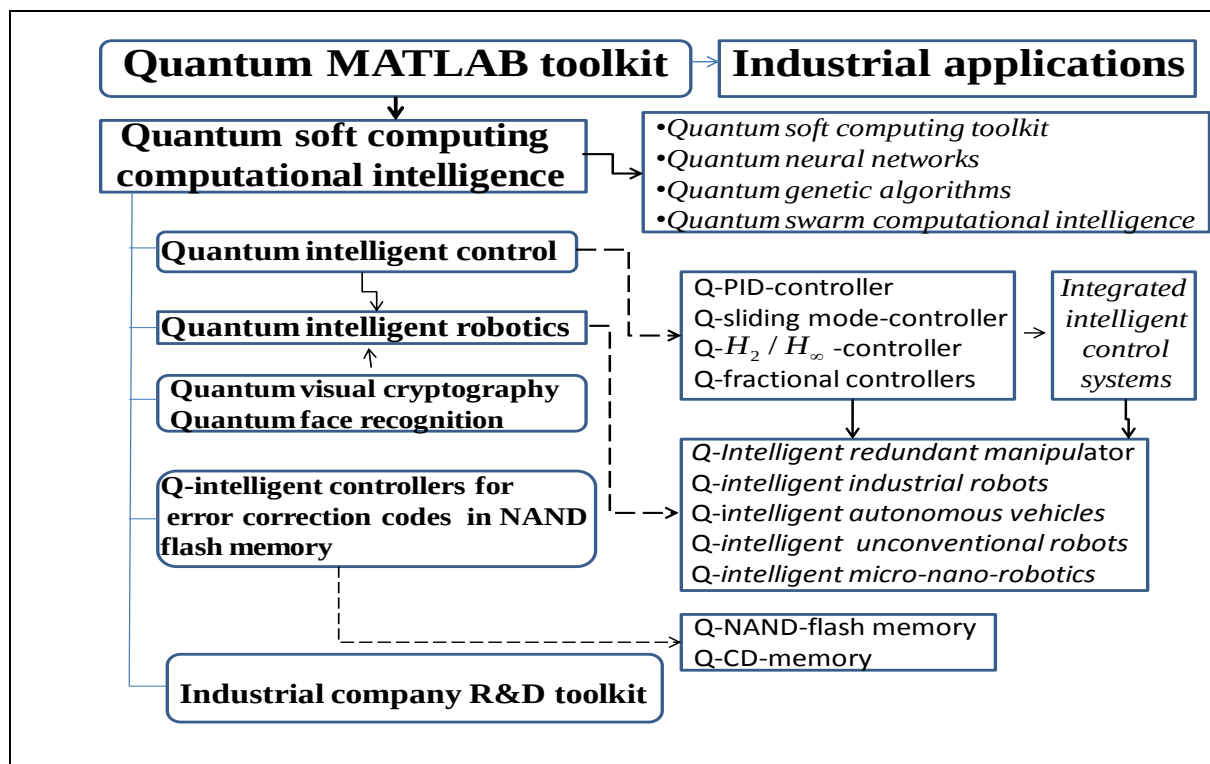


Рис. 1.7. Обобщенная структура инструментария Quantum MATLAB toolkit и его промышленного применения

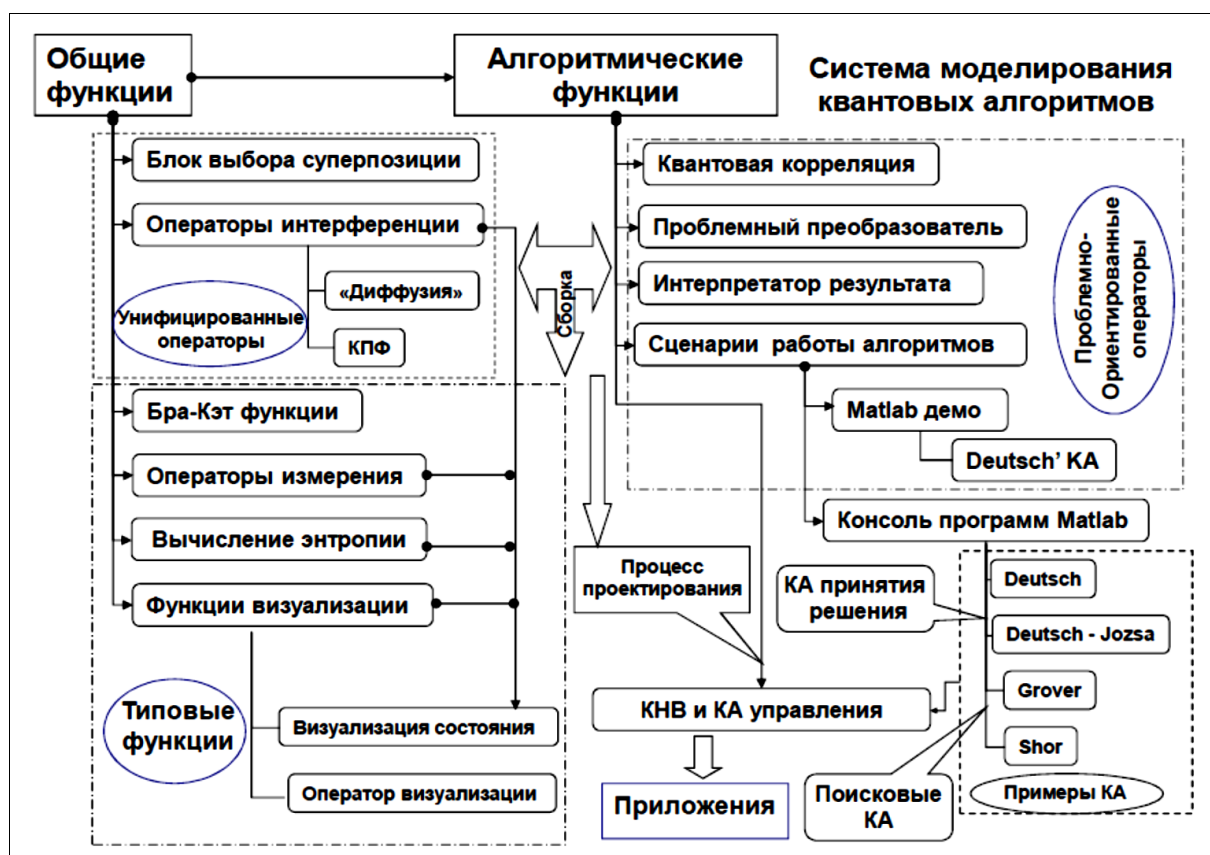


Рис. 1.8. Структура блока “Quantum computational intelligence” на рис. 1.7

Подчеркнем, что введенный в данной диссертации КА является новым квантовым поисковым алгоритмом [138]. Решение задачи проектирования робастного управления ОУ (локально или глобально неустойчивым и существенно нелинейным), с векторным критерием качества управления рассматривается в данной работе 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 управления.

1.3. Критерий робастности в интеллектуальных системах управления

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 надёжности и точности управления в условиях неопределённости информации). При этом одной из приоритетных и трудно решаемых задач технологии проектирования ИСУ является построение робастных БЗ, позволяющих функционировать ИСУ в различных условиях неопределённости информации. Ядро технологии проектирования робастных баз знаний ИСУ составляют новые типы вычислений и процессов моделирования [47, 49, 105].

Применение структур ИСУ, основанных на новых типах вычислений (таких как мягкие вычисления, квантовые вычисления и т.п.), в последние годы привлекают все большее внимание исследователей. Проведенные многочисленные исследования показывают, что ИСУ 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 её 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 трём основным качествам управления: устойчивость, управляемость и робастность. Перечисленные качества управления обеспечивают требуемую точность управления и надёжность работы ОУ в условиях неполной информации о внешних возмущениях и помехах в каналах измерения и управления, неопределённости структуры или параметров ОУ или слабо формализованных факторах, описывающих цели управления.

Решения данной задачи осуществляются в три этапа: определяются 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 к разным классам 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.

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

Как известно, основной принцип построения САУ использует биологический механизм глобальной, отрицательной обратной связи (ГООС). На рис. 1.9 показана традиционная САУ, основанная на принципе ГООС (см. также позицию 1, Таблица П2.1 [141]).

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

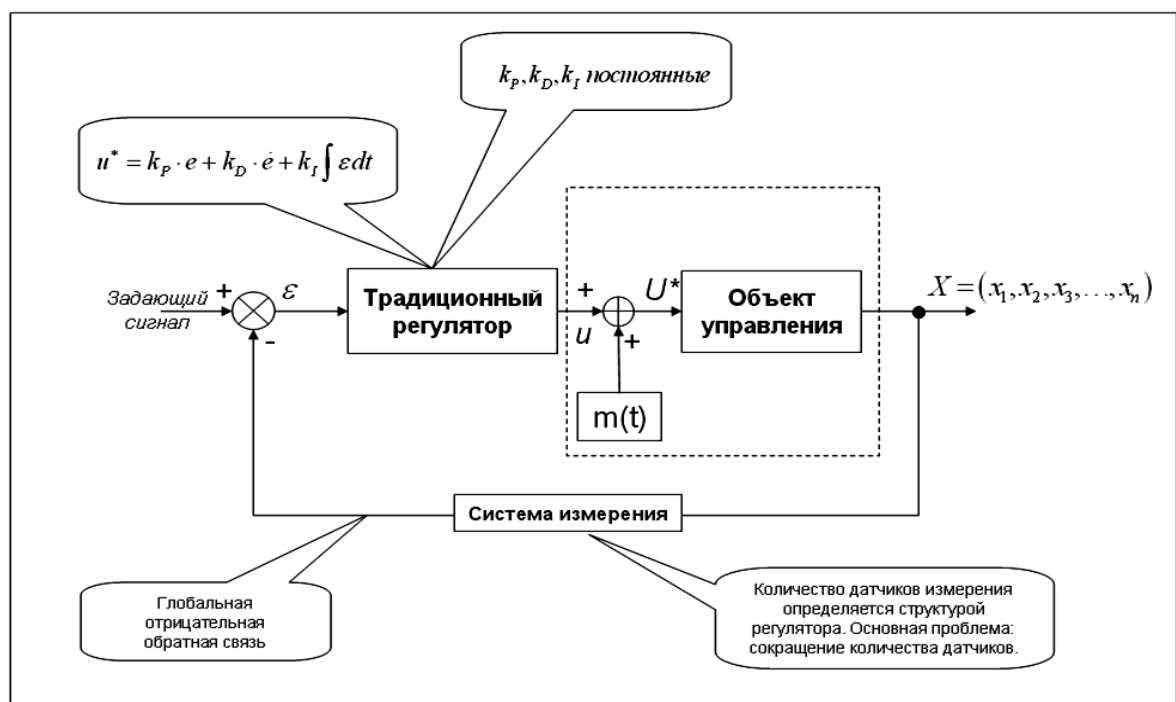
$$X(i\omega) = \underbrace{\frac{1}{1 + \Phi_1(i\omega)\Phi_2(i\omega)}}_{\text{Устойчивость}} \bullet \underbrace{\Phi_1(i\omega)\Phi_2(i\omega) \bullet Y}_{\text{Управляемость}}, \quad (1.1)$$

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

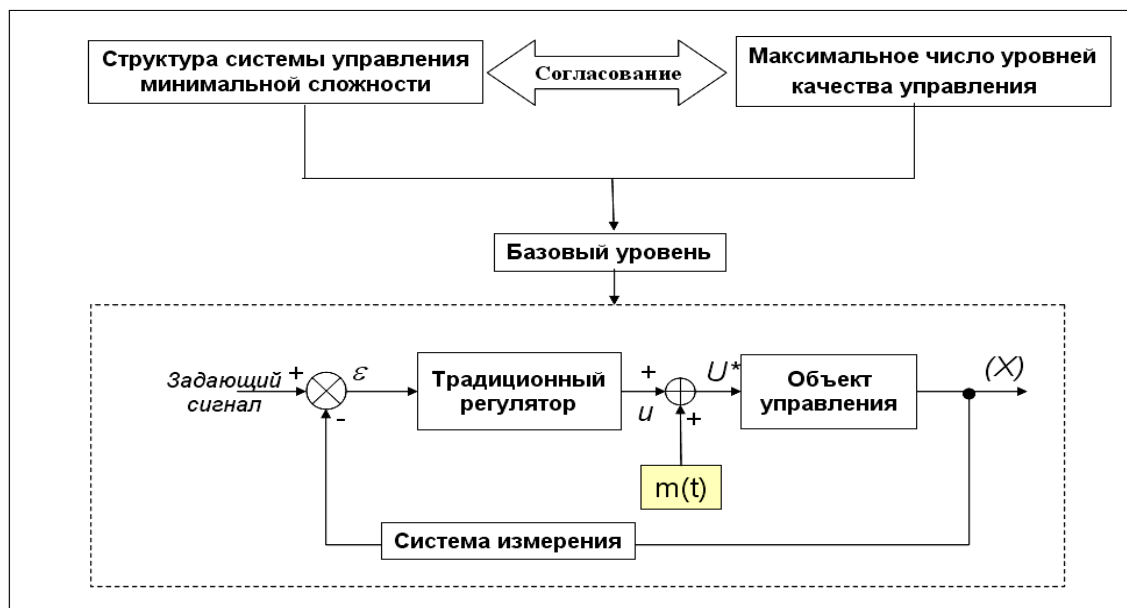
Нетрудно видеть, что формула (1.1), описывающая отношение вход/выход в структуре САУ, требует исследования одновременно двух критериев качества управления: устойчивость и управляемость. Следовательно, принцип ГООС содержит в себе два указанных выше критерия качества управления. Именно поэтому робастность рассматривалась как третий независимый критерий качества управления, проектирование которого осуществлялось после установления уровней устойчивости и управляемости.

Приведенный пример одновременно указывает на жёсткость 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 позволяет определить необходимый уровень интеллектуальности САУ в зависимости от сложности конкретной проблемы управления.



а)



б)

Рис. 1.9. Структура САУ, основанной на принципе глобальной отрицательной обратной связи (ГООС) и методе компенсации (минимума) ошибки управления (ПИД-регулятор): а) структура САУ с ПИД-регулятором и её основные динамические характеристики; б) взаимоотношения между качественными характеристиками и сложностью процессов управления (приведены соотношения между уровнями качества управления, сложности управления, и обоснование базового уровня).

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

$$\frac{dq}{dt} = \varphi(q, t, S(t), u(t)), \quad (1.2)$$

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 (1.2)

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 обобщённой функции Ляпунова выберем следующую функцию:

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i^2 + \frac{1}{2} S^2, \quad (1.3)$$

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 (1.3) возможно в силу скалярного свойства энтропии $S(t)$, как функции времени.

Первое условие выполняется автоматически. Потребуем выполнения второго условия $\frac{dV}{dt} \leq 0$. В этом случае полная производная от функции Ляпунова, описанной в (1.3), с учетом (1.2) имеет вид:

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

Таким образом, имеем уравнение Ульянова (1976 г.):

$$\underbrace{\frac{dV}{dt}}_{\text{стабильность}} = \underbrace{\sum_{i=1}^n q_i \cdot \varphi(q, t, S(t), u)}_{\text{управляемость}} + \underbrace{(S_p - S_c) \cdot (\dot{S}_p - \dot{S}_c)}_{\text{робастность}} \leq 0 \quad (1.4)$$

На рис. 1.10 показана взаимосвязь между функцией Ляпунова и производством энтропии в ОУ и в САУ [141].



Рис. 1.10. Термодинамический критерий качества робастного управления

Уравнение (1.4) описывает физический закон качества управления и объединяет в аналитической форме различные меры качества управления типа: устойчивость, управляемость и робастность, поддерживающие требуемую надёжность и точность управления. Следовательно, взаимосвязь между устойчивостью по Ляпунову и робастностью, описанной уравнением (1.4), является основным физическим законом для проектирования САУ. Этот закон является основой для прикладной технологии проектирования БЗ робастных ИСУ (с различными уровнями интеллектуальности [105]) с использованием технологий мягких вычислений.

Отметим, что робастное управление, подразумевает совокупность методов теории управления, целью которых является синтез такого регулятора, который обеспечивал бы хорошее качество управления, к примеру, запасы устойчивости в нештатных и непредвиденных ситуациях управления. Надёжность это свойство объекта в целом сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных (типовых) режимах и условиях применения. Интуитивно надёжность объектов связывают с недопустимостью отказов в работе технического устройства и все ее подсистем – исполнительных механизмов, системы управления, аппаратной составляющей. Напротив, робастность выступает, как способность регулятора справляться с непредвиденными и нештатными ситуациями управления, что повышает надёжность работы системы. В данной

диссертации проводится исследование именно робастности систем управления.

При этом уравнение (1.4) включает в себя надежность ОУ и регулятора, так как превышение допустимого уровня накопленной энтропии в ОУ приводит к отказу его работоспособности, а накопление энтропии в регуляторе приводит к нарушению управляемости и устойчивости системы управления (энтропийная надежность [115, 116]).

Практическое применение физического закона (1.4) процессов управления к традиционным задачам, таким как оценки точности (грубости) линеаризации моделей ОУ, наблюдаемости параметров процессов управления и др., рассмотрено в [105]. 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 3). В этом случае имеем обобщение модели «чёрного ящика» ОУ.

На рис. 1.11 и 1.12 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 [141].

На рис. 1.13 показаны основные компоненты и их взаимосвязи в информационной технологии проектирования (ИТП), основанной на новых видах вычислений (мягких и квантовых вычислениях) [141].

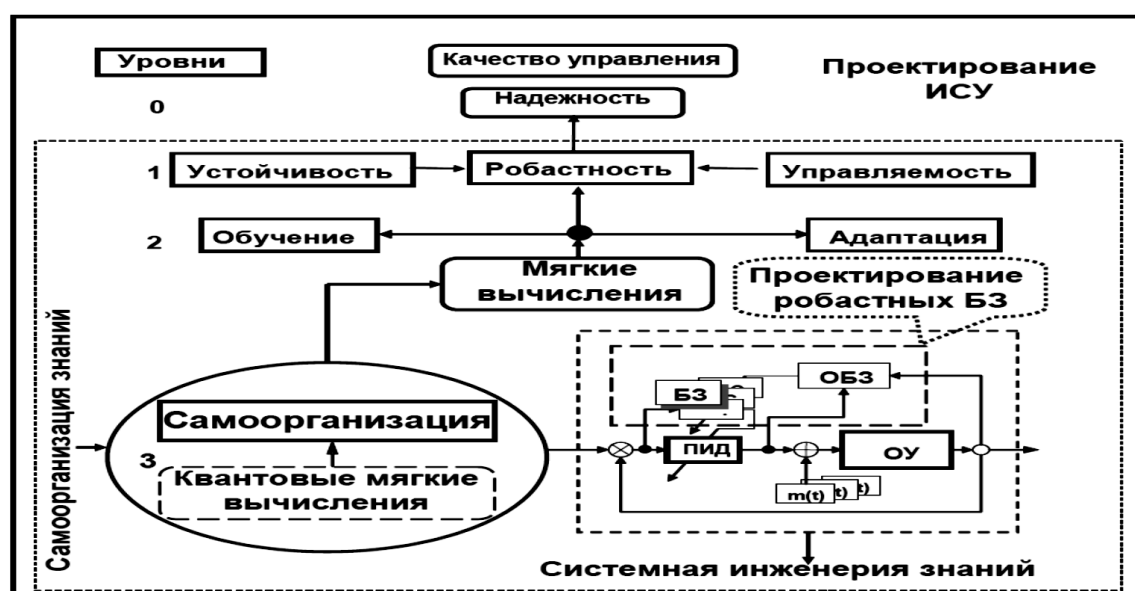


Рис. 1.11. Взаимоотношение между типами и иерархическими уровнями критериев качества управления

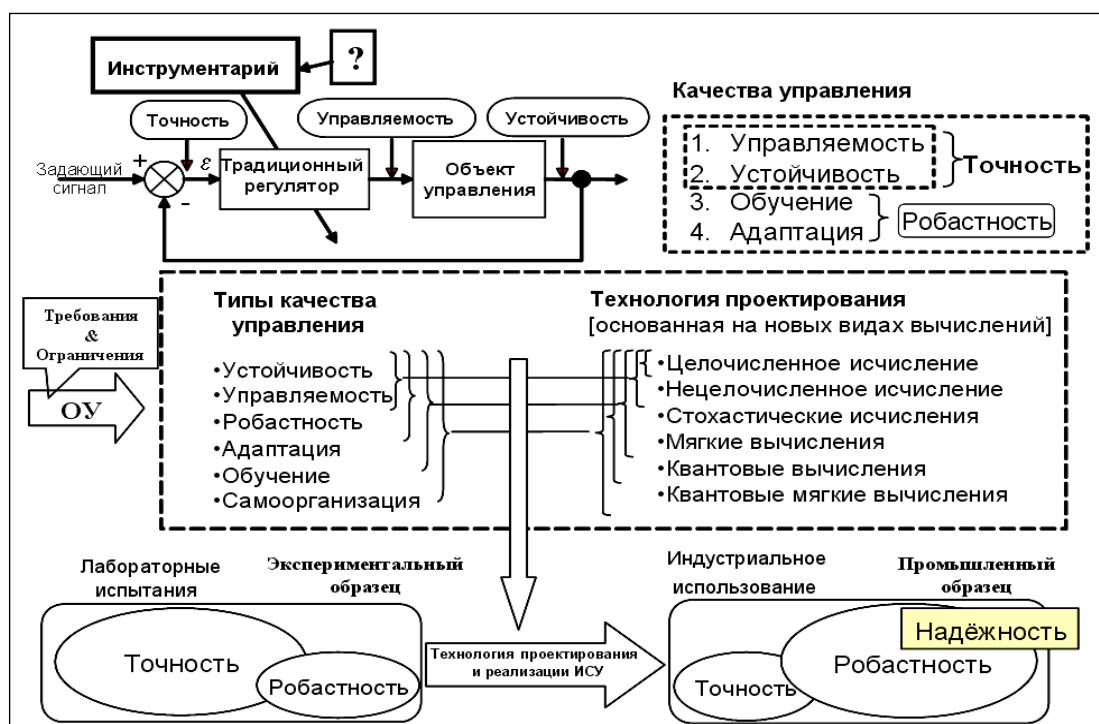


Рис. 1.12. Взаимоотношение между критериями качества управления, видами интеллектуальных вычислений и моделирования в технологии проектирования робастных БЗ

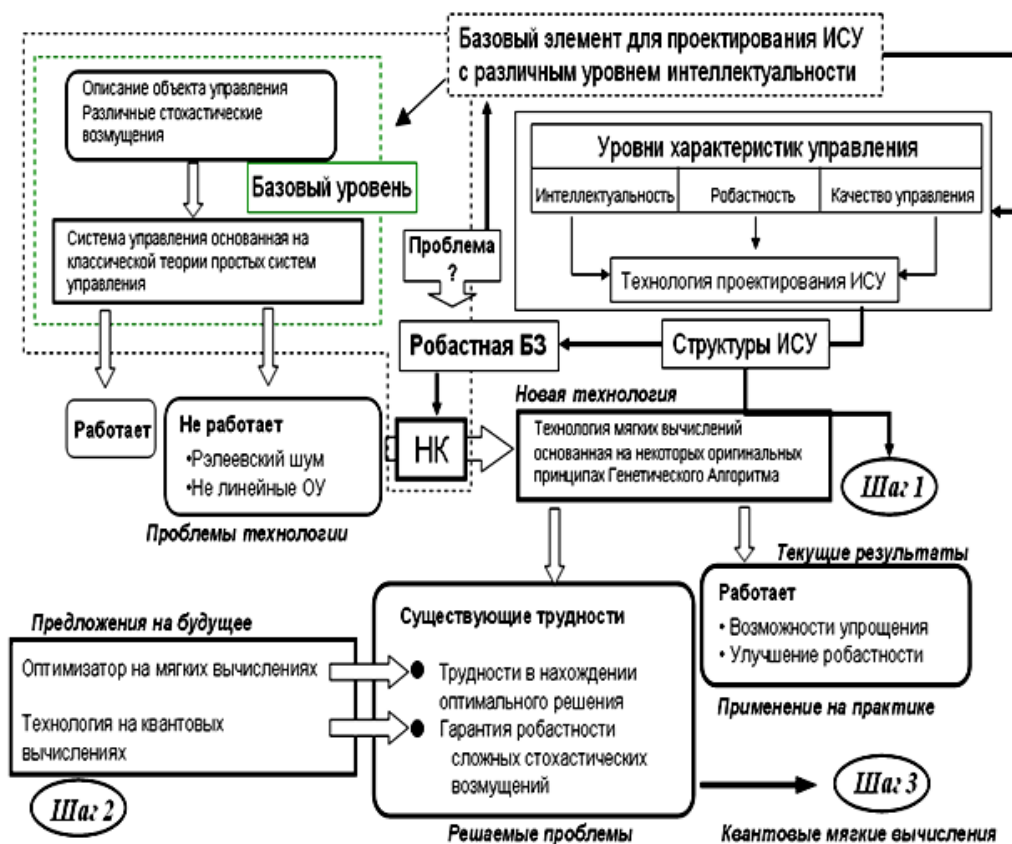


Рис. 1.13. Процесс разработки и создания информационной технологии проектирования интегрированной ИСУ

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 неопределённости.

Можно сделать следующие выводы:

1) введенный физический закон интеллектуального управления (1.4) 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 нечёткой 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 счёт оптимального проектирования общего количества продукционных правил и типов функций принадлежности в БЗ, реализуя оптимальный аппроксиматор слабоструктурированных ОУ.

В приложении 2 (Таблица П2.1) приведена обобщённая эволюция развития и формирования структур ИСУ, их особенности, достоинства и недостатки, а также уровни качества управления, содержащиеся в этих структурах [141].

Для моделирования «человеко-машинных» стратегий управления на первом этапе проектирования ИСУ стали использоваться так называемые «мягкие вычисления», в основе которых лежит теория нечетких множеств и нечеткого вывода [105].

Так, например, представленная структура САУ структура, преобразуется в экспертную систему управления, последовательным наращиванием составляющих блоков в классической структуре САУ (в данном случае введением блока нечеткого вывода), (см., Таблица П2.1, позиция 2), и является примером первого поколения ИСУ.

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. Поэтому, использование ЭС в качестве инструментария извлечения знаний и формирования БЗ (как основы технологии проектирования ИСУ) не привело к ожидаемому существенному успеху (хотя существует 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, используя технологии 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 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., Таблица П2.1, позиция 3).

В дальнейшем второе поколение ИСУ стало использовать новый вид обратной связи, называемой глобальной интеллектуальной обратной связью (ГИОС), представленной в Таблица П2.1, (позиция 4). Её 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. Таблица П2.1, 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:

$$\{E(t_i), K(t_i)\}, i=1,...,n,$$

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. 1.13 и подробно описан в опубликованных работах [105, 126, 127, 135]. 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).

Основным недостатком этапа 1 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 её 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 и разработанного в рамках диссертационного исследования программного инструментария.

1.4. Постановка задачи и особенности метода решения

Основной целью исследования является развитие методов программно – алгоритмической поддержки процесса проектирования интеллектуальных систем управления, в том числе и разработка методов программно-алгоритмической поддержки процесса моделирования, проектирования и разработки робастных интеллектуальных систем управления для слабо формализованных объектов управления, функционирующих в непредвиденных и нештатных ситуациях управления на основе мягких и квантовых вычислений.

Достижение поставленной цели подразумевает решение следующих задач: проведение анализа современного состояния процесса проектирования интеллектуальных систем управления с применением мягких и квантовых вычислений; выявление проблем современных информационных технологий проектирования; проектирование и разработка технологии синтеза робастной интеллектуальной системы управления автономным роботом с применением интеллектуальных вычислений; реализация разработанной технологии в виде программного инструментария; апробация и тестирование технологии проектирования на типовых автономных роботах; применение инструментариев в прикладных областях науки и техники.

Так, основной задачей диссертационного исследования стала задача разработка соответствующего программного инструментария, на основе технология мягких и квантовых вычислений, позволяющего проектировать робастные базы знаний для различного уровня структурной сложности ИСУ. В частности решением данной задачи

стала разработка методологии и основы информационной технологии проектирования самоорганизующихся интеллектуальных систем управления. Алгоритмический базис такой технологии составляет квантовый алгоритм управления самоорганизацией баз знаний. Иными словами решение данной задача состоит в разработке программного инструментария для проектирования квантового алгоритма управления самоорганизацией баз знаний в интеллектуальных системах управления.

Под процессом самоорганизации робастных баз знаний понимается процесс проектирования нечеткого регулятора, формирующего на выходе робастные сигналы адаптивного управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств, задающих управляющую силу объекту управления. При этом используется реакция продукционных правил ранее спроектированных (на заданные ситуации управления) робастных баз знаний нечетких ПИД - регуляторов на ошибку управления в условиях неопределенности новой исходной информации и непредвиденных ситуаций управления. Проектируемый процесс самоорганизации реализуется в реальном времени за счет извлечения дополнительной квантовой информации и редукции избыточной информации скрытой в классических состояниях процесса управления.

Квантовый нечеткий вывод (КНВ), разработанный ранее на основе четырех фактов из квантовой теории информации, является частным случаем алгоритма самоорганизации [102, 103].

Объединение ИСУ на структурном уровне спроектированных ранее из конечного числа баз знаний совместно с моделью КНВ в один блок, дает возможность формировать в реальном времени робастное управление из реакций продукционных правил указанных баз знаний 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.

Результатом работы алгоритма управления является самоорганизация БЗ, с помощью которой выбираются подходящие коэффициенты усиления ПИД-регулятора.

Таким образом, осуществляется формирование (в реальном времени) робастного сигнала управления параметрами соответствующих исполнительных устройств, задающих

управляющую силу на ОУ в условиях непредвиденных ситуаций управления.

1.5. Выводы по главе 1

В главе проведен ~~представлен обзор опубликованных работ по теме диссертации.~~ анализ литературных данных о современном состоянии процесса проектирования интеллектуальных систем управления показал, что современные инструментарины не могут корректно и эффективно решать задачи связанные с проектированием систем управления для слабо формализованных и слабо структурированных объектов управления, функционирующих в непредвиденных и нештатных ситуациях. Причина заключается в отсутствии необходимого уровня интеллектуальных вычислений в структурах инструментария рассмотренных модулей, что не позволяет решать задачи проектирования интеллектуальных систем управления с требуемым уровнем робастности.

Несмотря на наличие стандартных программных пакетов (ANFIS, FIS, Robust Control), отсутствуют аналоги специальных информационных технологий для работы систем управления в нештатных и непредвиденных ситуациях со слабо формализованными объектами управления.

Поскольку вышеперечисленные программные комплексы не позволяют вводить принцип самоорганизации в процесс проектирования интеллектуальных систем управления и повышать робастность функционирования системы управления, создание новой технологии проектирования интеллектуальной системы управления на основе квантовых вычислений является актуальной задачей.

Приведен краткий обзор развития структур интеллектуальных систем управления. Обосновываются преимущества и основные положения реализованного метода проектирования интеллектуальной системы управления.

На основе аналитического обзора информационных технологий проектирования интеллектуальных систем управления, можно сделать вывод о необходимости решения следующих проблем процесса проектирования:

1. разработке и физическому обоснованию математической модели квантового алгоритма управления самоорганизацией баз знаний и выявлению роли аналогов физических (квантовых и термодинамических) эффектов в реализации процесса гарантированного достижения качества и цели управления на основе технологии квантовых мягких вычислений, другими словами необходимо разработать технологию проектирования квантовых алгоритмических ячеек в интеллектуальных системах управления для

повышения робастности функционирования в нештатных и непредвиденных ситуациях управления;

2. проблеме применения технологии проектирования робастных баз знаний в структуре интеллектуальных систем управления.

Особое внимание следует уделить описанию качественных особенностей биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации, основные компоненты которой описываются квантовыми операторами и составляют содержание разработанной модели квантового алгоритма управления процессом самоорганизации.

2. ИНСТРУМЕНТАРИЙ ИЗВЛЕЧЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ФОРМИРОВАНИЯ БАЗ ЗНАНИЙ В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ

Центральным моментом эффективного применения технологии процессов извлечения, обработки и сжатия ценной информации для формирования активных знаний в виде робастных БЗ является структурированный случайный поиск (на основе технологии мягких вычислений, Этап 1 – формирование конечного множества индивидуальных БЗ в конкретных ситуациях управления с обучением). Использование в разработанном алгоритме квантовых стратегий управления самоорганизацией знаний составляет сущность Этапа 2, на котором на основе квантового нечеткого вывода осуществляется самоорганизация активных (в реальном времени) знаний из реакций, спроектированных индивидуальных БЗ на новую, непредвиденную ситуацию управления.

Рассмотрим, прежде всего, особенности технологий мягких и квантовых вычислений при проектировании ИСУ, достоинства и недостатки с точки зрения информационной технологии проектирования и применения ИСУ.

2.1. Технологии мягких и квантовых 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 количественной характеристики) привело к более 30-летней дискуссии с представителями научной школы теории вероятностей. К таким 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 осреднения 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 проектирования универсального аппроксиматора); в) применение генетического алгоритма в задачах многокритериального управления при наличии дискретных ограничений на параметры объекта управления и др.

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

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе разработанного, апробированного и представленного в данной диссертации оптимизатора БЗ (ОБЗ) [46, 104, 127, 131, 142] 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 инструментarii разработанного ОБЗ позволило повысить уровень робастности проектируемых БЗ и решать сложные задачи формирования объективных знаний [59].

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, такой как, например, технология интеллектуальных квантовых вычислений.

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

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 не коммутативности 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 её 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 («Паррондо» эффект), использующего квантовый подход к решению задачи.

Рис. 2.1 демонстрирует физическое различие в определении вычислительного базиса мягких и квантовых вычислений [140].

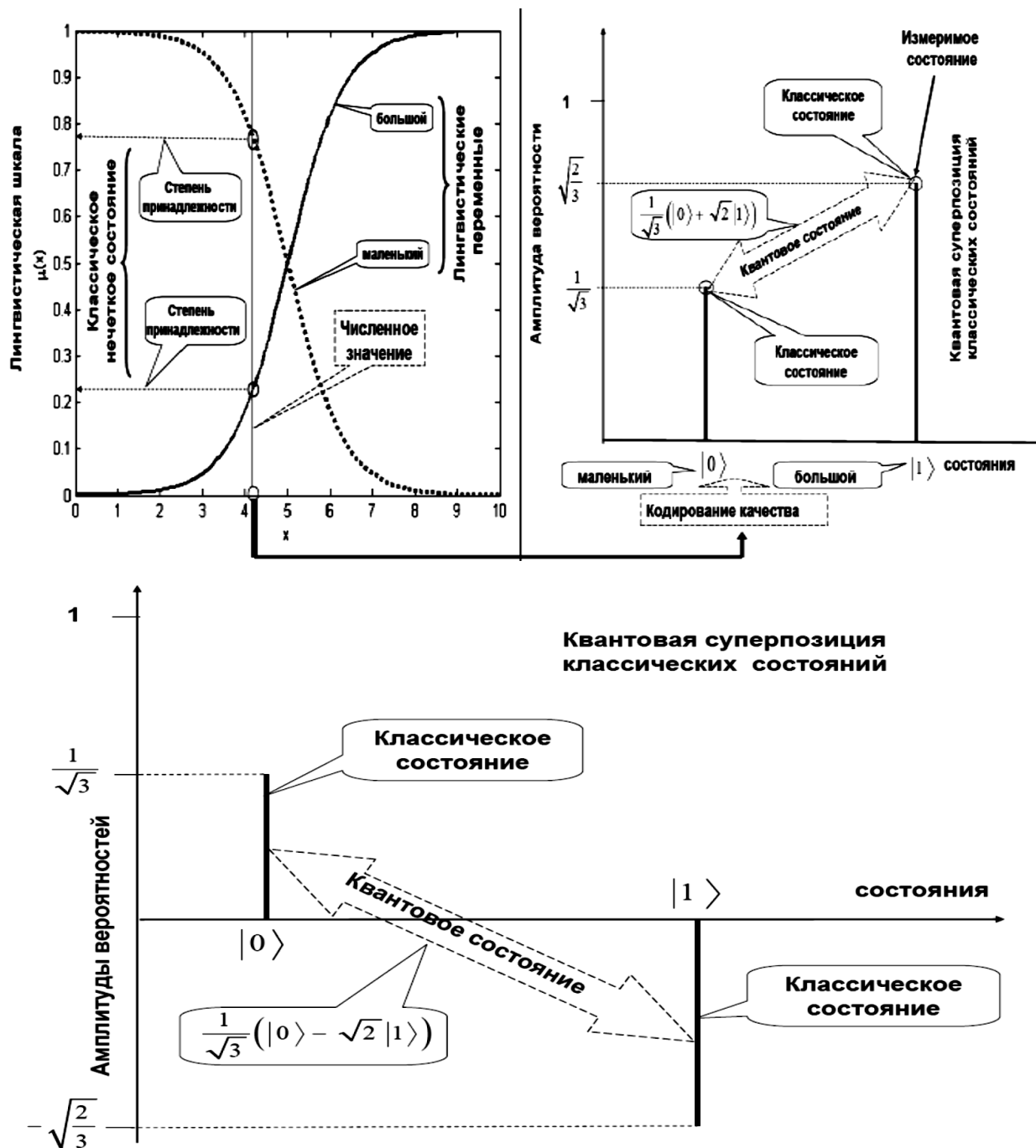


Рис. 2.1. Физическое различие между нечетким и квантовым состояниями

Одновременно рис. 2.1 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. 2.1 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. 2.1 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 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.

2.2. Структурный анализ интеллектуальных систем управления с использованием разработанного инструментария

Рассмотрим разработанный программный инструментарий, который основан на технологиях мягких вычислений и стохастического моделирования, и его применение для извлечения, обработки знаний и формирования баз знаний в интеллектуальных системах управления. Основные результаты формируются на основе процессов обучения с помощью нового оптимизатора БЗ, и проводится сравнение с методом, основанном на нечёткой нейронной сети и генетическом алгоритме. В частности, инструментарий мягких вычислений, основанный на стохастическом моделировании объекта управления, 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 в соответствии с заданным функционалом качества (функции пригодности ГА). Таким образом, робастность законов управления достигается за счет введения векторного критерия пригодности генетического алгоритма, содержащего в качестве одной из компонент физический принцип минимума производства энтропии, как в ОУ, так и в интеллектуальном регуляторе.

Таким образом, проведенный структурный анализ ИСУ определил взаимосвязи предложенных технологий с традиционными задачами теории систем управления. На основе анализа результатов моделирования типовых структур ИСУ показано, что применение нечеткой нейронной сети (ННС) не гарантирует (в общем случае) достижение требуемой точности аппроксимации обучающего сигнала, полученного от генетического алгоритма 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 надёжности (точности) достижения поставленной цели управления. Для устранения отмеченного недостатка ННС используется разработанный инструментарий оптимизатор баз знаний (ОБЗ) на мягких вычислениях, позволяющий устранить отмеченные недостатки. Использование ОБЗ приводит к повышению уровня робастности структуры ИСУ. В рассмотренной структуре новой версии ОБЗ, даётся описание основных особенностей функциональной работы, этапов процессов технологии проектирования робастных БЗ НР и приводятся рекомендации по развитию и эффективному применению ОБЗ в процессах проектирования робастных БЗ, позволяющие повысить эффективность функционирования ИСУ в условиях неопределённости изменения ситуации управления.

Одной из основных проблем эффективного применения технологии мягких вычислений в задачах управления являлось разработка инструментария для решение следующих задач:

- объективное определение вида ФП и ее параметров в продукционных правилах в БЗ;
- определение оптимальной структуры нечетких нейронных сетей (ННС) 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 при наличии дискретных ограничений на параметры ОУ.

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе ОБЗ с применением технологии мягких вычислений.

Анализ структур представленный в приложении 2, существующих систем автоматического управления, 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, гарантируя определённый (минимально гарантированный) уровень робастности. Используя физический закон управления, связывающий эти критерии качества управления, можно разрабатывать ИСУ, удовлетворяющие указанным критериям качества управления.

За счёт введения и взаимодействия ГООС и ГИОС реализован принцип не разрушения нижнего уровня управления в соответствии с иерархией (приоритетом) уровней качества управления. Тем самым было определено узкое место в структуре ИСУ, которым является процесс формирования и проектирования БЗ НР. Для решения данной задачи С.В. Ульяновым была разработана технология проектирования БЗ под обоснованную единую структуру ИСУ [104, 115].

Как видно в Таблицы П2.1 (позиция 5) представлены достоинства данного структурного уровня ИСУ заключаются в том, что ГИОС позволяет осуществить построение базы знаний нечеткого регулятора на основе объективного извлечения знаний из динамического поведения ОУ и самого нечеткого регулятора. При этом за счёт использования соответствующей функции пригодности генетического алгоритма (типа скорости производства энтропии, как физического критерия оптимизации и т.д.) появляется возможность оптимизировать структуру самой БЗ.

ГИОС даёт 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 счёт 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.

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. С помощью случайного поиска и методологии естественного отбора (на основе ГА) были промоделированы различные варианты робастных БЗ [98, 124, 125, 128]. Сформированные робастные БЗ позволяют осуществлять управление сложными ОУ в условиях неопределенности информации о внешних возмущениях на ОУ и изменениях задающих сигналов (целей управления).

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. Робастность ИСУ, полученная на основе такого подхода, требует минимума исходной информации, как о поведении ОУ, так и о внешних возмущениях.

2.3. Структура и основные функции инструментария на мягких вычислениях

Оптимизатор баз знаний на мягких вычислениях является новым эффективным программным инструментарием построения БЗ робастных ИСУ с использованием новых критериев оптимизации (в виде новых типов функций пригодности ГА).

Используются термодинамические и информационно - энтропийные критерии, представленные в таблице 2.1.

ОБЗ состоит из взаимосвязанных генетических алгоритмов ($ГА_1$, $ГА_2$, $ГА_3$) или многокритериального генетического алгоритма, оптимизирующего отдельные компоненты БЗ. Структура и шаги оптимизации представлены на рис. 2.2. [127].

В таблице 2.1 представлены функции пригодности (ФП) для трех ГА алгоритмов, использующихся в ОБЗ. Каждая ФП представляет соответствующий критерий. В таблице описывается также роль выбранной ФП на данном шаге вычисления.

Входом ОБЗ является ОС, который может быть получен либо на этапе стохастического моделирования поведения ОУ (с использованием его математической модели), либо экспериментально, т.е. непосредственно из измерений динамических

параметров физической модели ОУ. Для этого был разработан и апробирован ГА работающий в режиме реального времени на автономной бортовой системе [127].

Специфицируем шаги разработанного алгоритма оптимизации:

Шаг 1: Выбор модели нечеткого вывода. Пользователь определяет тип нечеткой модели вывода (Сугено, Мамдани, и т.д.), и число входных и выходных переменных. При этом, архитектура нечеткого вывода разрабатывалась совместно с автором и представлена в [183].

Шаг 2: Создание лингвистических переменных. С помощью ГА₁ определяется оптимальное число функций принадлежности для каждой входной лингвистической переменной, а также выбирается оптимальная форма представления ее функций принадлежности (треугольная, гауссова и т.д.).

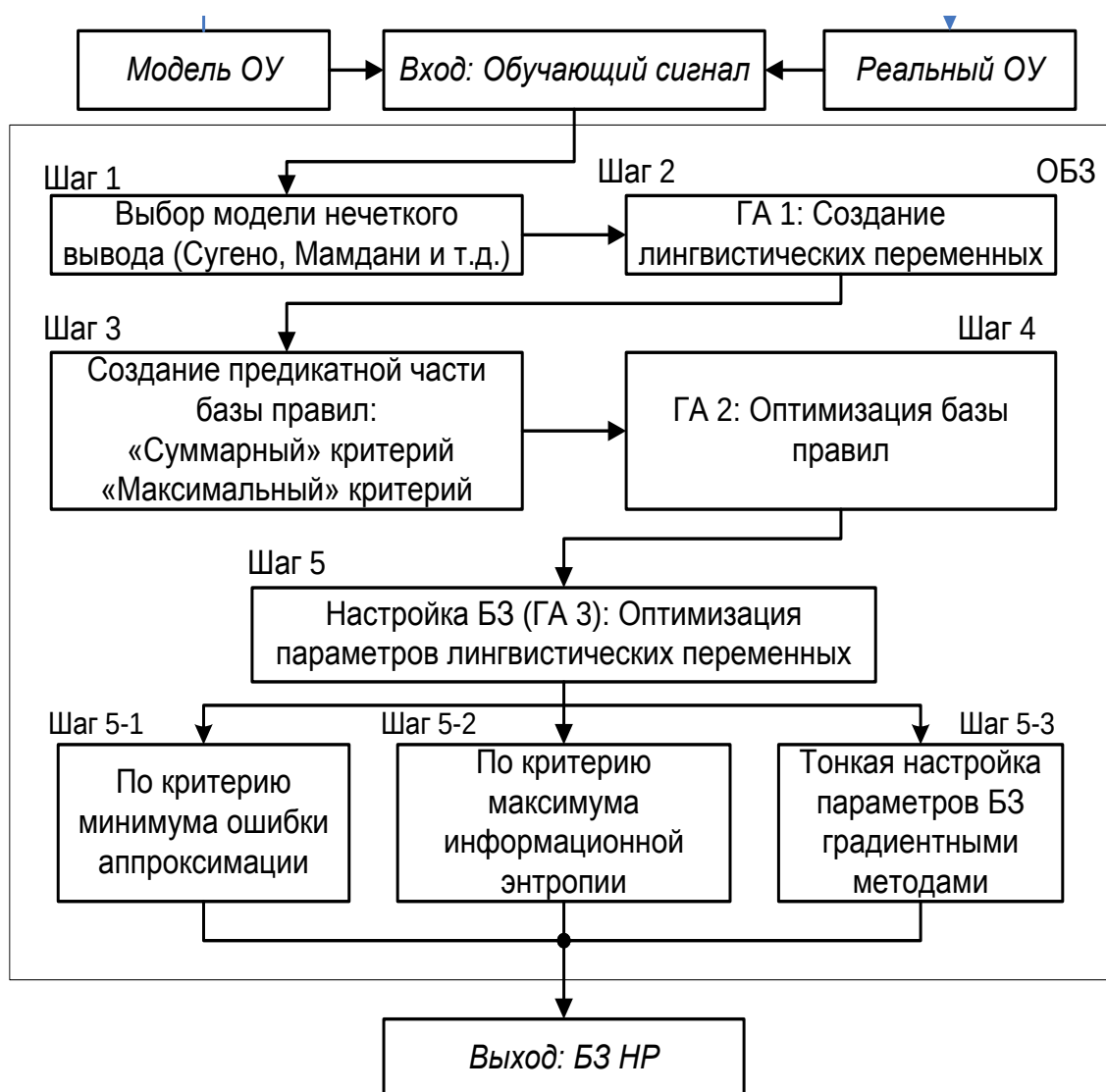


Рис. 2.2. Структура ОБЗ и шаги оптимизации БЗ

Таблица 2.1. Типы и роль функции пригодности ГА в ОБЗ [141]

Тип ГА	Критерии	ФП	Роль ФП
ГА₁: Оптимизация лингвистических переменных	Максимум совместной информационной энтропии.	$H^{(j,l)}_{x_i x_k} = H\left(x_i \middle x_i = \mu^j_{x_i}, x_k = \mu^l_{x_k}\right) = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left[\mu^j_{x_i}(x_i(t)) * \mu^l_{x_k}(x_k(t)) \right] \log \left[\mu^j_{x_i}(x_i(t)) * \mu^l_{x_k}(x_k(t)) \right]$ где * – выбранная операция нечеткой конъюнкции	Выбор оптимальной мощности терм-множеств лингвистических переменных компонент ОС
	Минимум информации о сигналах в отдельности	$H^j_{x_i} = -p^j_{x_i} \log(p^j_{x_i}) = -p\left(x_i \middle x_i = \mu^j_{x_i}\right) \log \left[p\left(x_i \middle x_i = \mu^j_{x_i}\right) \right] = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mu^j_{x_i}(x_i(t)) \log \left[\mu^j_{x_i}(x_i(t)) \right]$	Устранение избыточности ОС
ГА₂: Оптимизация базы правил	Минимум ошибки аппроксимации	$E = \sum_p E^p, \text{ где } E^p = 1 / 2(F(x_1^p, x_2^p, \dots, x_n^p) - d^p)^2$	Выбор оптимальных параметров правых частей правил
ГА₃: Настройка БЗ	Минимум ошибки аппроксимации или максимум совместной информационной энтропии	$E = \sum_p E^p$	«Тонкая» настройка параметров функций принадлежности

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

1) «суммарный» критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют следующему условию: $R_{total_fs}^l \geq TL$, где TL (*threshold level*) – заданный (вручную или выбранный автоматически) уровень активации правила, и

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

$$R_{fs}^l(t_k) = \prod \left[\mu_{j1}^l(x_1(t_k)), \mu_{j2}^l(x_2(t_k)), \dots, \mu_{jn}^l(x_n(t_k)) \right],$$

где t_k – моменты времени, $k = 1, \dots, N$, N равно числу точек в управляющем сигнале;

$\mu_{jk}^l(x_k), k = 1, \dots, n$ – функции принадлежности входных переменных, l – индекс правила в БЗ; символ «П» обозначает операцию нечеткой конъюнкции (в частности, может интерпретироваться как произведение).

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

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

Шаг 4: Оптимизация базы правил. С помощью ГА₂ оптимизируются правые части правил БЗ, определенной на шаге 3. На данном этапе находится решение, близкое к глобальному оптимуму (минимум ошибки аппроксимации ОС). С помощью следующего шага это решение может быть локально улучшено.

Шаг 5: Настройка базы правил. С помощью 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 (шаги 5-1, 5-2 на рис. 2.2). На данном этапе имеется также возможность настройки БЗ с помощью традиционного метода обратного распространения ошибки (см. шаг 5-3 на рис. 2.2). Важной инженерной особенностью 5 этапа является возможность использования подключения к реальному объекту управления и настройке БЗ в режиме реального времени [98].

Результатом аппроксимации ОС является построенная БЗ НР (база знаний нечеткого регулятора), включающая множество правил и оптимально сформированные параметры функции принадлежности входных и выходных переменных НР. Общая архитектура ОБЗ представлена на рис. 2.3 [141].

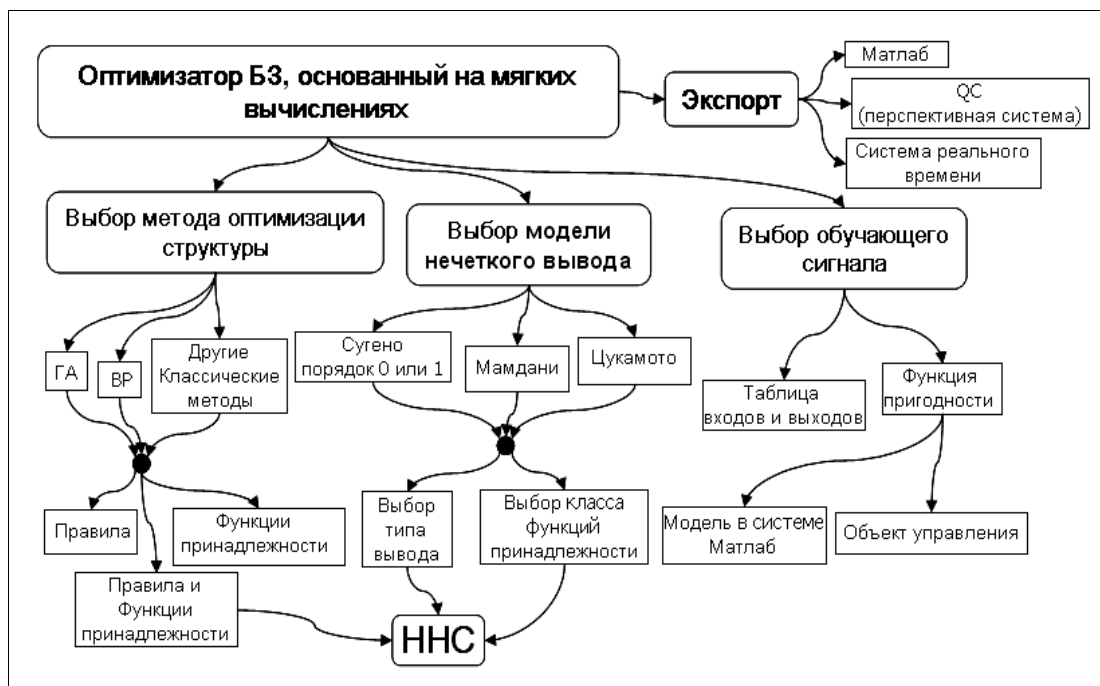


Рис. 2.3. Архитектура ОБЗ

Построенные БЗ ИСУ тестируются с точки зрения робастности и качества управления. Для дальнейшего использования выбирается функционально наилучшая БЗ, которая апробируется в режиме функционирования в реальном времени.

Этап 3. Разработанный на этапе 2 НР тестируется с помощью системы моделирования движения ОУ (или в реальном приложении). Если результаты тестирования удовлетворяют требованиям качества проектирования, то разработанный НР может использоваться в режиме реального времени. Если результаты моделирования не удовлетворительны, этапы 0-3 должны быть повторены с другими ФП в ГА в таком случае в ФП следует использовать как косвенные, так и прямые показатели качества управления, например, скорость становления заданного уровня показателя системы или уровень перерегулирования и т.д.

2.4. Структура квантовых вычислений и квантового алгоритма самоорганизации

Разработанный метод проектирования ИСУ на основе мягких вычислений также имеет свои ограничения по достижению глобальной робастности, которые будут представлены в главе 3. Это заставляет вводить новые методы и виды вычислений (квантовые вычисления и квантовый нечеткий вывод) в инструментарий – «Квантовый оптимизатор». Далее будет рассмотрена технология квантовых вычислений применительно к процессу проектирования интеллектуальных систем управления.

В теории квантовых вычислений можно выделить два направления исследований [145]:

- 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. В данной диссертации используется возможность эффективного моделирования КА на классическом компьютере описанная в [28, 69].

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:

$$|\psi_{fin}\rangle = U|\psi_{in}\rangle, \quad (2.1)$$

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

На рис. 2.4 показана типовая структура КА [139].

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 $|\psi_{fin}\rangle$.

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*) и составляют основу структур КА.

В общем виде структура КАЯ может быть представлена в виде:

$$\text{КАЯ} = \left[\left(\text{Int} \otimes^n I \right) \cdot U_F \right]^{h+1} \cdot \left[{}^n H \otimes {}^m S \right], \quad (2.2)$$

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

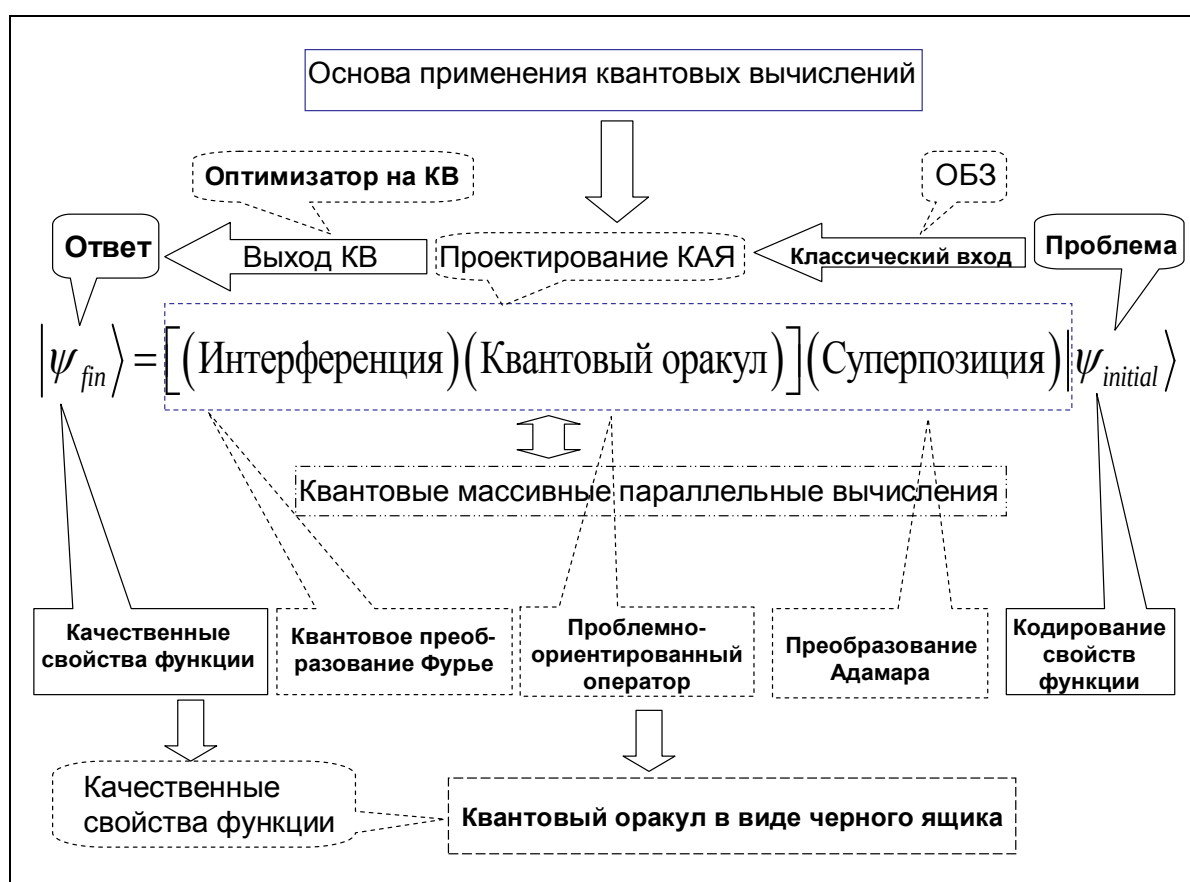


Рис. 2.4. Обобщенная структура КА

Одной из особенностей процесса проектирования (рис. 2.4) является выбор типа

оператора U_F , физически описывающий тип квантовой корреляции и закодированные в суперпозиции качественные свойства исследуемой функции.

Работа квантовых операторов осуществляется в итеративном режиме в зависимости от типа КА. При этом для общего случая предполагается, что определённые 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 не разрешимых (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: $A \otimes \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \times a & A \times b \\ A \times c & A \times d \end{pmatrix}$ имеет следующие свойства:

$$\begin{aligned} (a) \text{ Ранг}(A \otimes B) &= \text{Ранг}(A) + \text{Ранг}(B); \\ (b) \text{ Размерность}(A \otimes B) &= \text{Размерность}(A) \times \text{Размерность}(B) \end{aligned} \quad (2.3)$$

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.

2.5. Особенности применения квантовых алгоритмов в задачах интеллектуального робастного 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 [102, 103].

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 рис. 2.5 [144].

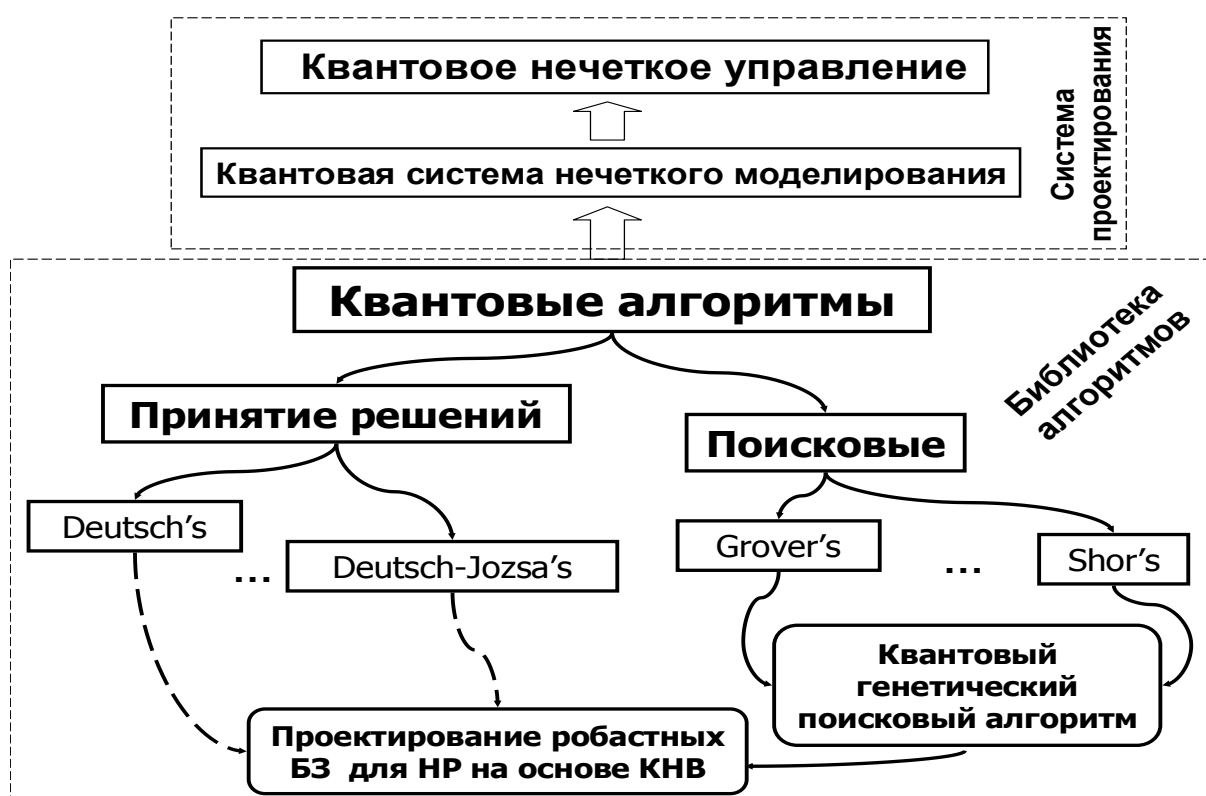


Рис. 2.5. Классификация квантовых алгоритмов

Аналогии между мягкими и квантовыми вычислениями приведены на рис. 2.6 [144].



Рис. 2.6. Аналогии мягких и квантовых вычислений

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.

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.

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. 2.7 приведено сравнение операторов ГА и КА [144].

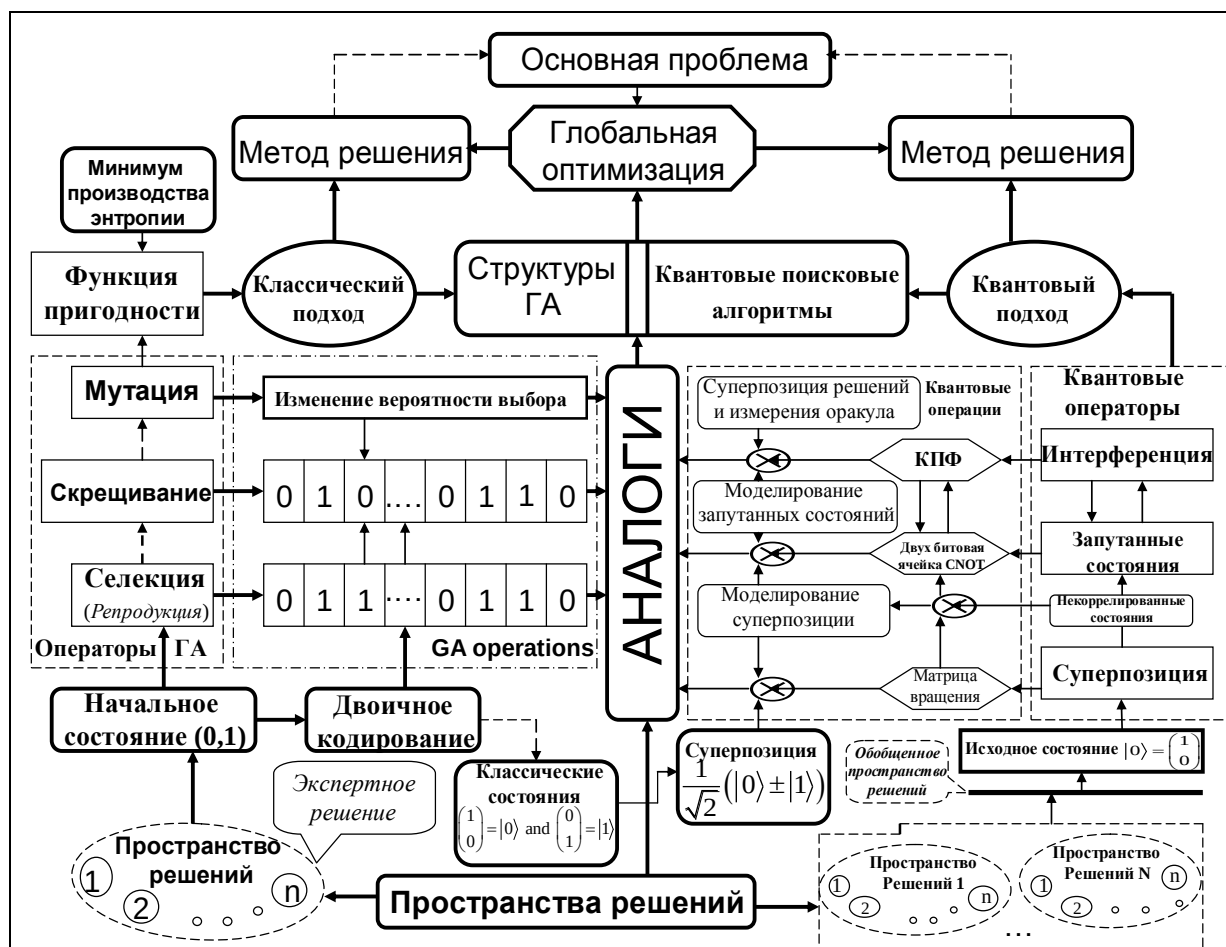


Рис. 2.7. Сравнение структур ГА и КА (КПФ – квантовое преобразование Фурье)

Из функциональной структуры ГА на рис. 2.7 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.

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 задач.

Структурно КА базируется на основных квантовых операторах теории квантовых вычислений: суперпозиции классических состояний; операторе формирования запутанных состояний (или квантовый оракул); интерференции, а также (классических необратимых) измерениях.

На рис. 2.6 и 2.8 дано качественное сравнение структур КА и алгоритма самоорганизации, позволяющее наглядно представить квантовую природу алгоритма самоорганизации [140].

Прежде всего, отметим некоторые особенности КА.

Рис. 2.8 показывает обобщенную структуру КА в теории квантовых вычислений. Согласно теории КА, на первом этапе искомые качественные свойства исследуемой функции кодируются в виде волновой функции, а оракул позволяет найти искомые свойства. Поэтому на рис. 2.8 обозначен квантовый оператор, осуществляющий данный поиск. Вид оператора оракула определяет тип КА (поисковый или принятия решений).

Проектирование квантовой алгоритмической ячейки (КАЯ) позволяет включить описание и действие различных видов квантовых операторов КА в одну ячейку и реализовать модели квантовых вычислений на классическом компьютере. В общем виде



Рис. 2.8. Структура и функциональные связи квантового алгоритма управления самоорганизацией

Модель квантовых вычислений состоит из пяти этапов: (1) приготовление начального (классического или квантового) состояния $|\psi_{in}\rangle$; (2) выполнение преобразования Адамара для начального состояния с целью подготовки состояния суперпозиции; (3) применение запутанного оператора или оператора квантовой корреляции (квантового оракула) к суперпозиционному состоянию; (4) исполнение оператора интерференции; (5) использование оператора измерения для извлечения результатов квантовых вычислений $|\psi_{fin}\rangle$ и $|\psi_{fin}\rangle = H|\psi_{in}\rangle$, где H - Гамильтониан системы.

КА составляют физически обоснованный базис не только техники ускорения вычислений (за счет использования техники массивных параллельных вычислений), но и для поиска решений сложных проблем. В этом случае эффективно используются такие квантовые законы, как суперпозиция для расширения пространства возможных решений, квантовый массивный параллелизм процессов вычислений для ускорения поиска решений и конструктивная квантовая интерференция с целью извлечения искомого решения.

Дополнительно к отмеченным вычислительным ресурсам квантовая корреляция рассматривается как новый физический вычислительный ресурс, позволяющий резко

увеличить успешный поиск решений алгоритмически неразрешимых проблем, ранее не рассматриваемых в классической области вычислений. Данный формализм может быть выражен на языке квантовых состояний или операторных преобразований, но интересна также возможность адекватного описания на языке логического вывода квантовых состояний и эффектов: применение традиционного формализма, его мощности и выразительности как квантовой системы нечёткого логического вывода.

Работа квантовых операторов обозначена выносками на рис. 2.8 и осуществляется в итеративном режиме в зависимости от типа КА.

Рассмотрим теперь особенности КА управления самоорганизацией, представленного на рис. 2.8. С точки зрения теории квантовых вычислений, КА управления самоорганизацией включает все необходимые операторы (действие операторов справа налево) и содержит следующие этапы и особенности (см., рис. 2.8): (1) приготовление состояния суперпозиции; (2) выбор типа квантовой корреляции; (3) применение оператора квантового оракула (модель «черного ящика»); (4) передача извлеченной информации (динамическая эволюция «интеллектуального» состояния сигнала управления по критерию минимума информационной энтропии); (5) квантовая корреляция выше классической корреляции и рассматривается как дополнительный ресурс КА; (6) применение оператора конструктивной интерференции используется для извлечения искомого (найденного) решения; (7) применяется эффект квантовых массивных параллельных вычислений; (8) используется усиление амплитуды вероятности искомого решения; и осуществляется решение классической алгоритмически не решаемой задачи на основе применения эффективных квантовых стратегий принятия решений.

Выбор и определение (типа и вида) квантовой корреляции зависит от класса нелинейности объекта управления (ОУ). Ниже рассмотрены вопросы вычисления «интеллектуального» состояния сигнала управления по критерию минимума информационной энтропии Шеннона.

Математическая модель самоорганизации знаний описывается в виде следующего КА:

$$\begin{aligned}
 & \underbrace{\left| \text{Конечное состояние (законы управления)} \right\rangle}_{\text{Самоорганизация робастной структуры БЗ}} \\
 &= \left[\underbrace{\left(\text{Эволюция процесса} \right)}_{\text{Квантовый случайный поиск}} \bullet \left(\begin{array}{c} \text{Квантовые} \\ \text{вычисления} \end{array} \right) \bullet \underbrace{\left(\begin{array}{c} \text{Проблемная ориентация} \\ \text{(Тип корреляции)} \end{array} \right)}_{\text{Классическая, квантовая, смешанная}} \right] \\
 & \underbrace{\left\{ \begin{array}{c} \text{"Строительные" блоки} \\ \left| \text{Начальное состояние} \right\rangle \\ \text{Био-инспирированные состояния} \end{array} \right\}} \bullet \left(\begin{array}{c} \text{Воспроизводится ОБЗ} \\ \text{на мягких вычислениях} \end{array} \right) \quad (2.4)
 \end{aligned}$$

В (2.4) обозначение $\bullet$ означает применение соответствующего инструментария или операции.

На первом этапе алгоритма (2.4) с помощью ОБЗ на мягких вычислениях создаются «строительные» блоки самоорганизации знаний на основе ГА в виде законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД - регулятора на основе продукционных правил БЗ. Полученные траектории законов управления рассматриваются как классические состояния – хаотические пути интеллектуального коллективного движения частиц в «толпе» – с информационным взаимодействием (swarm intelligence). Такое описание является одним из эффективных методов алгоритмизации квантовых моделей описания коллективного поведения частиц (swarm method of collective particle behavior).

При определенных предположениях swarm method имеет вычислительную сложность алгоритма моделирования динамики коллективного взаимодействия частиц с линейной зависимостью от числа частиц, что дает большие преимущества при ограничениях на память и время моделировании.

Рассмотрим без потери общности простой случай двух траекторий законов управления коэффициентов усиления, траектории которых принадлежат множествам S_1 и S_2 .

Согласно (2.4), суперпозиция классических состояний на множестве $S = S_1 \cap S_2$ образует единое квантовое состояние в виде

$$\left| \psi_s \right\rangle = \sum_j \lambda_j \left| \psi_{S_1}^j \right\rangle \otimes \left| \psi_{S_2}^j \right\rangle, \quad (2.5)$$

где $\left| \psi_{S_1}^1 \right\rangle, \left| \psi_{S_1}^2 \right\rangle, \dots, \left| \psi_{S_2}^1 \right\rangle, \left| \psi_{S_2}^2 \right\rangle$ образуют ортонормированный вычислительный базис в

пространстве состояний S_1 и S_2 соответственно.

Физически (2.5) рассматривается как одно состояние, в котором запутанные состояния (entanglement) формируются из процесса движения частиц вдоль классических траекторий за счет информационного обмена.

Рис. 2.9 показывает процесс обмена информацией по квантовым каналам связи между частицами на траекториях $A_{\text{вх}} \in S_1$ и $B_{\text{вх}} \in S_2$ [101].

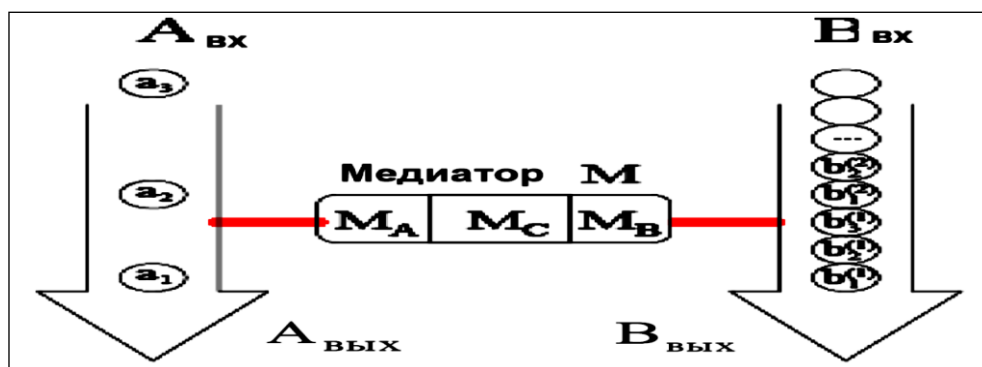


Рис.2.9. Процесс обмена информацией по квантовым каналам связи

Здесь медиатор M является составным квантовым объектом с конечной размерностью памяти d_M , объединяющим три подсистемы M_A, M_B и M_C с помощью Гамильтониана H . Медиатор M является эффективным каналом, который соединяет две различные части – источник сообщения A и получателя информации B . При этом источник сообщений поддерживается квантовым регистром A и B , соответственно. Квантовый регистр имеет частично упорядоченную память $a_1, a_2, \dots$. Источник A посылает сообщение B , которое хранится в квантовой памяти $a_1, a_2, \dots, a_n$ связанной с подсистемой M_A медиатора M ; каждый элемент памяти контактирует с M_A один раз следуя установленному на рис. 2.8 порядку (указано стрелой, т.е. первый a_1 , затем a_2 и т.д.).

Получатель B , получив сообщение от A , формирует память b с помощью соответствующего состояния $|v\rangle$ и объединяется с подсистемой M_B медиатора M , следуя порядку указанному на рис. 2.9. $A_{\text{вх}}, B_{\text{вх}}$ означают входные порты устройств, используемые A и B для передачи кубитов при контакте с M . Аналогично, $A_{\text{вых}}$ и $B_{\text{вых}}$ означают выходные порты, из которых формируются кубиты после контакта с медиатором M . Показано, что

состояние $|v\rangle$ такого квантового канала связи образует единое квантовое состояние с медиатором, а частным следом матрицы плотности $|v\rangle\langle v|$ (совместно с матрицами плотности источника **A** и получателя **B**) является суперпозиция (2.5) в виде декомпозиции Шмидта в вычислительном базисе $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. При этом, в квантовой теории информации по квантовым каналам связи осуществляется передача суперпозиции сигналов (2.5) с сохранением различных видов корреляции между агентами.

В теории квантовых вычислений процесс вычислений начинается с действия оператора эволюции U_f на «начальное состояние» $|00\dots 0\rangle$ в виде $U_f = \otimes U_{f(i)}$, унитарного обобщенного преобразования Уолша - Адамара, где

$$U_{f(i)} = \begin{pmatrix} \sqrt{f(i)} & -\sqrt{1-f(i)} \\ \sqrt{1-f(i)} & \sqrt{f(i)} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

и $\sqrt{f(i)}$ определяет амплитуду вероятности i -го классического состояния в квантовой суперпозиции.

В результате для (2.5) имеем $U_f |00\dots 0\rangle = |s_f\rangle$, где $|s_f\rangle$ определяет состояние суперпозиции из конечного числа классических состояний.

Таким образом, каждый оператор $U_{f(i)}$ отображает отдельный квантовый бит из начального состояния в смешанное состояние суперпозиции с заданной вероятностью состояния $f(i)$. Геометрической интерпретацией оператора $U_{f(i)}$ является сфера Блоха с вращением вокруг оси u на угол

$$\theta_i = 2 \arcsin(\sqrt{f(i)}).$$

С помощью применения преобразования Уолша-Адамара организуется процесс формирования скрытой (ненаблюдаемой) смешанной корреляции в суперпозиции сигналов из двух классических БЗ НР. Запутанные состояния (квантовая корреляция) моделируются квантовым оракулом, который может определить максимальную амплитуду вероятности на множестве соответствующих классических суперпозиционных состояний.

Существование и влияние типа квантовой корреляции на формирование самоорганизующейся структуры являются экспериментально установленными фактами, которые учитываются в блоке «Тип корреляции» КА на основе модели обмена информацией по квантовым каналам связи, представленной на рис. 2.9.

По максимуму амплитуды вероятности (минимум информационной энтропии Шеннона) из «интеллектуального» состояния (см., ниже рис. 2.10 [104]) извлекается корреляционное информативное состояние с помощью оператора интерференции (в виде оператора идентичности) совместно с процедурой классического измерения (наблюдения).

В процессе эволюции самоорганизации достигается сбалансированное соотношение между используемым и потенциальным ресурсами эволюции (информационно-термодинамического) поведения динамической системы.

Задача проектирования свойства робастности (как самостоятельного свойства самоорганизации) ИСУ подробно изучена на основе новых видов ИВ, таких как мягкие и квантовые вычисления. Предложена модель КА самоорганизации ИСУ, базирующаяся на принципах минимума информационной энтропии (в «интеллектуальном» состоянии сигналов управления) и обобщенной термодинамической мере производства энтропии (в системе «объект управления + регулятор»). Основным результатом применения процесса самоорганизации является приобретение необходимого уровня робастности и свойства гибкости (адаптивности) воспроизводимой структуры.

Отмечено, что свойство робастности (по своей физической природе) выступает составной частью самоорганизации, а требуемый уровень робастности ИСУ достигается за счет выполнения отмеченного выше принципа минимума производства обобщенной энтропии. Принцип минимума производства энтропии в ОУ и системе управления служит физическим принципом оптимального функционирования с минимальным расходом полезной работы и лежит в основе разработки робастной ИСУ.

Данное утверждение базируется на том, что для общего случая управления динамическими объектами оптимальное решение конечной вариационной проблемы определения максимума полезной работы W эквивалентно решению конечной вариационной проблемы нахождения минимума производства энтропии S . Таким образом, исследование условия максимума функционала $\max_{q_i, u}(W)$ (где q_i, u – обобщенные координаты ОУ и сигнал управления соответственно) эквивалентно исследованию ассоциированной проблемы минимума производства энтропии, т.е. $\min_{q_i, u}(S)$.

Надежное функционирование естественных самоорганизующихся систем обеспечивается путем использования их отдельных свойств, комбинации указанных подходов и алгоритмического формирования комплекса свойств в изменяющихся или непредвиденных условиях. В данной работе свойство робастности БЗ достигается путем применения КА проектирования самоорганизации в процессе интеллектуального

управления, что отражено схематично на рис. 2.11 [102].

Следовательно, в разработанной модели КА используемый принцип минимума информационной энтропии гарантирует необходимое условие самоорганизации – минимум требуемой исходной информации в сигналах обучения.

Термодинамический критерий минимума новой меры обобщенного производства энтропии обеспечивает достаточное условие самоорганизации – робастность процессов управления с минимальным расходом полезного ресурса.

В природных системах искомое свойство робастности, как показано ранее, закодировано в алгоритме воспроизводства процесса самоорганизации. Поэтому такие системы могут автономно справиться с непредвиденным событием, привлекая различные (но близкие по идее) подходы: 1) адаптация (обучение, эволюция), в рамках которой система корректирует свое поведение, чтобы справиться с изменением событий; 2) упреждение (когнитивность), проявляющаяся в том, что система может «предсказать» изменения ситуации и уточнить свое поведение (это свойство выступает специальным случаем адаптации и не требует от системы оценки ситуации до ее возникновения); 3) робастность, состоящая в том, что система способна функционировать и достигать цели при возникновении непредвиденных возмущений определенного вида. Данное свойство в природных системах достигается на основе модульности, вырождения, распределенности или за счет наличия избыточности.

Программно КА встроен в структуру ИСУ для реализации требуемого свойства самоорганизации. На рис. 2.11 показаны иерархические уровни процесса проектирования с применением КА, взаимосвязи и взаимоотношения перечисленных свойств самоорганизации робастных БЗ. Из уровней, представленных на рис. 2.11, подробно рассмотрены уровни 3 (физическая модель и цель процесса управления самоорганизацией, а также физическая интерпретация основных операторов КА управления самоорганизацией БЗ) и 2 (динамика эволюционного процесса самоорганизации).

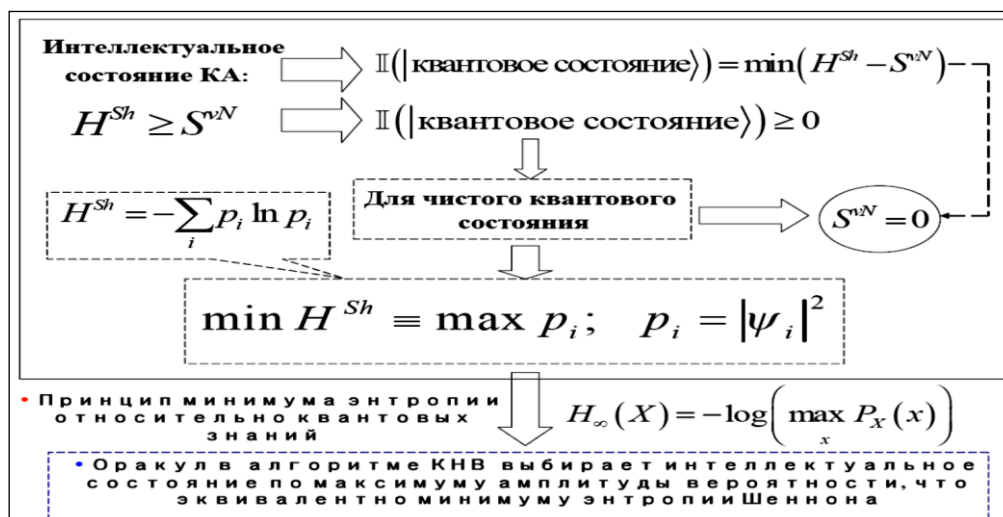


Рис. 2.10. Проектирование качества робастного управления:
выбор «интеллектуального» квантового состояния



Рис.2.11. Иерархическая структура КА проектирования самоорганизации робастных БЗ в ИСУ (ПАП – программно-аппаратная поддержка)

Как следует из рис. 2.11 (см., уровень 3), в общем случае непредвиденных ситуаций управления процесс проектирования оптимальной БЗ с использованием информационно-термодинамических критериев гарантирует инвариантное достижение цели управления с

помощью КА самоорганизации в реальном времени с требуемым уровнем робастности ИСУ. Доказательство существования данного свойства эффективно продемонстрировано ниже на примере решения задачи оптимального многокритериального управления в непредвиденной ситуации. Физически отмеченный факт означает, что поддерживается оптимальное термодинамическое соотношение между устойчивостью, управляемостью и робастностью.

Процесс проектирования робастных БЗ (рис. 2.11) адекватно соответствует упомянутому выше процессу оптимальной поддержки введенного термодинамического соотношения между отмеченными фундаментальными качествами управления (thermodynamics control quality trade-off, полученного как физический критерий самоорганизации). Подчеркнем, что эффект самоорганизации БЗ в ИСУ основан на виртуальном процессе извлечения дополнительной (скрытой) квантовой информации из реакции (на непредвиденную ситуацию) классических сигналов управления на выходе БЗ, спроектированных в условиях обучения, и физически реализуется программным инструментарием.

Программно-аппаратная поддержка (ПАП) показана на рис. 2.11 (уровень 1). В связи с этим, поясним информационные свойства и логические особенности формирования синергетического эффекта самоорганизации, и используемые в программном инструментарии QCOptKBTM, описание которого приведено в Приложении.

Для достижения самоорганизации (уровень 3 на рис. 2.11) в структуре ИСУ необходимо использовать КНВ. Общая функциональная структура блоков КНВ, принципы работы КНВ и его отдельных блоков подробно рассмотрены ниже.

Основными отличиями модели квантового алгоритма управления самоорганизации от биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации являются следующие аспекты: 1) КА управления самоорганизацией описывается как логический процесс использования ценной квантовой информации, извлекаемой из классических состояний, применяя квантовые стратегии принятия решений и факты из квантовой теории информации; 2) содержит выбор типа и вида квантовой корреляции, влияющие на формирование и вид структуры проектируемой системы; 3) структурно КА включает все необходимые качественные особенности и операторы естественной (биологически воспроизводимой) самоорганизации, которые описываются квантовыми операторами теории квантовых вычислений; 4) является новым поисковым КА, с помощью которого возможно решать классические алгоритмически неразрешимые задачи управления; 5) реализуется в реальном времени, используя реакцию классических НР на новую ошибку

управления в непредсказуемой ситуации управления для проектирования робастного интеллектуального управления; 6) поддерживает оптимальное термодинамическое соотношение между устойчивостью, управляемостью и робастностью для проектирования в реальном времени интеллектуальных самоорганизующихся процессов управления.

Следовательно, КА управления самоорганизацией знаний (2.4) содержит физически обоснованные и экспериментально установленные квантовые операторы и относится к новому классу поисковых КА, зависящего от выбора типа и вида проблемной ориентации квантовой корреляции.

Рассмотрим модель КНВ как частный случай КА управления самоорганизацией знаний.

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{Законы управления коэффициентами усиления} \\ \text{гибридного нечеткого ПИД-регулятора} \end{array} \right\} \bullet (\text{Выход}) = \\
 & \quad \text{Самоорганизация робастной структуры БЗ} \\
 & \left[\begin{array}{l} \left(\text{Интерференция} \right) \left[\max \left(\text{Амплитуды вероятностей} \right) \right] \left(\text{Суперпозиция} \right) \bullet \left(\begin{array}{l} \text{Квантовые} \\ \text{вычисления} \end{array} \right) \\ \quad \text{Квантовый случайный поиск} \\ \bullet \left(\begin{array}{l} \text{Проблемная ориентация ОУ} \\ \left(\text{Тип и вид корреляции} \right) \\ \left(\text{Внешняя, внутренняя} \right) \bullet \left(\text{Классическая, квантовая, смешанная} \right) \end{array} \right) \bullet \left(\begin{array}{l} \text{Выбор типа и} \\ \text{вида квантовой} \\ \text{корреляции} \end{array} \right) \\ \quad \text{Формирование качества и глубины представления знаний} \end{array} \right] \\
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{"Строительные" блоки} \\ \left(\text{Начальное состояние} \right) \\ \text{Состояния выходных сигналов НР} \\ \text{на новую ошибку управления} \end{array} \right\} \bullet \left[\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} \text{Реакция продукционных правил} \\ \text{БЗ в НР на мягких вычислениях} \end{array} \right) \bullet \\ \left(\text{Вход} \right) \bullet \left(\begin{array}{l} \text{Ошибка управления} \\ \text{в непредвиденной ситуации} \end{array} \right) \end{array} \right] \quad (2.7)
 \end{aligned}$$

Модель (2.7) описывает математическую структуру КНВ. Поэтому модель КА в КНВ выступает как частный случай обобщенной модели КА самоорганизации, представленной на рис. 2.11 (уровень 3).

2.6. Модель и этапы вычислений квантового алгоритма самоорганизации

На рис. 2.12 показана эквивалентная уравнению (2.7) функциональная структура упрощенной модели КНВ: Формирование суперпозиции и вычисление амплитуд вероятностей показано на рис. 2.13 [139].

В модели КА для КНВ реализуются следующие этапы:

- 1) обрабатываются результаты нечеткого вывода каждого независимого индивидуального НР;
- 2) выбирается тип квантовой корреляции;
- 3) формируется суперпозиция для выбранной квантовой корреляции;
- 4) извлекается ценная квантовая информация, скрытая в независимых индивидуальных БЗ (по принципу минимума энтропии в извлеченных квантовых знаниях – максимальной амплитуды вероятностей «интеллектуального состояния») на основе методов квантовой теории информации;
- 5) в режиме реального времени проектируется обобщенный выходной робастный сигнал управления на множестве БЗ в виде реакций НР на новую ошибку управления.

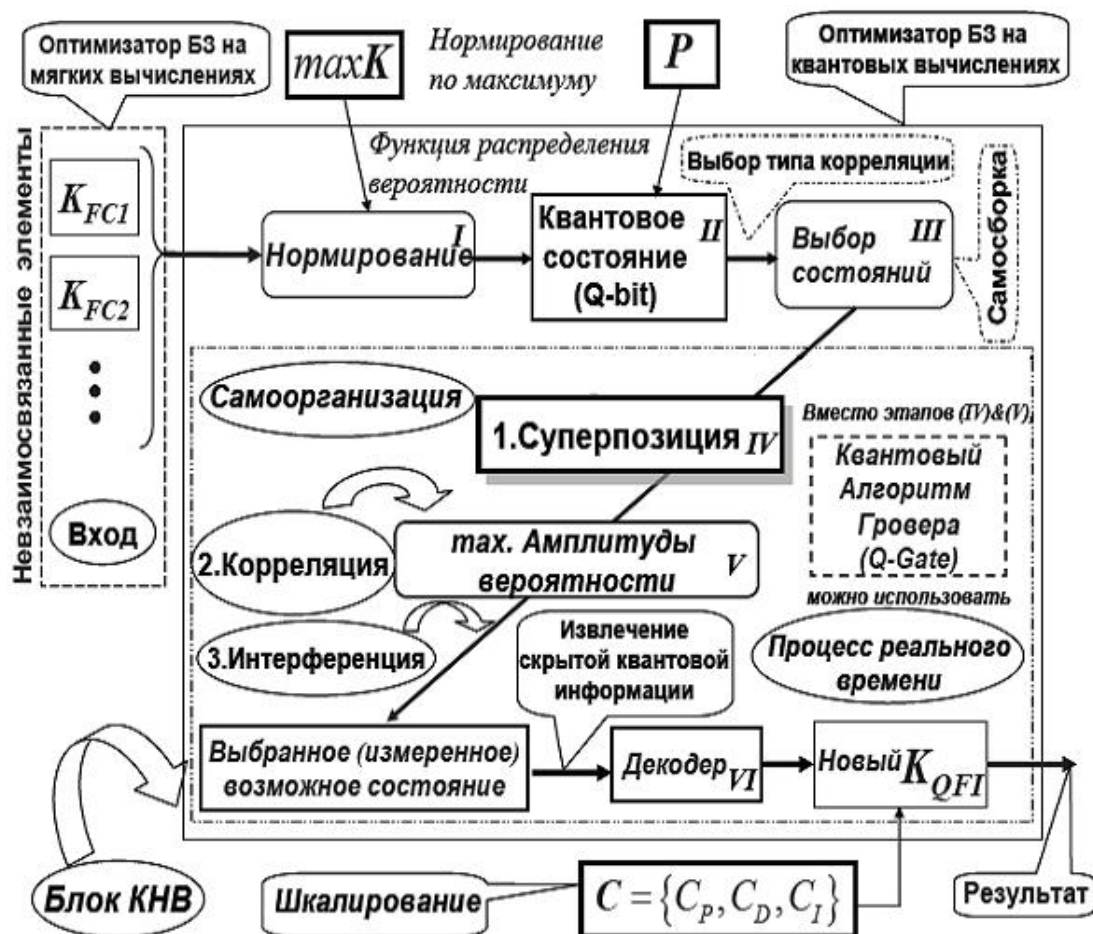


Рис. 2.12. Структурная реализация процесса самоорганизации в модели КНВ:
функциональная структура модели КНВ.

В этом случае выходной сигнал КНВ в режиме реального времени представляет оптимальный сигнал управления изменением коэффициентов усиления нечеткого ПИД-регулятора, который включает в себя необходимые (наилучшие) качественные

характеристики выходных сигналов управления каждого из НР, реализуя тем самым принцип самоорганизации. Качественные особенности синергетического эффекта самоорганизации учитываются в выбранном типе и виде квантовой корреляции.

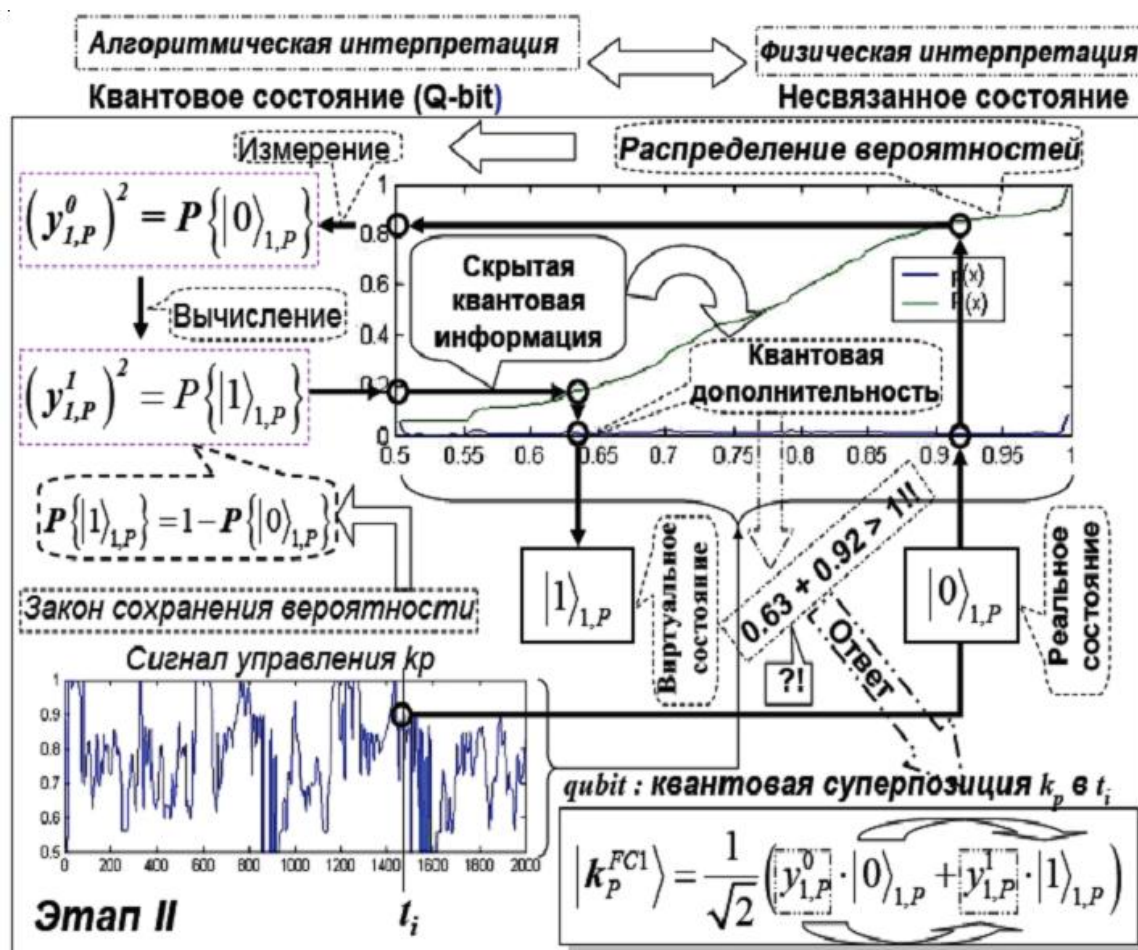


Рис. 2.13. Структурная реализация процесса самоорганизации в модели КНВ: процесс формирования суперпозиции кубита и вычисление амплитуд вероятностей

Физически классическая корреляция отвечает за самоорганизацию структуры на макроуровне; квантовая и смешанная корреляции отвечают за микроуровень и передачу информации с микро - на макроуровни соответственно. С помощью различных типов квантовых корреляций (внутренней, внешней, пространственно, временной и пространственно – временной) осуществляется обмен информацией и координированное управление между коэффициентами усиления проектируемого робастного нечеткого ПИД-регулятора. Подробнее в описании, особенностями проектирования и реализация квантовых регуляторов на классическом процессоре дано в работах [123, 129, 135, 138].

2.7. Перспективы развития программного инструментария

Как отмечалось, за счет интеграции с системой Матлаб, 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.

Таким образом, перспективная информационная технология проектирования структур робастных ИСУ является двухуровневой. Первый уровень основан на ОБЗ, второй - на квантовых вычислениях. Примеры применения инструментариев на мягких и квантовых вычислениях рассмотрены далее в главе 3 диссертационной работы.

Разработанный инструментарий на мягких вычислениях был использован при проектировании робастных ИСУ промышленными ОУ, экспериментальная проверка на реальных ОУ таких как: перевёрнутый физический маятник без математической модели, полуактивная подвеска автомобиля, управление навигацией роботом-мотоциклом, управление двигателем внутреннего сгорания [47, 49, 127] и др. что позволило разработать унифицированный интерфейс подключения реальных объектов управления, который позволяет извлекать, формировать и оптимизировать базы знаний нечетких регуляторов в режиме реального времени [126].

За счет внедрения квантовых эффектов удастся редуцировать избыточную информацию в классических законах управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора. Данный эффект достигается в результате использования новой ценной квантовой информации, которая извлекается из реакций классических нечетких регуляторов на непредвиденную ситуацию управления в реальном времени с помощью новых видов и типов квантовой корреляции. Полученный эффект открывает широкие перспективы инженерного использования разработанного инструментария в практических областях науки и техники.

2.8. Выводы по главе 2

Разработанный программный инструментальный оптимизатор баз знаний на мягких и квантовых вычислениях является основой для разработанной технологии проектирования интеллектуальных систем управления. Причем программный инструментальный включает в себя:

- Вычислительный инструментальный мягких вычисления с системой нечеткого вывода, нечеткой нейронной сетью, многокритериального генетического алгоритма для проектирования баз знаний, программными интерфейсами для подключения реальных объектов управления или комплексов моделирования (Matlab).
- Вычислительный инструментальный на квантовых вычислениях с моделью квантового алгоритма в виде квантового нечеткого вывода, квантовую корреляционную матрицу для проектирования квантовых алгоритмических ячеек, интерфейсом для загрузки гистограмм распределения выходных сигналов нечетких регуляторов.
- Встраиваемые библиотеки на языке программирования С для интеграции в бортовые системы управления автономных роботов.
- Алгоритмы верификации математической модели и реального объекта управления для получения обучающего сигнала.

Использование инструментария на мягких вычислениях позволяет одновременно реализовать процесс проектирования робастных баз знаний на основе алгоритмов обучения и адаптации, реализуя первый этап разработанной информационной технологии проектирования робастных интеллектуальных систем управления.

Разработанная программно – алгоритмическая поддержка реализации квантовых вычислений на классическом процессоре в виде программного инструментария, открывает новые возможности для инженерной практики в частности эффективного применения технологии квантовых мягких вычислений при проектировании интеллектуальных систем управления.

Встроенная в программный комплекс модель квантового нечеткого вывода, как частного случая квантового алгоритма самоорганизации, позволяет вводить принцип самоорганизации баз знаний в процесс проектирования интеллектуальных систем управления и реализовывать квантовые типы вычислений на классическом процессоре бортовой системы автономного робота, что позволяет ввести свойство самоорганизации нечетких регуляторов в структуру встраиваемой интеллектуальной системы управления.

Таким образом, можно заключить, что в рамках описанной в главе 1 проблеме

проектирования были разработаны программные инструментарии позволяющие:

- проектировать робастные базы знаний для нечетких;
- использоваться для получения обучающего сигнала, как реальный физический объект управления, так и его математическую модель;
- проектировать нечеткие регуляторы, на основе физически измеряемого сигнала, что в значительной степени устраняет субъективизм при формировании баз знаний и позволяет проектировать интеллектуальные системы управления без использования математической модели объекта управления;
- повышать робастность автономной встраиваемой интеллектуальной системы управления в нештатных и непредвиденных ситуациях за счет использования квантовых мягких вычислений;
- весть свойство самоорганизации в процесс проектирования интеллектуальной системы управления;
- реализовать квантовые типы вычислений на классическом процессоре бортовой системы автономного робота.

3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ АВТОНОМНЫМ РОБОТОМ НА ОСНОВЕ КВАНТОВЫХ И МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

В данной главе рассматриваются практические вопросы применения описанного в главе 2 инструментария (ОБЗ на мягких и квантовых вычислениях) для проектирования робастных ИСУ на примере динамически неустойчивого ОУ типа «Каретка –маятник». 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 НР с использованием и без использования математической модели.

3.1. Корректность моделей объектов управления 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, и квантовые вычисления в задачах проектирования робастных ИСУ, и рассмотрим подробно роль возникающих мнимых «парадоксов» при их применении в системной интеллектуальной инженерии.

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 обоснования [116].

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 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).

Примером 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 [4, 72, 75]), приводит к логическому переходу в квантовую область процессов измерений и управления на атомно-молекулярном уровне [5, 54].

В свою очередь, происходит неизбежный пересмотр физических основ самой теории управления [69, 90, 116, 145]. 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 [3, 21, 43, 68].

Многие из перечисленных проблем физической теории и систем управления рассматривались ранее [31, 85, 99]. Были рассмотрены конкретные примеры и получены важные выводы о необходимости учета физической природы самого ОУ в структуре и предельных возможностей процессов управления [89, 115, 116, 145]. Роль корректной интерпретации физической и математической моделей эксперимента, 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 [145].

На основе достоверности извлекаемого количества информации определяется информационная оценка приращения риска (статистической корректности) формируемого описания модели ОУ и границ её 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.

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. Данный принцип рассмотрен в работе [135].

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 том, 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 и квантовые вычисления (и их сочетания), рассматриваемые в данной диссертации с точки зрения применения в задачах проектирования робастных БЗ и ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления и информационного риска.

В. Применение новых технологий в инженерной практике, теории и систем управления часто сталкивается с проблемами преодоления инерции «прагматической» инженерной интуиции и философии системной инженерии. Так происходило, например, в начале 70-х прошлого столетия при внедрении в инженерную практику идей мягких вычислений на основе теории нечетких множеств [115] в процессы проектирования нечетких регуляторов и систем управления. Суть возникающих «парадоксов» заключается в физической и логической интерпретации понятия числа, производной и интеграла как исходного базиса моделирования ОУ и проектирования систем управления. Можно пояснить данный факт наглядными примерами, которые позволяют установить причинно-следственные связи и обоснование результатов физической интерпретации возникающих мнимых логических «парадоксов».

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 возможность применения операций не только 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, оперируя 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 квантового алгоритма (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 Дойча [12] (1985г.) определяет данное качество исследуемой функции за один шаг. Алгоритм Шора [56] 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.

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 повышают уровень робастности ИСУ, функционирующих в условиях информационного риска или непредвиденных (нештатных) ситуациях.

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

3.2. Интеллектуальные робастные системы управления на основе оптимизатора баз знаний на мягких вычислениях

Исследование качества управления ПИД-регулятора и НР на основе программного инструментария ОБЗ проводилось с использованием математической модели и реального ОУ. В качестве ОУ использовалась классическая задача теории управления – «каретка –

перевернутый маятник». Данный тип ОУ является типовым (Benchmark) для тестирования программного инструментария робастного интеллектуального управления. Примеры подобных систем представлены на рис. 3.1 [127] и работах [40, 41] и др..



Рис. 3.1. Физические аналоги рассматриваемого ОУ

Управление объектом типа «Каретка – маятник» является одной из типовых задач в теории управления, т.к. решение этой задачи наглядно демонстрирует проверяемое (требуемое) качество САУ. Рассмотрим динамику модели в виде одноосевой каретки (рис. 3.2) [127, 129] с перевёрнутым маятником, закреплённым на оси.

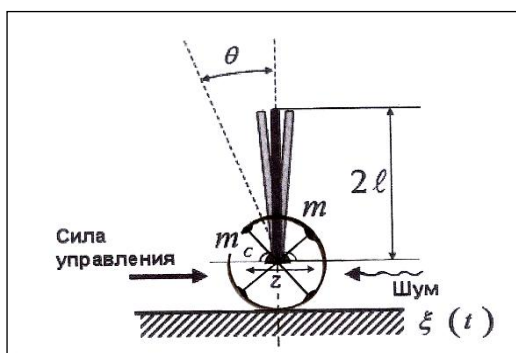


Рис. 3.2. Модель системы «Каретка – маятник»

Динамика этого ОУ описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка (3.1), выводимых, с учетом сил трения и упругости каретки, из баланса моментов и проекций сил на горизонтальную ось Z :

$$\ddot{z} = \frac{u + \xi(t) - a_1 \dot{z} - a_2 z + ml(\dot{\theta}^2 \sin \theta \cos \theta)}{m_n + m}, \quad (3.1)$$

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

Уравнения, для скорости производства энтропии, следующие:

$$\dot{S}_\theta = \frac{k\dot{\theta}^2 + 1/2ml\dot{\theta}^3 \sin 2\theta}{l(m_c + m) \left[\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right]}; \quad \dot{S}_z = \frac{a_1}{m_c + m} \cdot \dot{z}^2; \quad \dot{S}_u = k_d \dot{e}^2. \quad (3.2)$$

В уравнениях (3.1) и (3.2) z и θ – обобщенные координаты; g – ускорение свободного падения (9.8 m/sec^2), m_c – масса тележки, m – перевернутого маятника (называемого «шест»), l – половина длины маятник, k и a_1 коэффициенты трения в z и θ соответственно, a_2 – сила упругости тележки, $\xi(t)$ – 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 поддерживать близким к 0 в условиях изменения условий среды функционирования).

Структура компьютерной модели «Каретка – маятник», выполненная в среде моделирования MatLab/Simulink, представлена на рис. 3.3 [123].

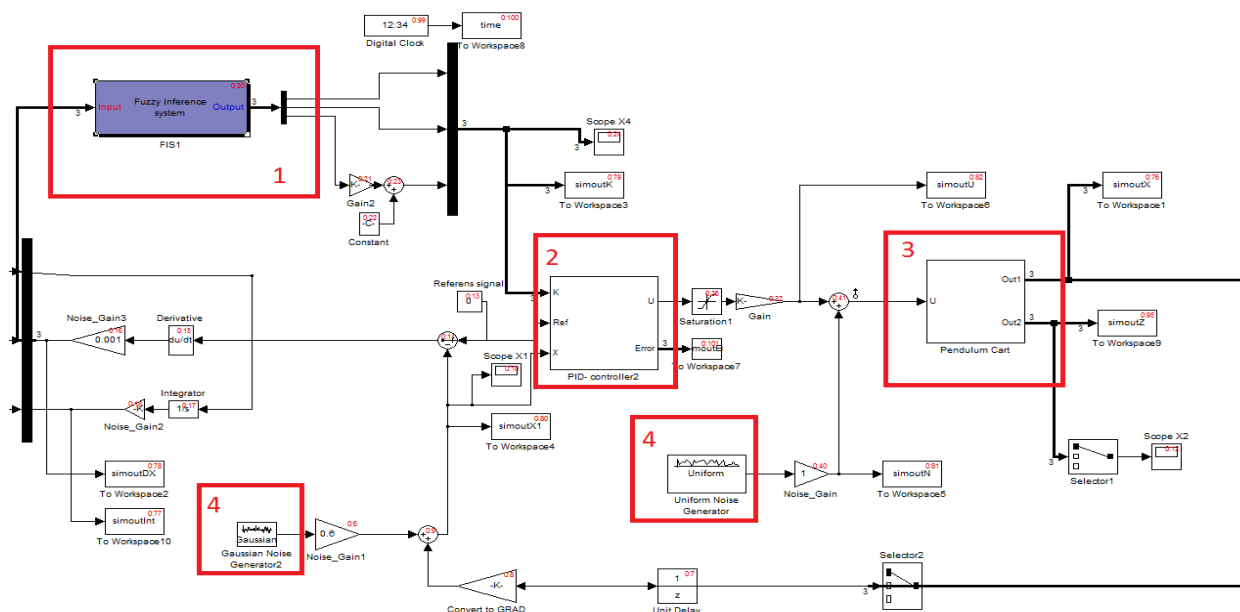


Рис. 3.3. Структура системы моделирования: 1 - блок нечеткого вывода; 2 – ПИД-регулятор; 3 - объект управления; 4 - генераторы шумов

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 соответствии со схемой управления (рис. 3.2) будем использовать ПИД-регулятор в контуре глобальной отрицательной обратной связи и следующее выражение для подсчета управляющего воздействия:

$$u(t) = k_p(t)e(t) + k_i(t) \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d(t)\dot{e}(t) \quad (3.3)$$

В настоящее время это широко распространенный закон управления, используемый в контурах управления с обратной отрицательной связью более чем в 78% технических устройств на производстве и в быту.

Рассмотрим подробнее устройство подобного макета ОУ.

На рис. 3.4 [98] представлен макет используемый для тестирования технологий проектирования ИСАУ с использованием ОБЗ и стенд (рис. 3.5) для проведения экспериментов.

Стенд оборудован различными покрытиями для проведения экспериментов с макетом, в том числе в непредвиденных ситуациях управления, при изменении условий функционирования за счет смены поверхности на которой работает робот. Также на стенде имеется возможность устанавливать определенный начальный угол для запуска макета.

В качестве измерительной системы (рис. 3.4, Sensor) в макете используется плата с

комбинацией датчиков – гироскопа и акселерометра – 5 DoF (пять степеней свободы) IDG500/ADXL335.

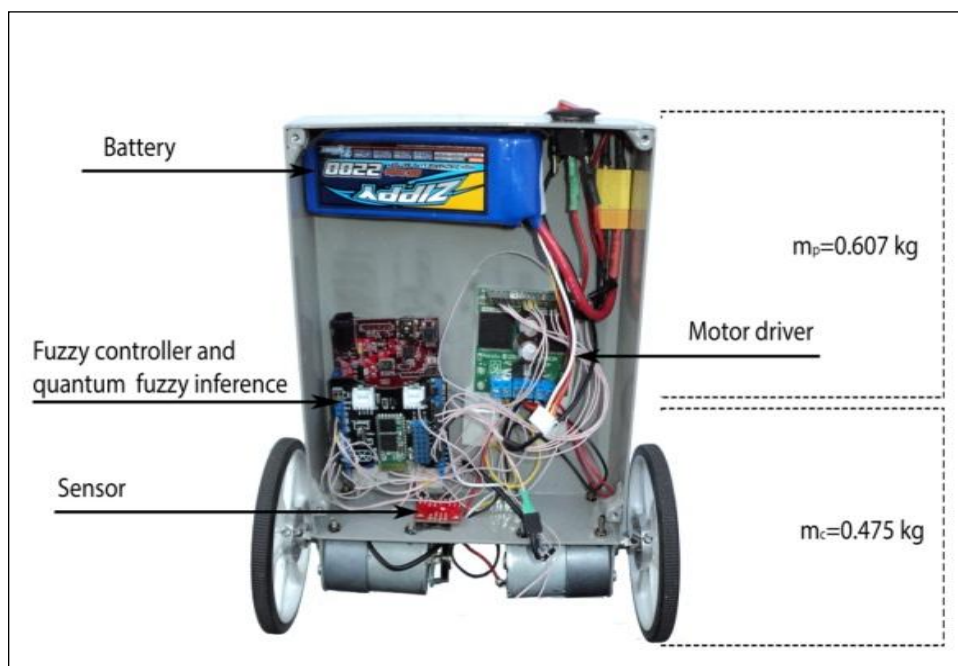


Рис. 3.4. Макет системы «Каретка - маятник»

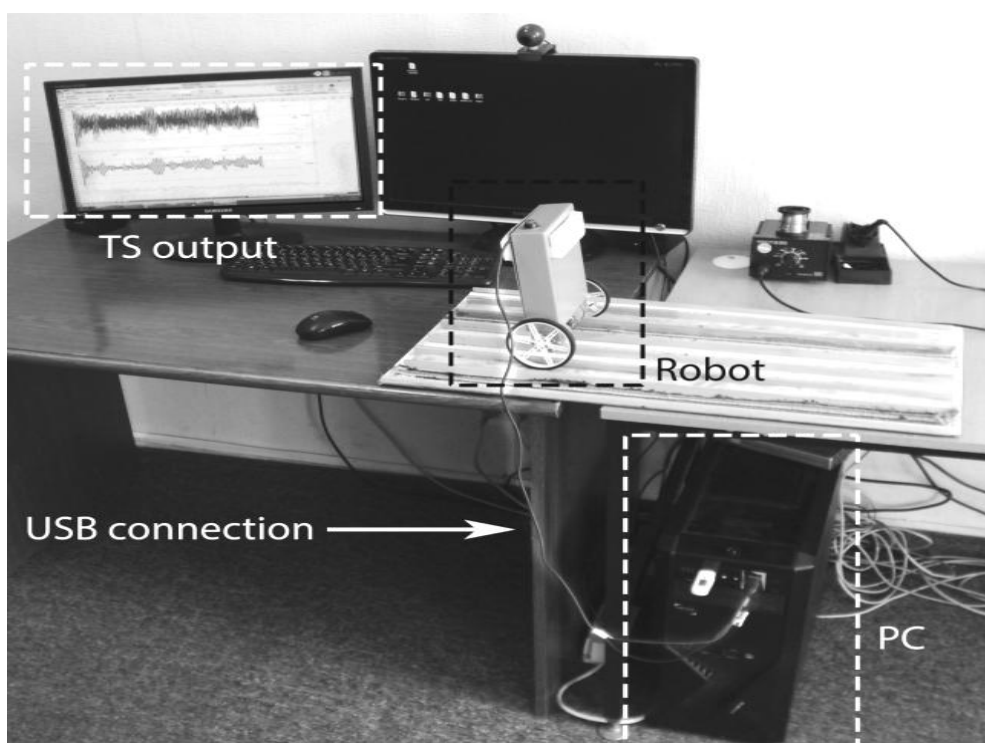


Рис. 3.5. Стенд для проведения экспериментов: TS output – представление обучающего сигнала с модели; Robot – физический макет ОУ; USB connection – кабельное удаленное соединения компьютера и макета; PC – персональный компьютер

Ядром и центральным элементом системы является микроконтроллер компании Microchip® Chipkit 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 [98]. Подключение датчиков осуществляется с использованием аналоговых входов микроконтроллера.

Базовые функции программ макета представлены на рис. 3.6., обобщённо их можно записать в псевдо код: измерение; фильтрация; управление; подсчет времени (задержка).



Рис. 3.6. Алгоритм программы микроконтроллера

Как можно заметить, алгоритм работы макета системы, представленный на рис. 3.6 [123], является частным примером САУ с обратной связью.

3.3. Верификация математической модели и макета автономного робота

Прежде чем приступить к поиску коэффициентов и проектированию ИСУ для макета системы, необходимо верифицировать параметры математической модели (3.1).

В таблице 3.1 [127] представлена классификация определенных и неопределенных параметров.

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).

Таблица 3.1.[127]

Определенные и неопределенные параметры в модели

<i>Хромосома ГА</i>	
Определенные	Неопределенные
Масса маятника	Трение в оси
Масса тележки	Коэффициент упругости тележки
Центр тяжести маятника	Люфт в оси
Ограничения на упр-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).	

Целевая функция алгоритма для верификации может быть основана на дисперсии информации, подаваемой на вход и получаемой на выходе регулятора.

В данной случаи, в качестве функции пригодности применялась функция вида:

$$F(e,u)=\left\{1+\left[\frac{Var(e_{mod})-Var(e_{rob})}{Var(e_{mod})}\right]^2+\left[\frac{Var(ie_{mod})-Var(ie_{rob})}{Var(ie_{mod})}\right]^2+\right. \\ \left.+\left[\frac{Var(u_{mod})-Var(u_{rob})}{Var(u_{mod})}\right]^2\right\}^{-1} \quad (3.4)$$

где $Var(e_{mod})$ – дисперсия ошибки управления в модели, $Var(e_{rob})$ – дисперсия ошибки управления в роботе, $Var(u_{mod})$ и $Var(u_{rob})$ – дисперсии управляющего воздействия в модели и макете, $Var(ie_{mod})$ и $Var(ie_{rob})$ – дисперсии интеграла ошибки управления модели и макета соответственно.

Так же следует отметить, что возможно применение и других функций пригодности, например интеграл разницы между точками получающихся графиков выборок и т.д.

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 механизма подбора коэффициентов усиления для ПИД - регулятора рассматривается ниже):

$$f(x_r) = \frac{1}{1 + \int_0^t e^2 dt}, \quad (3.5)$$

где e – величина отклонения от задающего сигнала, t – диапазон интегрирования, равный времени проверки одного решения.

Далее коэффициенты тестируются на макете по схеме на рис. 3.7 [127].

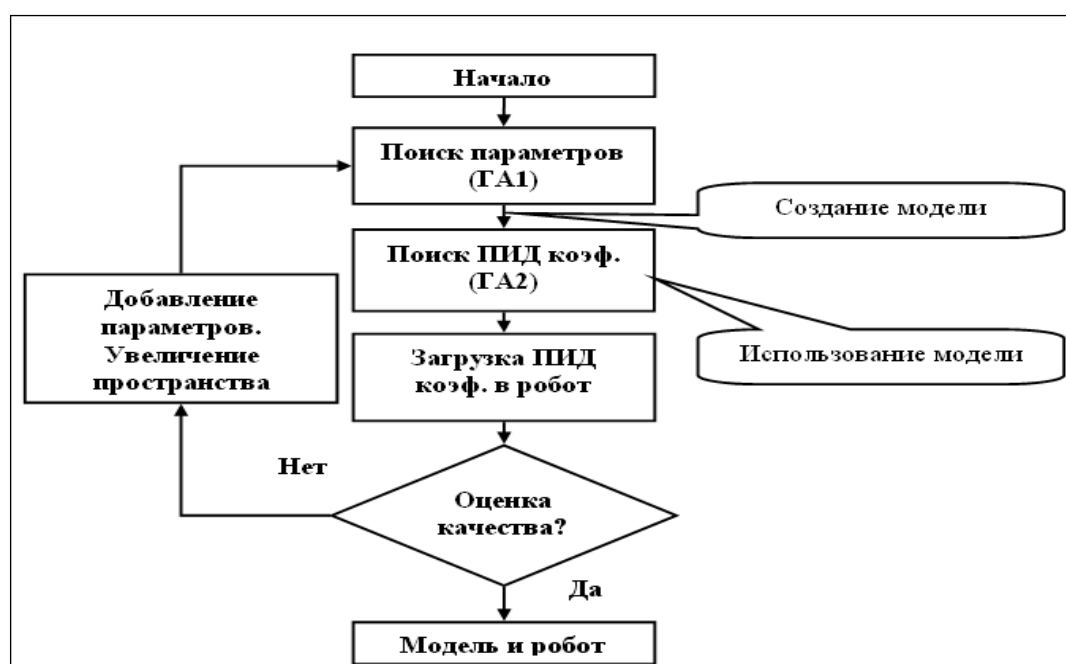


Рис. 3.7. Алгоритм верификации с использованием ГА

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. 3.8 и 3.9 [127].

Требуется достичь высокого уровня пригодности проверяемого решения при верификации. Для данного случая алгоритм закончил работу со значением функции пригодности: $Fit = 0.9847$.

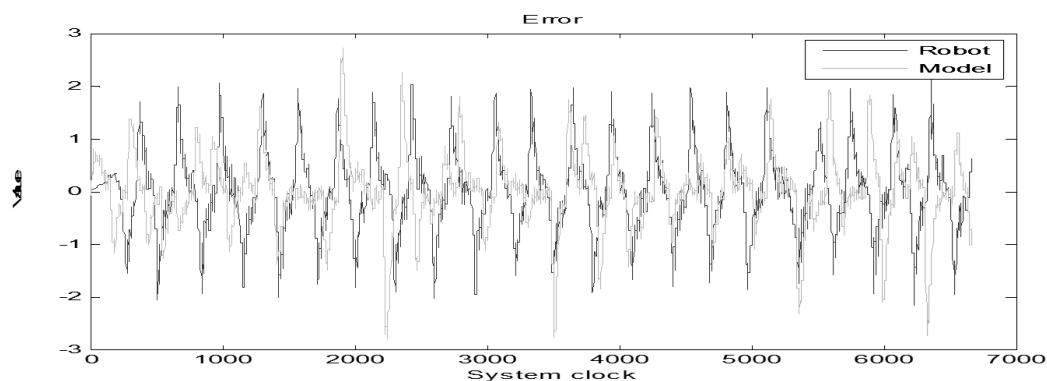


Рис. 3.8. Угол отклонения макета и модели

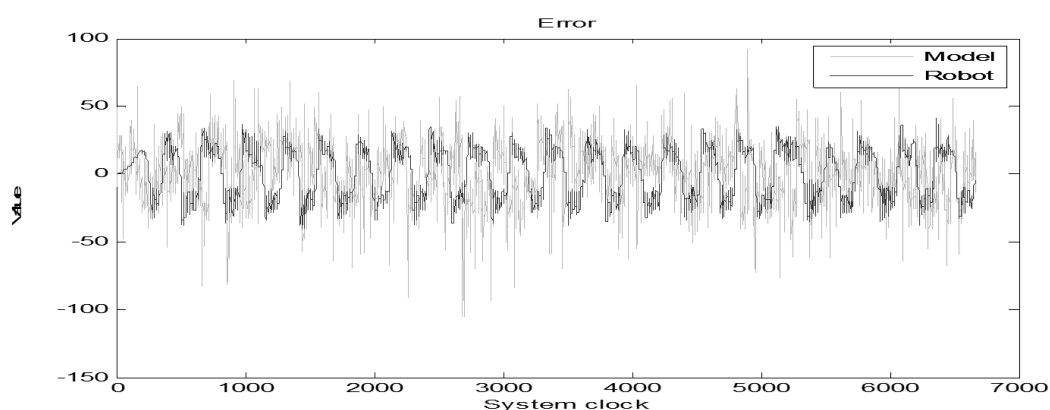


Рис. 3.9. Управляющее воздействие макета и модели

В таблице 3.2 [127] представлены значения дисперсии входного и выходного сигнала ПИД-регулятора, макета и модели на одинаковом интервале времени.

Таблица 3.2.

Дисперсии входных и выходных данных макета и модели

	Макет	Модель
Дисперсия ошибки управления	0.566	0.511
Управляющее воздействие	336	389

Дополнительно, в таблице 3.3 [127], представлены критерии позволяющие определить качество верификации. В качестве основного показателя используются разности между графиками: T – время моделирования с шагом t , e_t^{robot} , e_t^{model} – значения ошибки управления или управляющего воздействия в момент времени t .

На рис. 3.10 и 3.11 [127] представлена в графическом виде разность между ошибкой управления макета и математической модели.

Таблица 3.3. 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	694
$F(e_r, e_m) = \frac{\int_0^T \ e_t^{robot} - e_t^{model}\ }{T}$	0,54	10,6

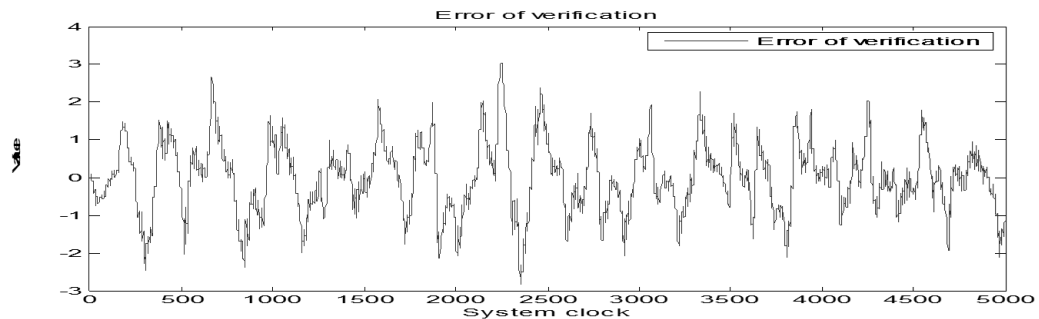


Рис.3.10. Разность угла отклонения модели и макета

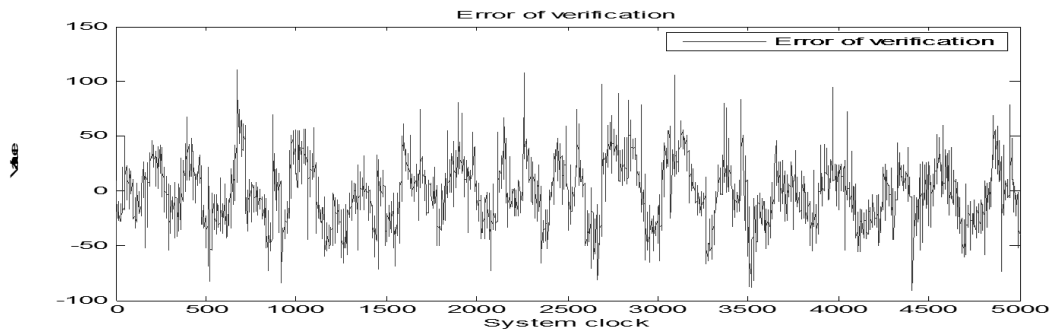


Рис.3.11. Разность управляющего воздействия макета и модели

На основе верифицированной модели, включающей в себя подобранные не доопределенные 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.

3.4. Получение обучающего сигнала для проектирования интеллектуального управления.

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 использовать в дальнейшем решения, не попавшие в следующее поколение. При документировании решений, для стороннего наблюдателя работы алгоритма, эти данные превращаются в огромный массив трудно доступной для обработки информации.

На рис. 3.12 [127] 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 диссертации. 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 инструментарий ОБЗ, возможно выделить знания из сигнала, полученного в процессе работы ГА в режиме реального времени, с дальнейшим использованием их в БЗ НР.

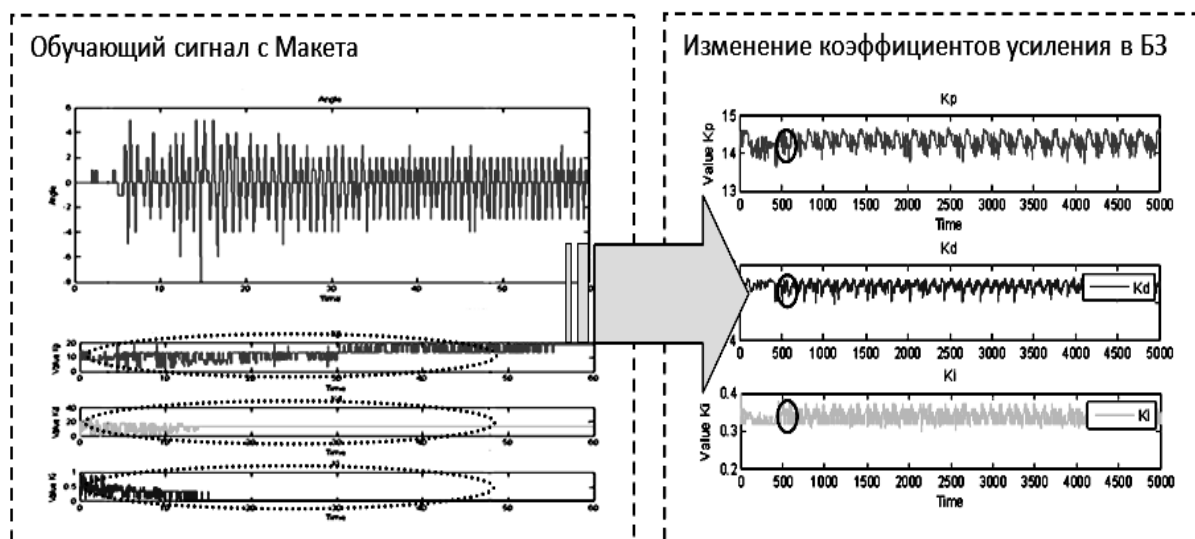


Рис. 3.12. Слева ОС с макета (ГА-ПИД-регулятор), справа коэффициенты усиления НР

В данной работе для создания двух БЗ НР использовались два набора параметров для математической модели.

В Таблице 3.4 [127] представлены начальные условия, значения параметров моделей, амплитуды и интенсивности шумов.

Параметры ГА для поиска ОС в программе ОБЗ проиллюстрированы на рис. 3.13 [178]. Также следует отметить установленное время такта системы. Для моделирования и эксперимента длительность такта принимались постоянной в течение испытаний и составляют 0.01 сек.

Результатом генетического отбора стал сигнал, часть которого представлена на рис. 3.15 [127], этот сигнал является входным сигналом в ОБЗ.

Сам обучающий сигнал в числовой форме представлен на рис. 3.14, где первые три столбца описывают ошибку управления, дифференциальную и интегральную ошибки соответственно, последние три – коэффициенты усиления k_P , k_D , k_I .

В виде графика на рис.3.15 представлена часть обучающего сигнала – угол отклонения.

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. 3.16 [127].

Таблица 3.4. Начальные условия, шумы и не доопределенные параметры модели для получения ОС

	Модель для БЗ 1	Модель для БЗ 2
Начальный угол	30 / -30гр	30 / -30гр
Начальная скорость	5 / -5гр/с	5 / -5гр/с
Коэффициент усиления моторов	0.08	0.08
Шум в системе измерения	Амплитуда 0.32, Гауссов шум, интенсивность 0.01	Амплитуда 0.32, Гауссов 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 + Гауссов шум 10%	3.63 + Гауссов шум 20%
Сила упругости	5.54Н/м	5. 54Н/м
Шум в креплении маятника	Нормированный шум с интенсивностью 0.01 и амплитудой 0.35	Гауссов шум с интенсивностью 0.01 и амплитудой 0.7
Диапазон поиска коэффициентов усиления	15-21	10 - 30
Время и шаг моделирования	Время моделирования 7 при шаге 0.01с	Время моделирования 7 при шаге 0.01с

На этом этапе оптимизируются правые части правил. Для этого используется ГА2 (для ОС с макета) и Матлаб - моделирование для ОС, полученных с использованием модели.

Результаты построения БЗ иллюстрируются ниже (рис. 3.17 [127]).

Для формирования правых частей правил для БЗ, ОС которых получен с макета, использовался ГА2.

CreateSignalDialog

Dimensions of teaching signal

Input: 3

Output: 3

Encoding parameters

Search range: 15,00 - 21,00

Bits per parameter: 12

Simulation parameters

Simulation time: 7,000

Model sample time: 0,010

Controller sample time: 0,010

Buttons: Cancel, < back, next >

Рис. 3.13. Окно ОБЗ для установки параметров поиска обучающего сигнала с использованием генетического алгоритма

-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. 3.14. Обучающий сигнал с модели в виде данных

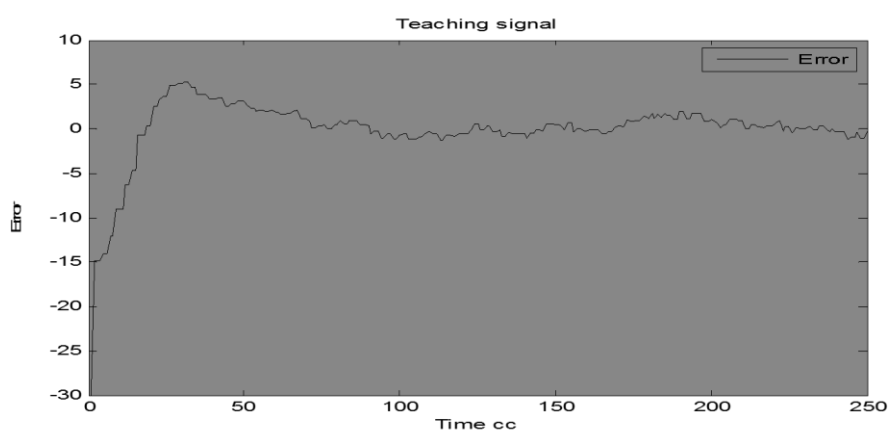


Рис. 3.15. Ошибка управления в обучающем сигнале угла отклонения маятника

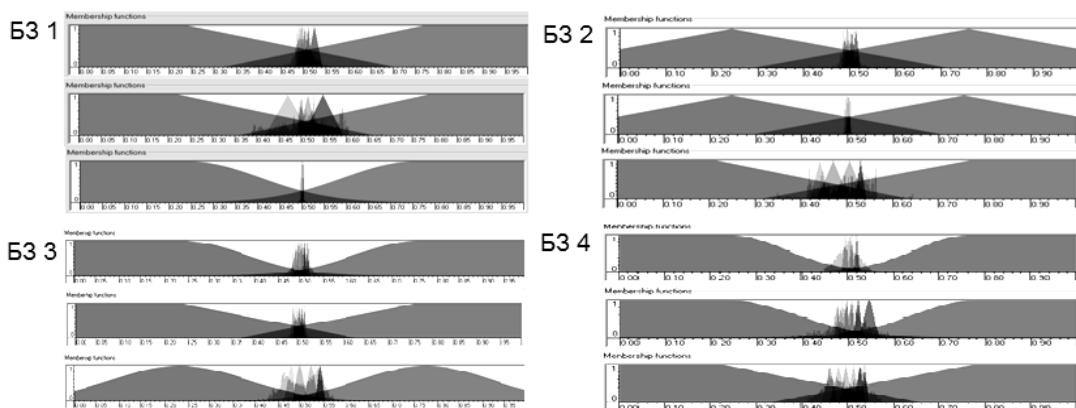


Рис. 3.16. Функции принадлежности для входных значений лингвистических переменных
B3 1, B3 2, B3 3, B3 4

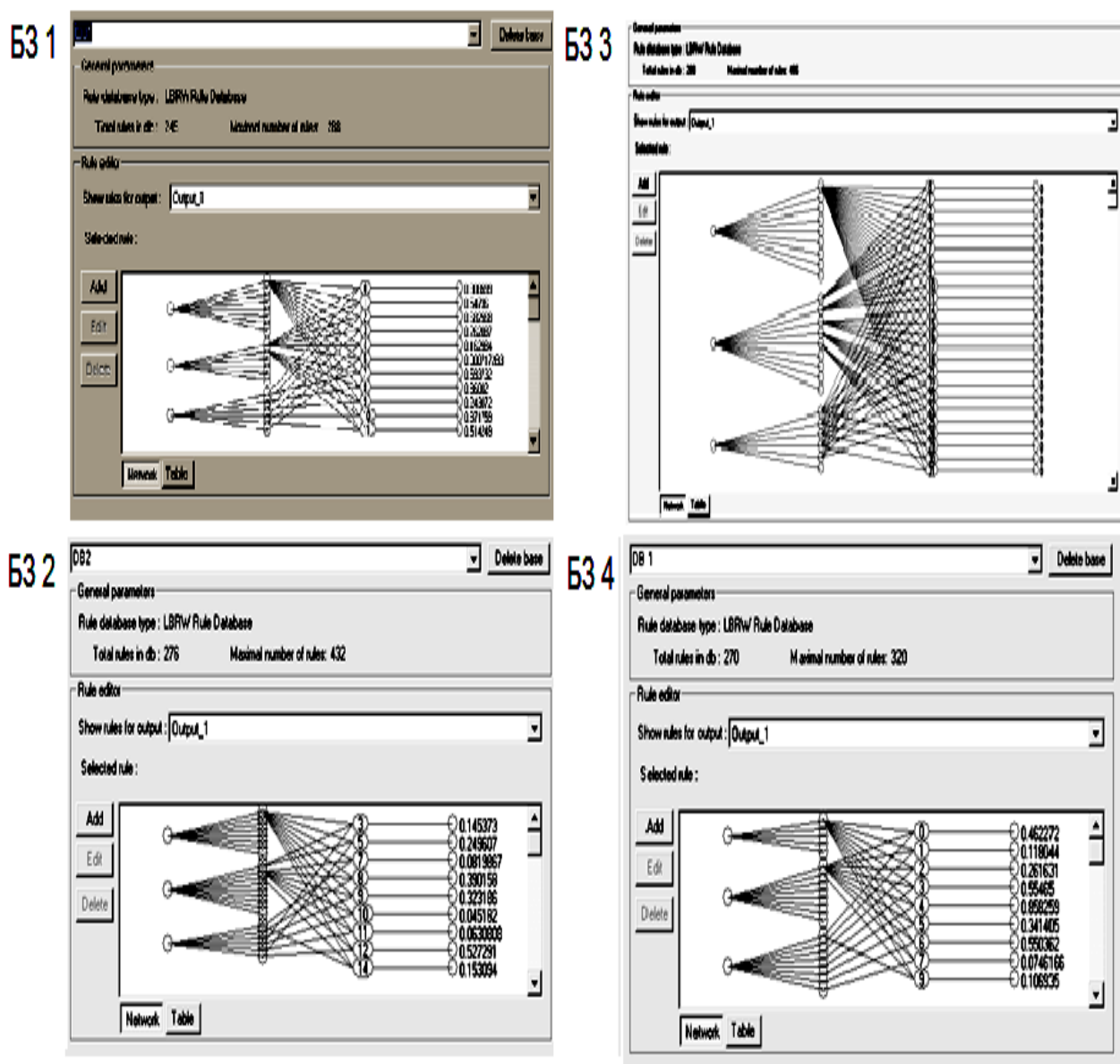


Рис. 3.17. Базы знаний в виде нейронных сетей (OC с модели и макета)

Функция пригодности на данном этапе – минимум ошибки аппроксимации ОС.

Результат создания и оптимизации правил БЗ представлен в виде нейронной сети на рис. 3.17 [127]. Первый слой демонстрирует количество входных переменных, второй – количество функций принадлежности для каждой лингвистической переменной, третий – продукционные правила базы знаний, четвертый – значения коэффициентов усиления.

На рис. 3.18 [127] демонстрируется связь между ОС, полученного с использованием математической модели и коэффициентами усиления НР.

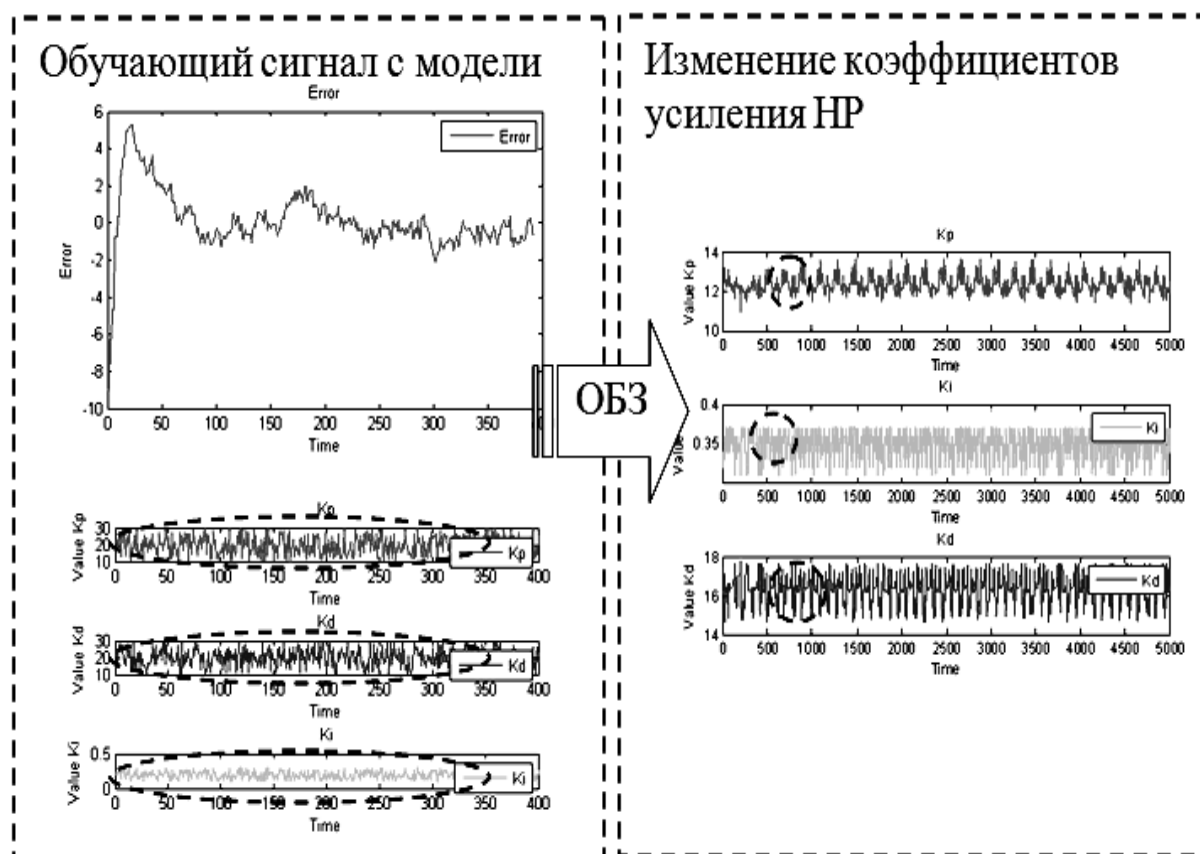


Рис. 3.18. ОС с модели и коэффициенты усиления НР

В таблице 3.5 [127] приведено сравнение БЗ по количеству правил, количеству функций принадлежности лингвистической переменной и способу оптимизации в программном инструментарии ОБЗ.

Таблица 3.5. Сравнение БЗ

База №	Количество правил	Кол-во функций принадлежности	Способ оптимизации
База 1 Модель	245	8х6х6	Моделирование
База 2 Модель	276	8х9х6	Моделирование
База 3 Макет	288	9х9х6	Аппроксимация ОС (ГА2)
База 4 Макет	270	5х8х8	Аппроксимация ОС (ГА2)

Отметим, что регуляторы разрабатывались для функционирования в типовой ситуации управления. Для сравнения робастности разработанных систем управления используем непредвиденную ситуацию управления. Ситуация моделируется наличием шума в коэффициенте трения колеса о поверхность и в управляющем воздействии. В качестве такого шума в эксперименте используется специальное покрытие, а для моделей были установлены соответствующие значения параметров.

Рассмотрим поведение ПИД и нечетких регуляторов в типичной и непредвиденной ситуации управления. На рис. 3.19 – 3.22 [128] представлены результаты моделирования и экспериментов в типовой ситуации управления.

Таблица 3.6. Ситуации управления, параметры математических моделей [128]

	Типовая ситуация (С1)	Непредвиденная (С2)
Начальный угол	0гр	0гр
Начальная скорость	1гр/с	1гр/с
Масса тележки	0.56 кг	0.56 кг
Масса маятника	0.63 кг	0.63кг
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 + Гауссов шум 15%	2.53 + Гауссов шум 15%
Сила упругости	5.54Н/м	7.54Н/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, Гауссов шум, интенсивность 0.01	Амплитуда 0.42, Гауссов шум, интенсивность 0.01
Задержка управляющего воздействия	0.01 с	0.01 с

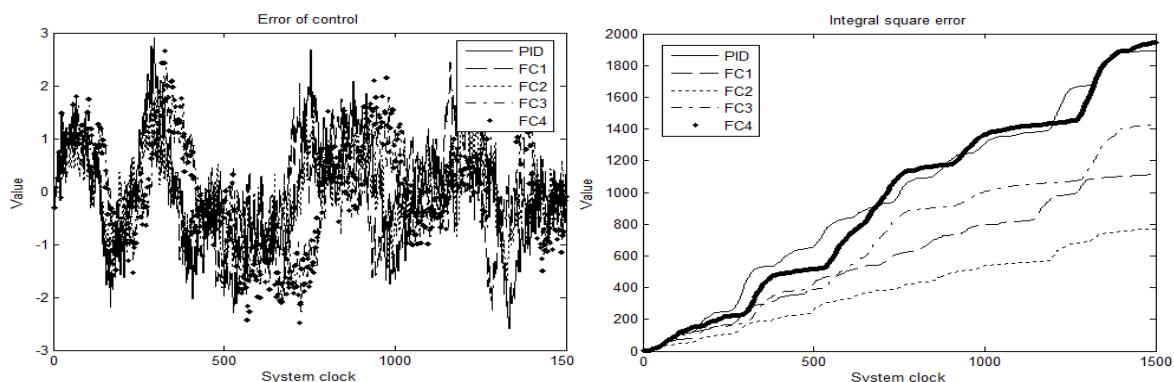


Рис. 3.19. Слева ошибка управления, справа интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления.

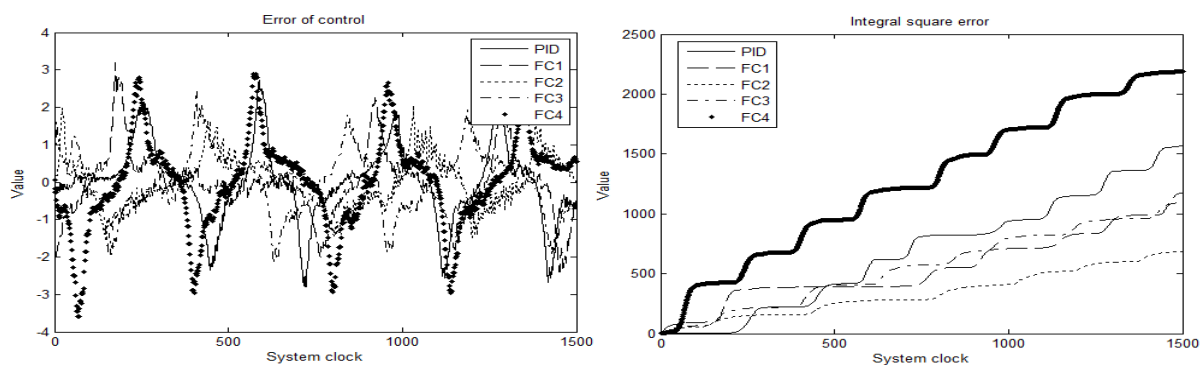


Рис. 3.20. Слева ошибка управления, справа интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления

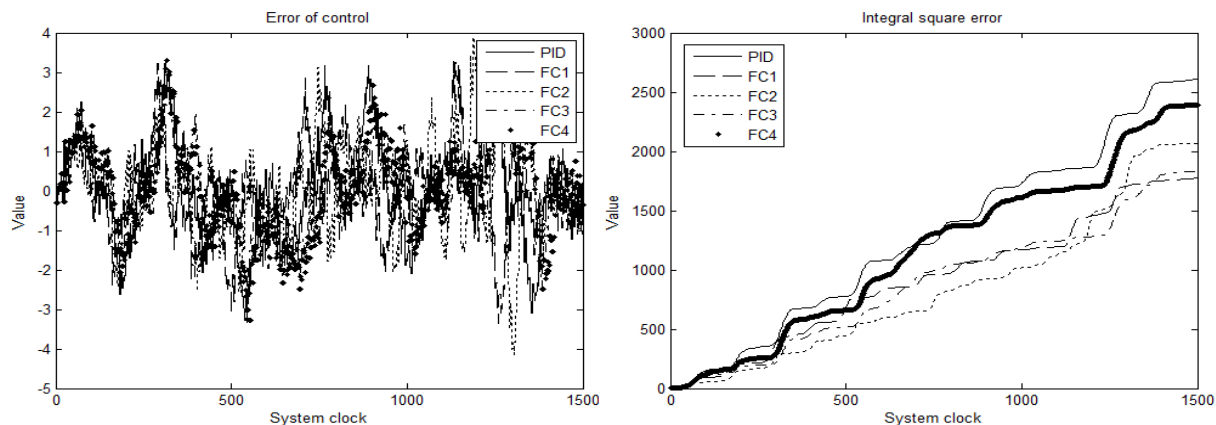


Рис. 3.21. Слева ошибка управления, справа интеграл квадратичной ошибки.

Непредвиденная ситуация управления

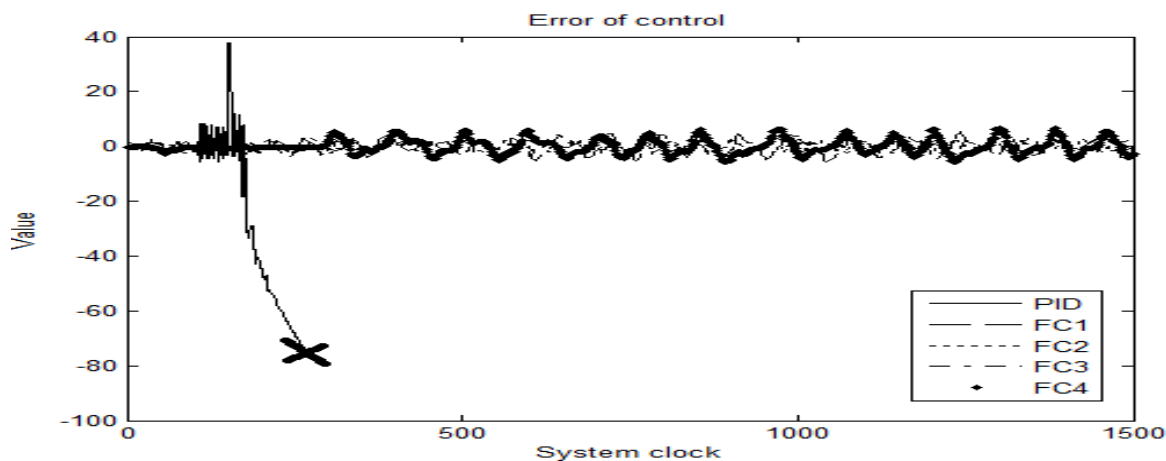
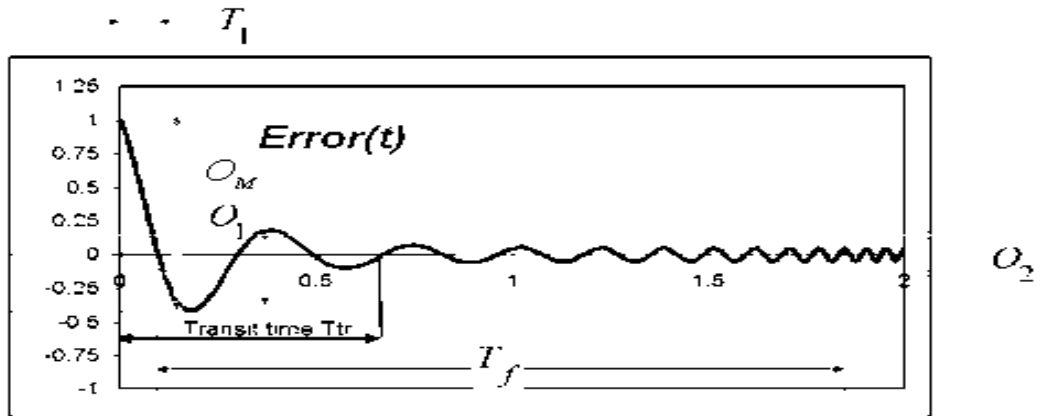


Рис. 3.22. Ошибка управления. Непредвиденная ситуация управления

Проведем анализ качества управления нечеткого регулятора и ПИД-регуляторов. Для этого используем следующие показатели переходного процесса (рис. 3.23 [136]). Перерегулирование характеризует колебательное свойство переходного процесса и рассчитывается согласно (3.6). На рис. 3.24 представлена диаграмма уровня перерегулирования системы управления.



$$O_2 = \sqrt{\frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} |Error|^2 dt}$$

Рис. 3.23. Показатели качества управления

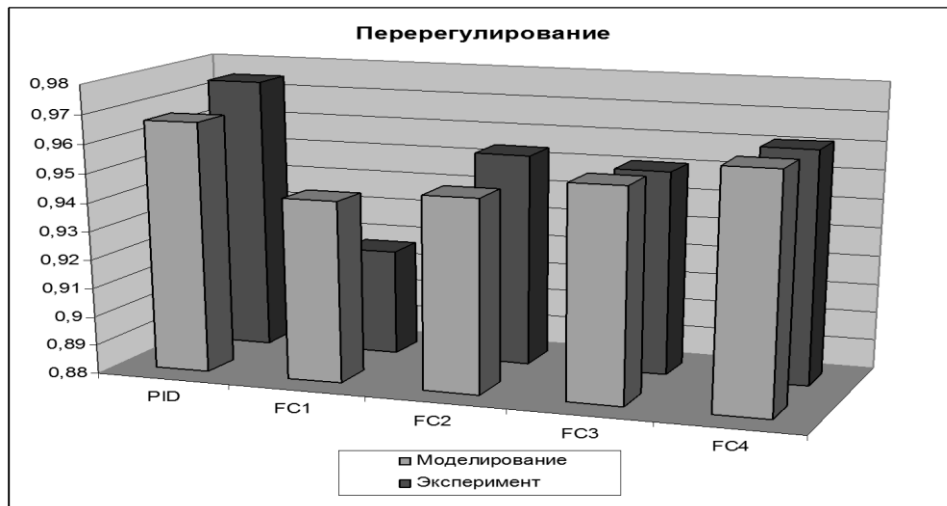


Рис. 3.24. Перерегулирование систем управления в типовой ситуации.

$$o_1 = 1 - \frac{O_1}{O_m}; O_m(const) \geq O_1; \quad (3.6)$$

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. 3.25) [136] рассчитывается как:

$$o_2 = 1 - \frac{O_2}{O_m}; O_m(const) \geq O_2; \quad (3.7)$$

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.

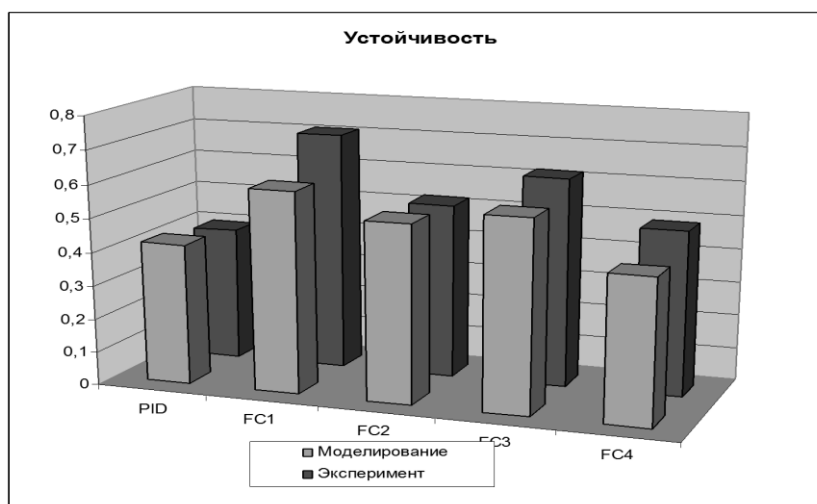


Рис. 3.25. Устойчивость систем управления в типовой ситуации.

Сложность управления САУ (рис. 3.26) рассчитывается в виде:

$$P \equiv 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \left(\frac{dK}{dt} \right)^2 dt}}{A}; \quad A = \text{const} \quad (3.8)$$

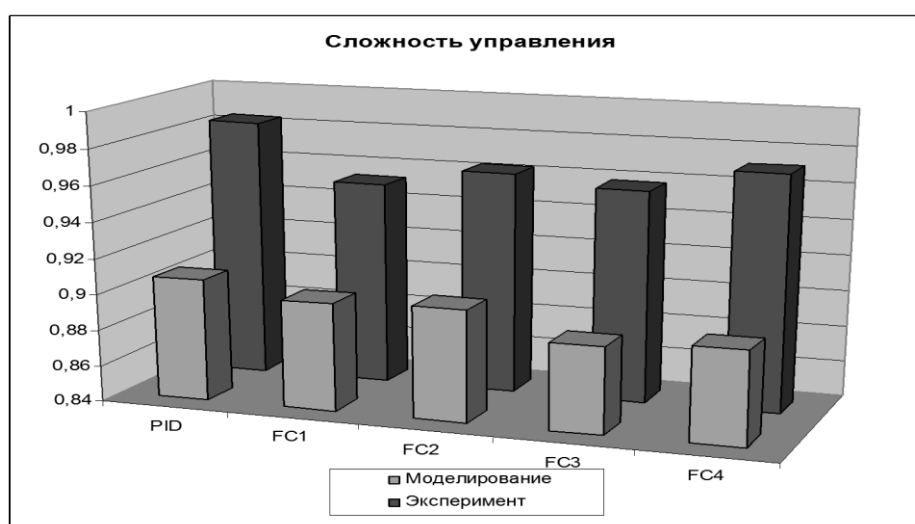


Рис. 3.26. Сложность управления в типовой ситуации.

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 робастность.

Из графика (рис. 3.22) видно, что ПИД-регулятор не обладает необходимой робастностью, что в непредвиденной ситуации управления приводит к потере устойчивости системы.

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 разработанного метода верификации математической модели с применением ГА.

Таким образом, результаты эксперимента показывают, что НР, базы знаний которых спроектированы по разработанной методологии, обладают повышенной робастностью и способны справляться с задачей управления в широком классе непредвиденных ситуаций.

3.5. Интеллектуальные робастные системы управления на основе квантового оптимизатора баз знаний

Перейдем к практическому применению разработанной модели КНВ для формирования процессов управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора. Рассмотрим применение разработанной модели КНВ для формирования процессов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора.

Для этого проведем компьютерное моделирование для двух ситуаций управления:

- в первой (типовой) ситуации (С1) задержка управляющего сигнала стандартная - 0.01 сек;
- во второй непредвиденной ситуации (С2) задержка управляющего сигнала - 0.04 сек (увеличенная в четыре раза).

В таблице 3.7 [129] представлены параметры математической модели для С1 и С2.

На рис. 3.27 [129] представлена структура системы моделирования:

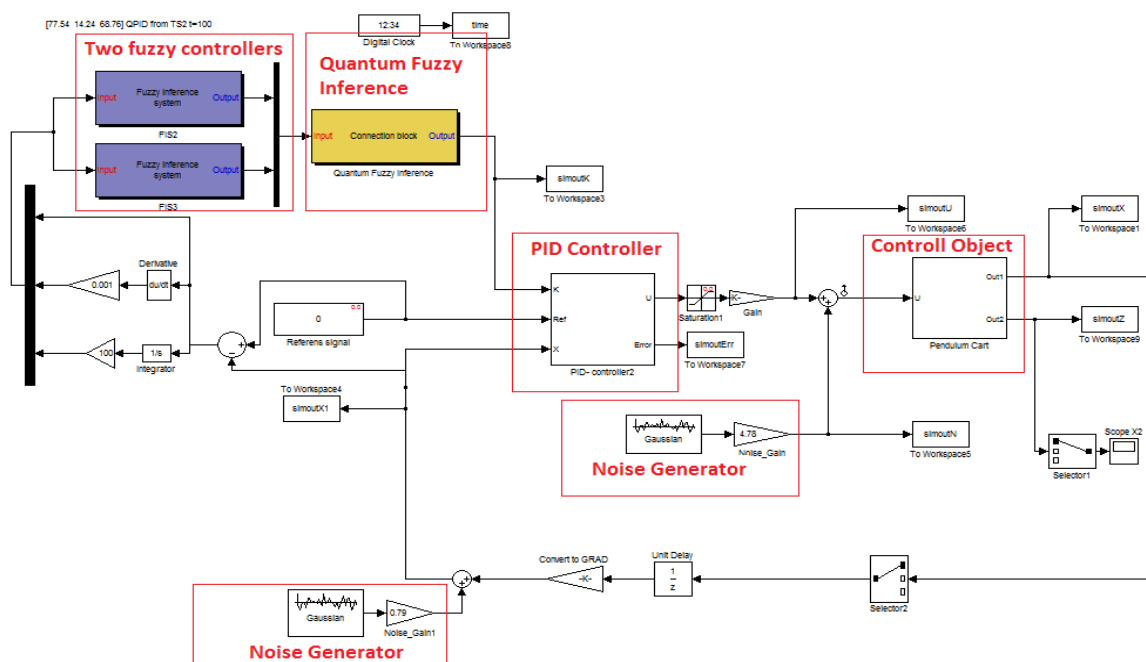


Рис. 3.27. Структура системы моделирования в среде MatLab/Simulink. На схеме обозначены: два нечетких регулятора; блок КНВ; ПИД - регулятор; объект управления; генераторы шумов

Таблица 3.7 [129]

Ситуации управления и параметры математических моделей

	Типовая ситуация (C1)	Непредвиденная (C2)
Начальный угол	0 гр	0 гр
Начальная скорость	1 гр/с	1 гр/с
Масса тележки	0.56 кг	0.56 кг
Масса маятника	0.63 кг	0.63 кг
Длина маятника	0.05 м	0.07 м
Трение в креплении	3.55 + нормированный шум с интенсивностью 0.01 и амплитудой 0.35	3.73 + нормированный шум с интенсивностью 0.01 и амплитудой 0.35
Трение колес	3.63 + Гауссов шум 15%	3.63 + Гауссов шум 15%
Сила упругости	5.54 Н/м	5.54 Н/м
Шум в системе управления	Равномерный шум [-2.15, 2.15], интенсивность 0.48	Равномерный шум [-2.15, 2.15], интенсивность 0.48

Шум в системе измерения	Амплитуда 0.22, Гауссов шум, интенсивность 0.01	Амплитуда 0.32, Гауссов шум, интенсивность 0.01
Задержка управляющего воздействия	0.01 с	0.04 с

Результаты моделирования регуляторов в типовой ситуации управления проиллюстрированы на рис. 3.28- 3.29 [129].

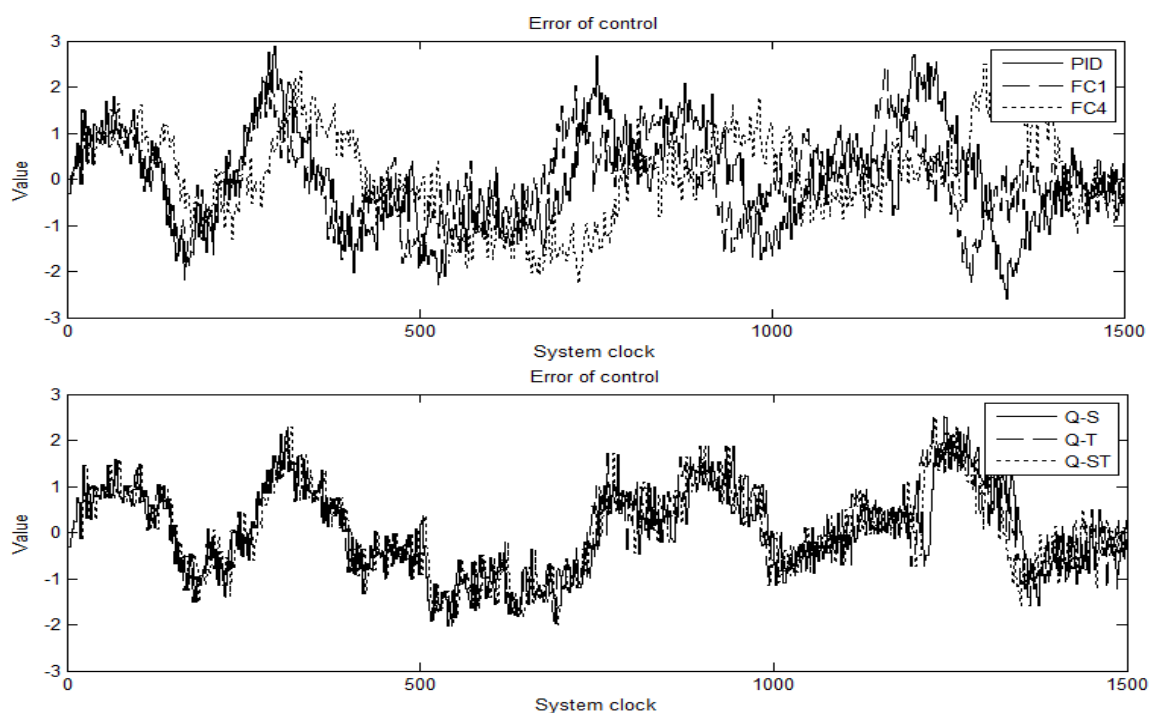


Рис. 3.28. Угол отклонения математической модели. Типовая ситуация управления (C1).

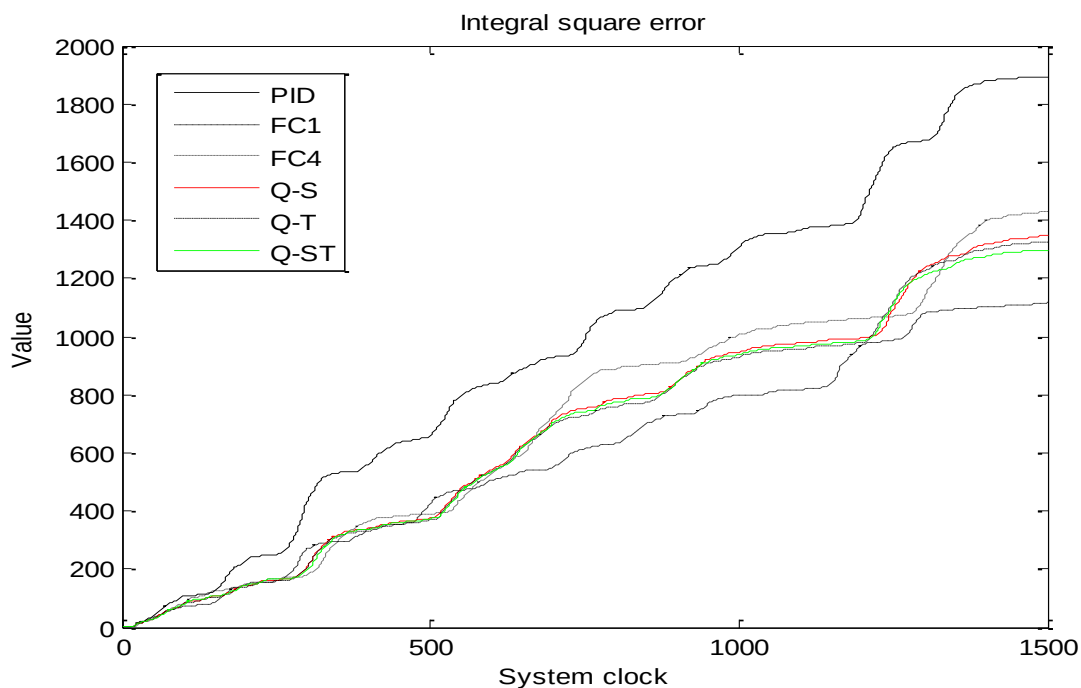


Рис. 3.29. Интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления (C1).

Рассмотри связь между входными и выходными значениями КНВ на примере пропорционального коэффициента усиления. На рис. 3.30 [138] представлены входные значения КНВ (коэффициенты усиления FC1 и FC4) и выходное значение пропорционального коэффициента КНВ при пространственной корреляцией.

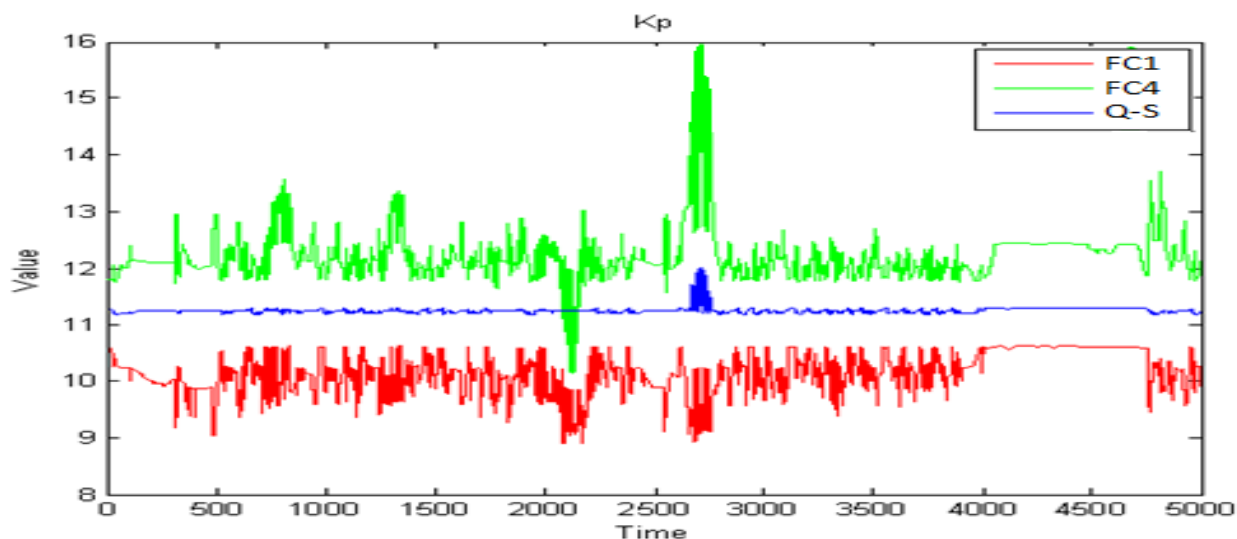


Рис. 3.30. Коэффициент усиления K_p . Входные и выходные значения КНВ в типовой ситуации управления

На рисунках 3.31 [138] представлены фазовые портреты моделируемых систем.

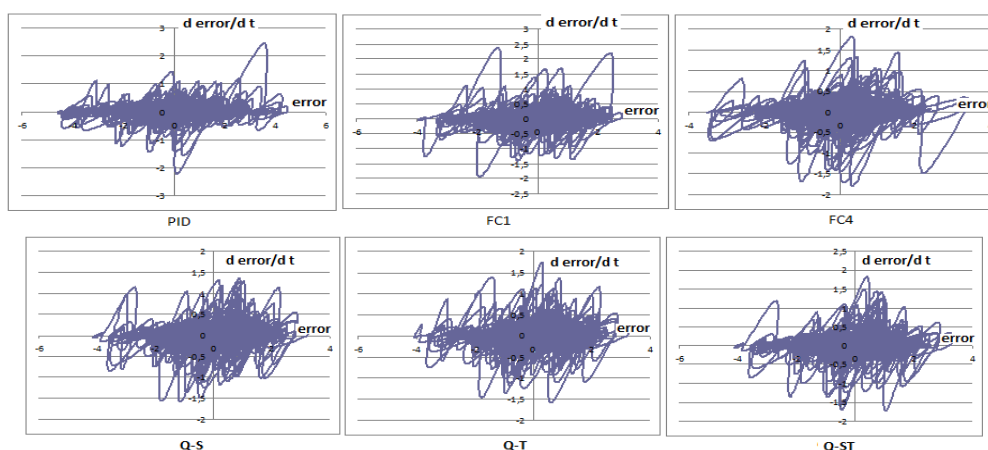


Рис. 3.31. Фазовые портреты моделируемых контроллеров

Далее на рис. 3.32 [138] представлены результаты моделирования в непредвиденной ситуации управления и на рис. 3.33 [138] представлена общая диаграмма интеграла квадратичной ошибки моделирования.

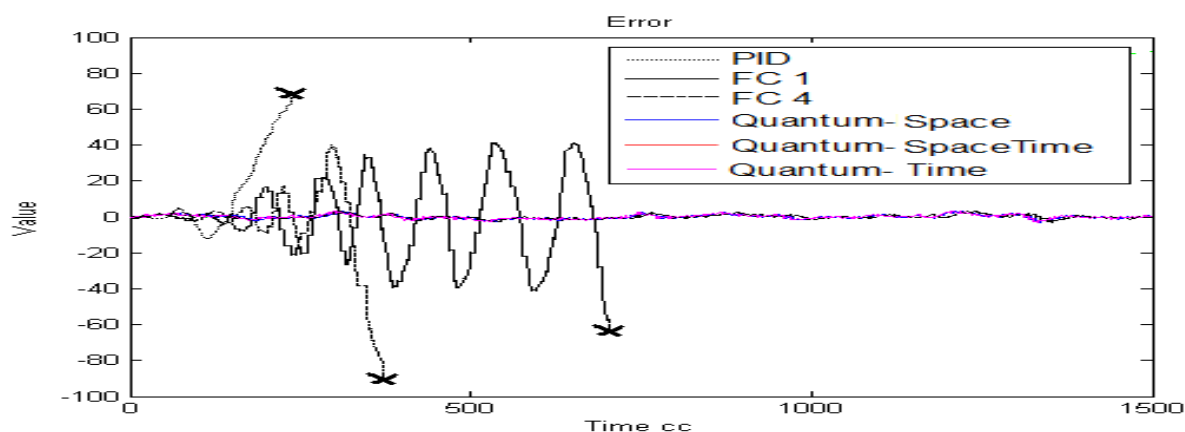


Рис. 3.32. Угол отклонения математической модели. Непредвиденная ситуация управления.

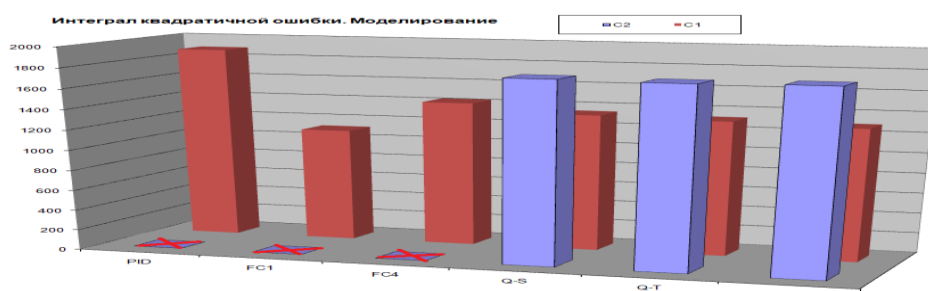
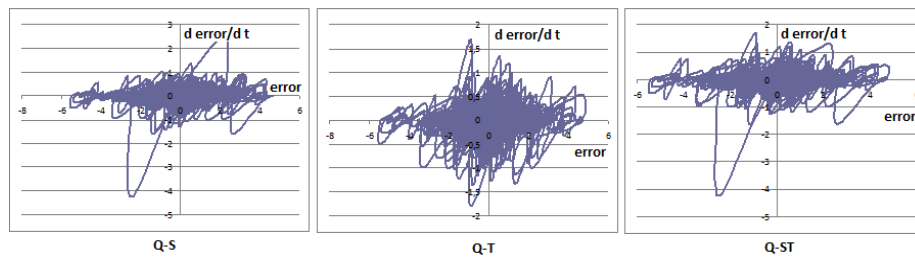


Рис. 3.33. Интеграл квадратичной ошибки. Непредвиденная и типовая ситуации управления. FC1-FC4 – нечеткие регуляторы, сокращения Q-quantum, S(Space) – пространственная, T(Time) – временная, ST(SpaceTime) – пространственно временная корреляции



3.34. Фазовые портреты модели с КР в непредвиденной ситуации

На рис. 3.32 [138] можно видеть, что значение интегральной ошибки КНР располагается между контроллерами, образовавшими КНВ. Фазовые портреты результатов моделирования систем с КР в непредвиденной ситуации представлены на рис 3.34 [138].

Рассмотрим результаты эксперимента в типичной ситуации управления. На рис. 3.35 – 3.38 [138] представлены результаты экспериментов в типичной ситуации управления.

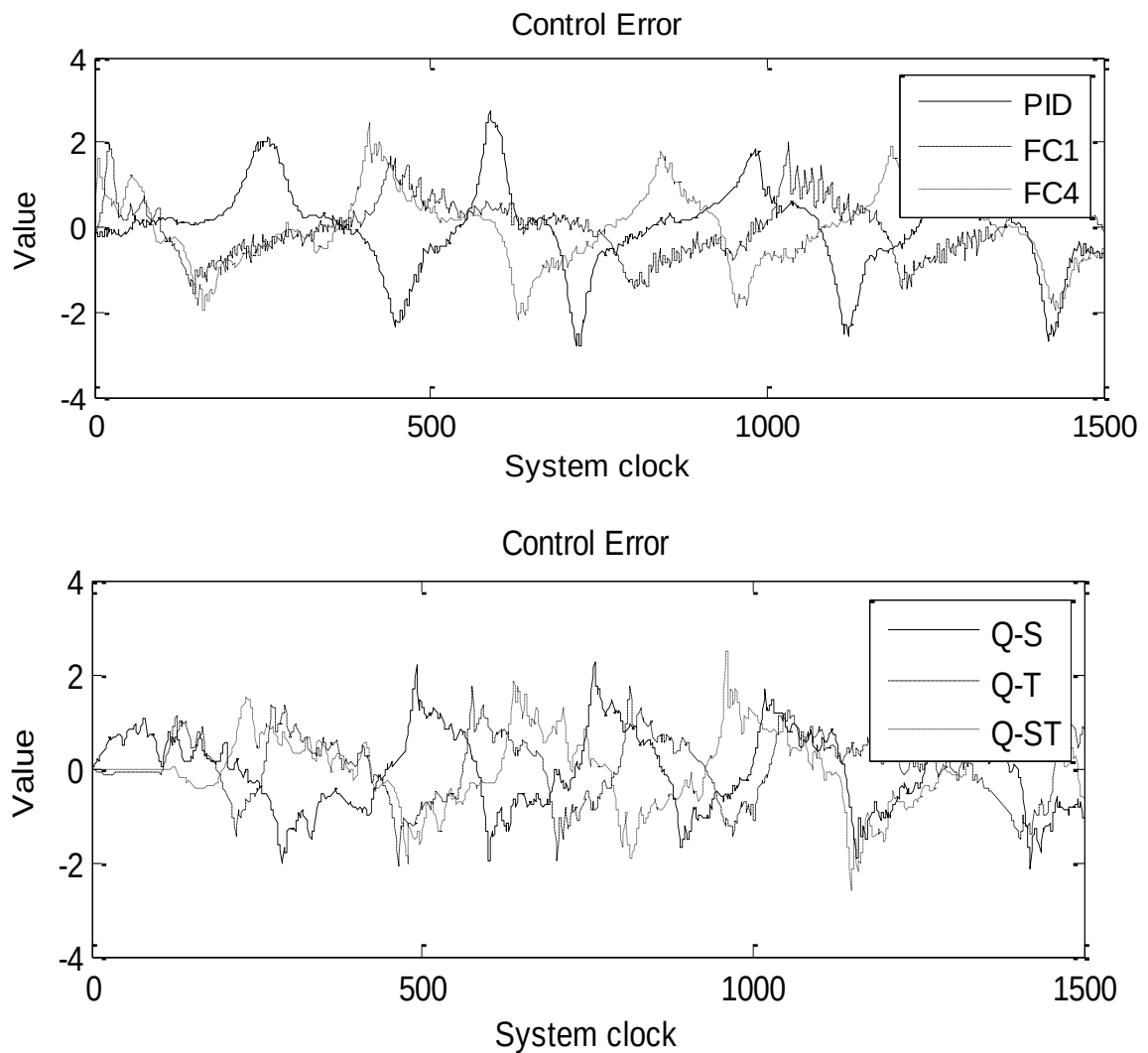


Рис. 3.35. Угол отклонения макета в типовой ситуации управления.

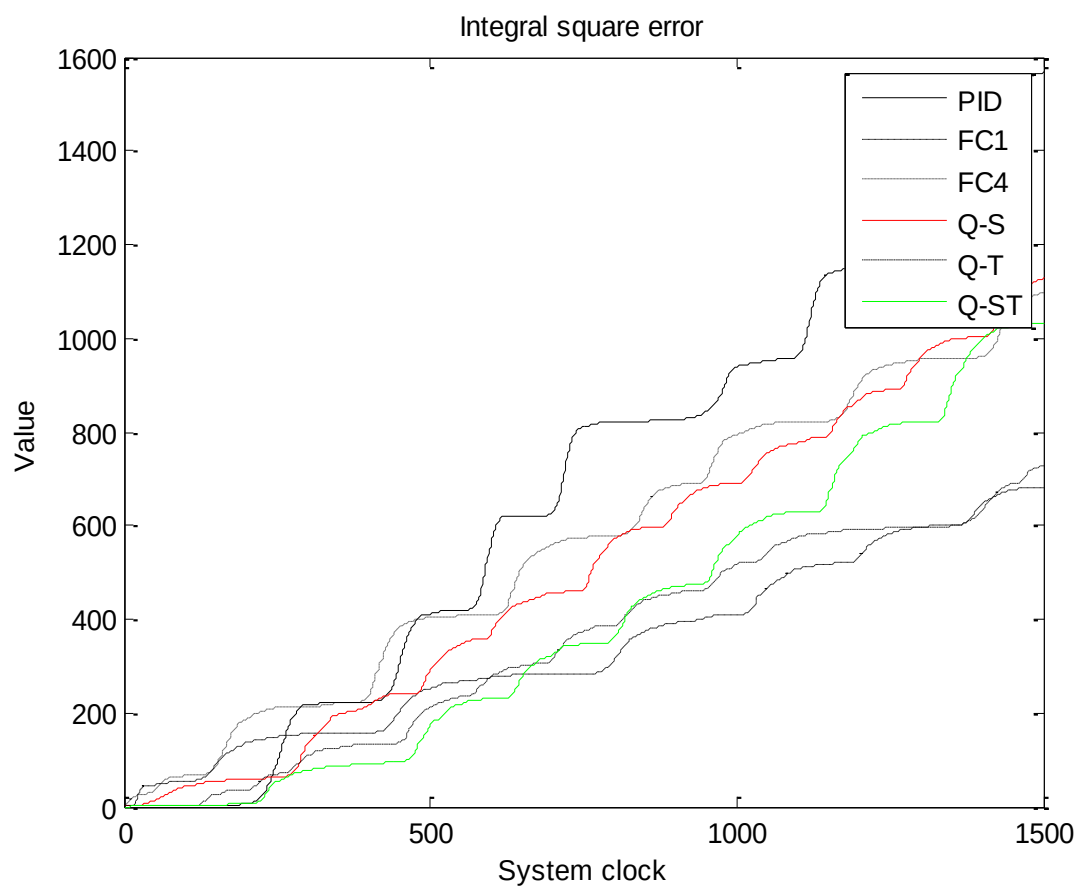


Рис. 3.36. Интеграл квадратичной ошибки в типовой ситуации управления

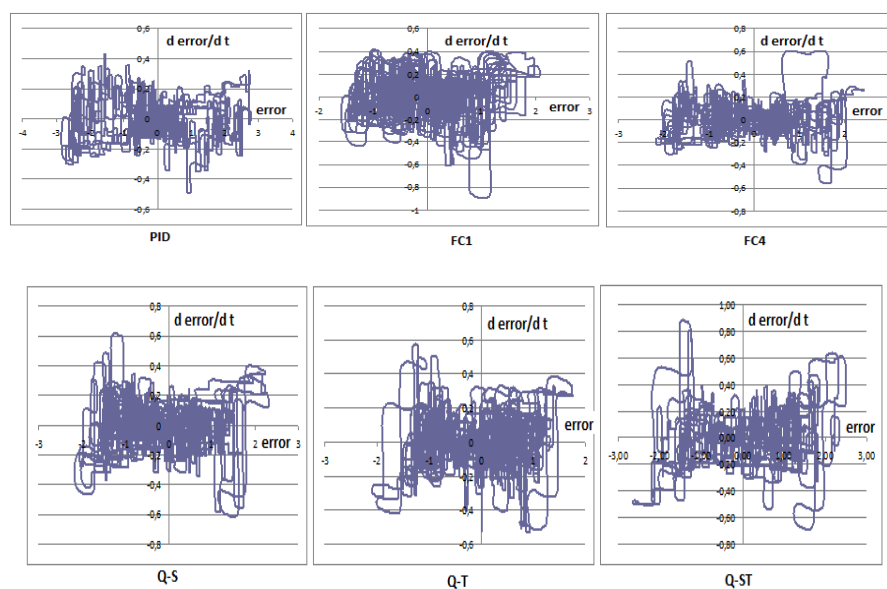


Рис. 3.37. Фазовые портреты физических систем в типовой ситуации управления

Рассмотрим результаты эксперимента в непредвиденной ситуации управления (C2). На рис. 3.38 – 3.41 [138] представлены результаты экспериментов в непредвиденной ситуации управления.

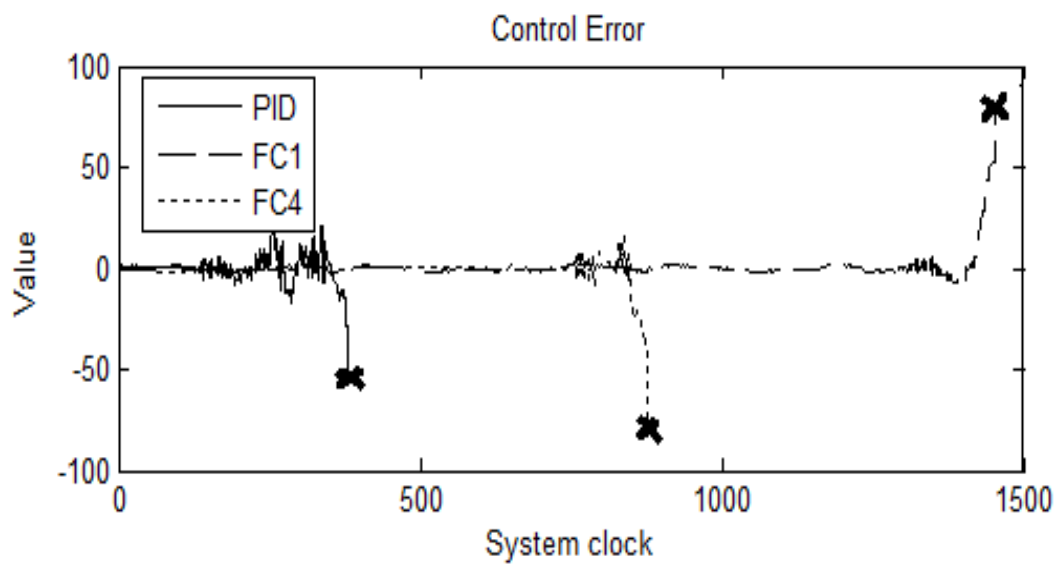


Рис. 3.38. Угол отклонения макета. Непредвиденная ситуация управления.

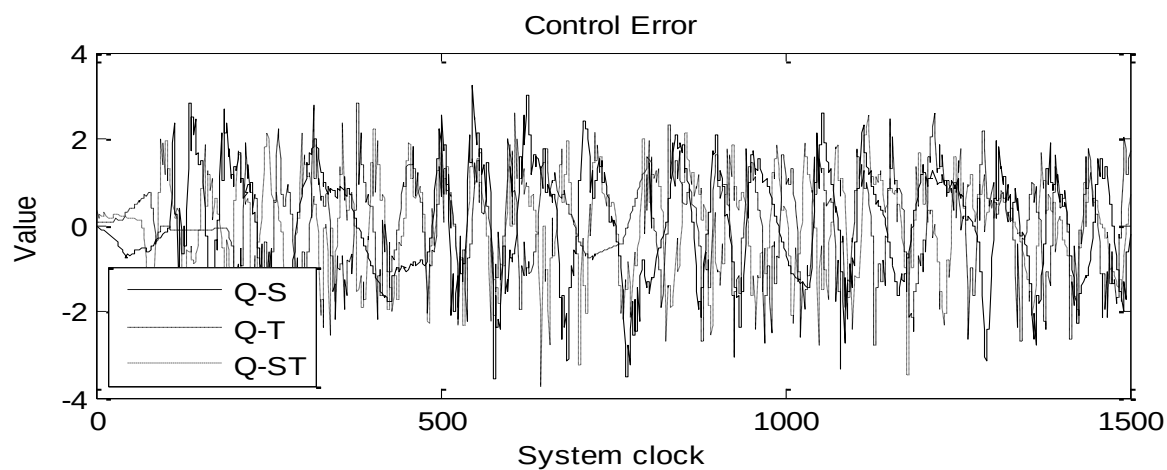


Рис. 3.39. Угол отклонения макета. Непредвиденная ситуация управления.

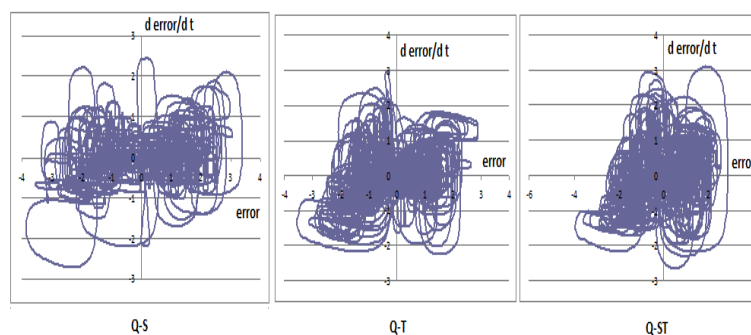


Рис. 3.40. Фазовые портреты физических систем с КР в непредвиденной ситуации управления

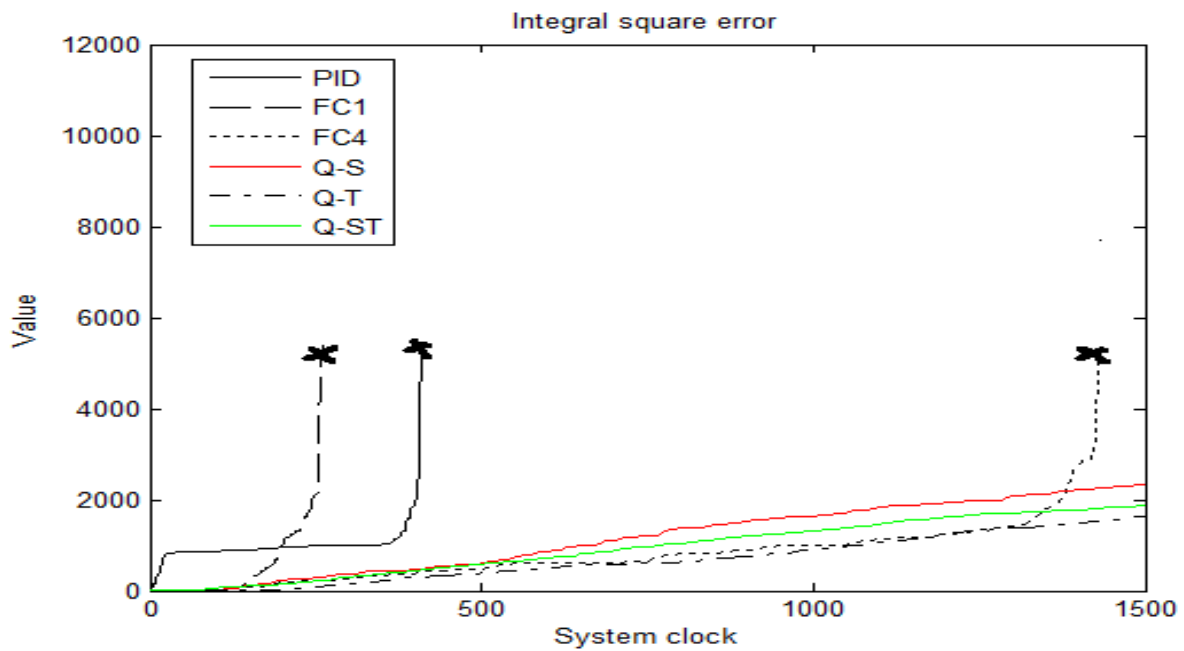


Рис. 3.41. Интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления.

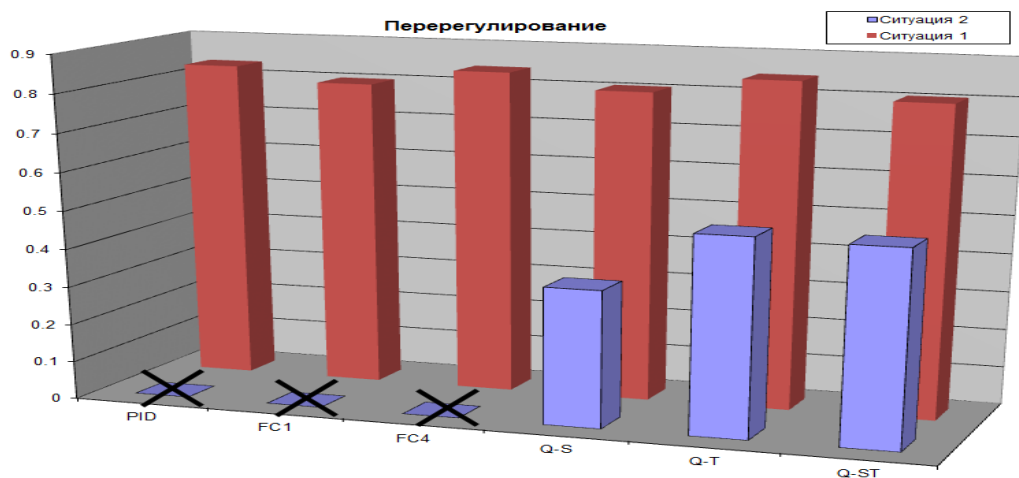


Рис. 3.42. Перерегулирование систем управления в типовой и непредвиденной ситуации.

В эксперименте в типовой ситуации более эффективное управление, с точки зрения перерегулирования, демонстрируют ПИД-регулятор, FC4 и КНР на основе временной корреляции. В непредвиденной ситуации лучшим стал контроллер Q-T.

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.

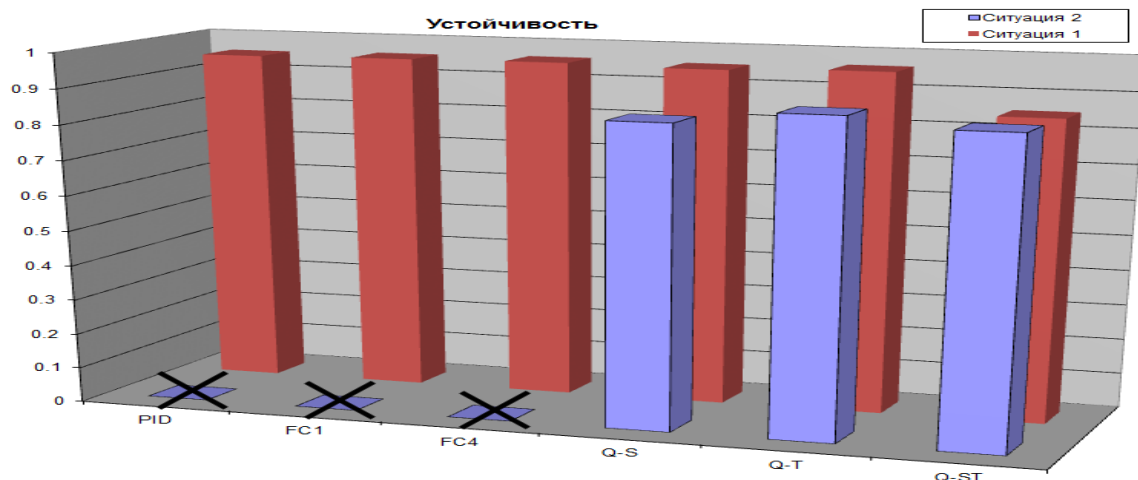


Рис. 3.43 [138] Устойчивость систем управления в типовой ситуации.

Более высокий уровень устойчивости свидетельствует о значительно лучшем уровне качества и повышения надежности управления. В типовой ситуации управления все регуляторы, кроме Q-ST, показали близкий и высокий уровень устойчивости. В непредвиденной ситуации 2 лучшим опять оказался контроллер Q-T.

Сложность управления характеризует способность системы управления эффективно расходовать энергетический и технический ресурс системы. В случае реализации сложного управления, износ оборудования и затраты энергии будут велики. Сравнительные результаты по этому показателю представлены на рис. 3.44 [138].

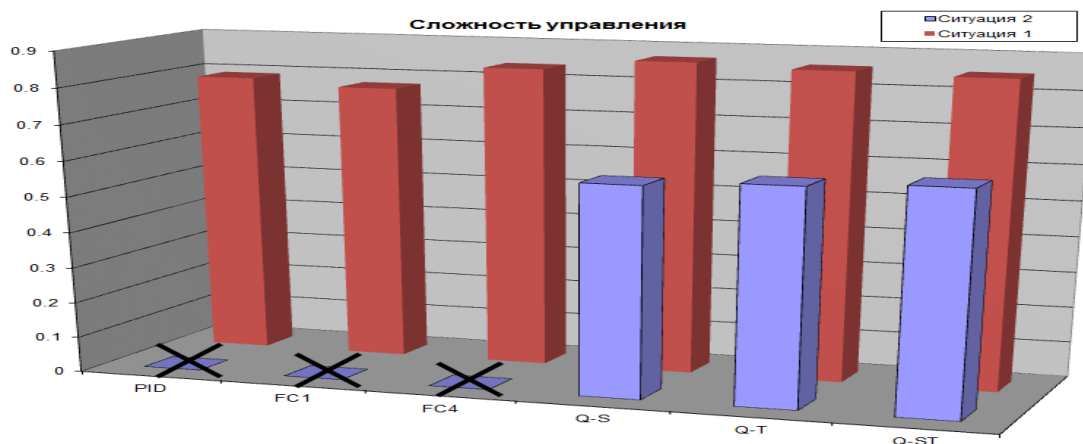


Рис. 3.44. Сложность управления в типовой и непредвиденной ситуации.

В типовой ситуации управления более простым и, следовательно, эффективным управлением обладает квантовый контроллер Q-S.

Важно отметить, что система управления на основе квантовых нечетких выводов наследует лучшие характеристики качества управления от баз знаний нечетких

регуляторов, добавляя способность к самоорганизации. Созданные в реальном времени квантовым процессом проектирования законы управления имеют минимальную алгоритмическую сложность и при физической реализации обладают минимальными потерями полезного ресурса (минимум производства энтропии в системе «ОУ + самоорганизующейся интеллектуальный регулятор») для различных (физически неоднородных) классов непредвиденных ситуаций управления. При этом гарантированное достижение требуемого уровня робастности в непредвиденной ситуации управления в ряде случаев может существенно зависеть от качества и количества используемых индивидуальных баз знаний.

В отличие от технологий мягких вычислений, где на адаптацию и обучение требуется время и ресурс вычислительной системы, представленный квантовый алгоритм самоорганизации знаний повышает робастность системы в режиме реального времени, требует минимального расхода полезного ресурса.

Синергетический эффект квантовой самоорганизации баз знаний в условиях непредвиденных ситуаций, открытый ранее [102], основан на извлечении скрытой квантовой информации в классических состояниях (дополнительный информационный ресурс) законов управления коэффициентами усиления исполнительных автоматических устройств, которые формируют оптимальное управляющее воздействие (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 базы знаний, спроектированные для двух разных ситуаций управления, и, по отдельности, не робастные в новой непредвиденной ситуации управления, с помощью квантового нечеткого вывода дают возможность спроектировать робастную базу знаний, которая позволяет ИСУ успешно и надежно достичь цели управления.

Квантовая самоорганизация знаний открывает новые перспективы использования модели квантового нечеткого вывода, как частного варианта квантового алгоритма самоорганизации в задачах многокритериального управления ОУ со слабо формализованной структурой и большой размерностью фазового пространства управляемых параметров. При этом возможно использовать экспериментальные данные в виде обучающего сигнала без построения математической модели ОУ на первом этапе процесса проектирования с использованием инструментария на мягких вычислениях.

3.6. Выводы по главе 3

В главе 3 приведены результаты некоторых практических задач, реализованных по программе, реализующей выше описанные информационные технологии.

- Была проведена серия экспериментов с применением, как математической модели, так и реального объекта управления (макета) в типовых и непредвиденных ситуациях управления.
- Была проведена верификация математической модели объекта управления с недоопределенными параметрами на основе генетического алгоритма и физического сигнала с реального объекта управления, что позволило извлекать знания из физически измеряемого сигнала процесса управления, снижая субъективизм эксперта при формировании баз знаний.
- Разработанная технология проектирования нечетких регуляторов на основе метода верификации позволила проектировать интеллектуальные системы управления без использования традиционной математической модели объекта управления.
- В проведенных экспериментах, спроектированные и реализованные с использованием программного инструментария на мягких вычислениях базы знаний для гибридного пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора показали способность простого регулятора эффективно и надежно справляться с задачей управления сложным динамическим объектом управления в нештатных и непредвиденных ситуациях.
- Результаты моделирования и эксперимента показали возможность повышения надежности автономной встраиваемой интеллектуальной системы управления в нештатных и непредвиденных ситуациях за счет использования дополнительного информационного ресурса квантовых вычислений.
- Приведенные результаты моделирования и экспериментов показали, что разработанная методология объединения стратегий управления заложенная в оптимизатор на квантовых вычислениях, позволяет эффективно справляться с задачами управления даже в экстремальных условиях, в которых с задачей управления не справляются нечеткие регуляторы лежащие в основе квантовых нечетких выводов.

ОБЩИЕ ВЫВОодЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Основные научные и практические результаты, заключаются в следующем:

- развита технология проектирования интеллектуальных систем управления на основе мягких и квантовых вычислений, которая может быть использована и для бортовых интеллектуальных систем управления автономных роботов;
- разработан многокритериальный генетический алгоритм для проектирования баз знаний встраиваемых нечетких регуляторов для автономных систем управления;
- предложен новый метод верификации математической модели объекта управления с недоопределенными параметрами на основе генетического алгоритма и физического сигнала с реального объекта управления, который позволяет использовать дополнительный информационный ресурс для формирования обучающего сигнала при проектировании нечетких и квантовых регуляторов;
- на основе предложенного метода верификации и многокритериального генетического алгоритма, была разработана информационная технология проектирования нечеткого регулятора;
- разработанная технология проектирования нечеткого регулятора на основе физически измеряемого сигнала и оптимизатора баз знаний на мягких вычислениях, которая в значительной степени устраняет субъективизм при формировании баз знаний и позволяет проектировать интеллектуальные системы управления без использования традиционной математической модели объекта управления.
- был реализован программный продукт, который является основой первого этапа технологии проектирования самоорганизующихся интеллектуальных систем управления, основой которого является разработанный многокритериальный генетический алгоритм и метод формирования обучающего сигнала с реального объекта управления;
- разработана модель квантового нечеткого вывода, позволяющая вводить принцип самоорганизации баз знаний в процесс проектирования интеллектуальных систем управления;
- на основе разработанной модели квантового алгоритма, был реализован программный продукт, позволяющий проектировать квантовую алгоритмическую ячейку для интеллектуальной системы управления автономных роботов;
- использование интеллектуальных регуляторов на основе представленной технологии проектирования рекомендуется для повышения робастности при управлении

- автономными, слабо формализованными и слабо структурированными объектами управления, в нештатных и непредвиденных ситуациях;
- на основе проведенных экспериментов с математической моделью и натурным макетом и объекта управления можно сделать следующие выводы:
 - установлена степень влияния выбора типа интеллектуальных вычислений на уровень робастности системы управления;
 - показано и подтверждено экспериментально и теоретически существование синергетического эффекта самоорганизации в процессе формирования робастной базы знаний из спроектированных не робастных баз знаний, что свидетельствует о возникновении дополнительного информационного ресурса в базах знаний интеллектуальных систем управления, основанного на извлечении скрытой в классических состояниях квантовой информации;
 - продемонстрировано эффективность квантового алгоритма управления самоорганизацией робастных баз знаний в условиях непредвиденных ситуаций управления как нового направления в теории управления.
 - показана возможность реализации квантовых типов вычислений на классическом процессоре, что позволяет ввести свойство самоорганизации нечетких регуляторов в структуру интеллектуальной системы управления;
 - показано что реализация квантовых типов вычислений на классическом процессоре позволяет ввести свойство самоорганизации нечетких регуляторов в структуру интеллектуальной системы управления и повысить робастность системы управления.
 - реализованный программный комплекс имеет самостоятельное значение, как проблемно независимое средство разработки интеллектуальных систем управления на основе мягких и квантовых вычислений, и подходит для решения задачи функционирования системы управления в нештатных и непредвиденных ситуациях управления;
 - программный комплекс также может быть рекомендован для проведения лабораторных работ по специальностям «системы управления», «робототехника», «интеллектуальные информационные системы».

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Ariyono S. Intelligent electromechanical CVT ratio controller: Adaptive artificial neural network controller for electromechanical continuously variable transmission. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 208 p.
2. Behera L., Kar I. Intelligent systems and control principles and applications. USA: Oxford University Press, 2010. 456 p.
3. Benenti G., Casati G., Strini G. Principles of quantum computation and information. Singapore: World Scientific, 2004. 256 p.
4. Blencowe M. Quantum electromechanical systems. Physics Reports, 2004, Vol. 395, № 3, p. 159–222.
5. Borzi A. et al., Optimal quantum control in nanostructures: Theory and application to a generic three-level system. Physical Review, 2002, Vol. A66, № 5, p. 5-7.
6. Brylinski F. K., Chen G. Mathematics of quantum computation. Boca Raton: CRC Press, 2002. 448 p.
7. Castillo O. Type-2 fuzzy logic in intelligent control applications. Berlin: Springer, 2011. 188 p.
8. Chen G., Diao C. Mathematical Theory of Quantum Computation. N. Y.: Chapman Hall CRC, 2013. 320 p.
9. Chen Y. Dynamical modelling of space tether flexible motorised momentum exchange tether and hybrid fuzzy sliding mode control for spin-up. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2010. 388 p.
10. Chiang C.H. Soft computing based intelligent control systems and applications: The lifelong learning control systems. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 156 p.
11. Cortesão R. Kalman techniques for intelligent control systems: Theory and robotic experiments. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2010. 240 p.
12. Deutsch D., Jozsa R., Rapid solution of problems by quantum computation, Proceedings of the Royal Society of London, 1992, Series A, 439. p. 553 - 558
13. Feng G. Analysis and synthesis of fuzzy control systems: A model-based approach. Boca Raton.: CRC Press, 2010. 299 p.
14. Gaeid, K. S. et al. Modeling & fault diagnosis of IM by using intelligent control. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 184 p.
15. Giuntini R. et al. Some generalizations of fuzzy structures in quantum computational logic. Intern. J. General Systems, 2011, Vol. 40, № 1, p. 61–83.

16. Houck A. A. et al. On-chip quantum simulation with superconducting circuits. *Nature Physics*, 2012, Vol. 8, p. 292–299.
17. Ionescu, C. M. MATLAB – A Ubiquitous tool for the practical engineer. Rijeka, Croatia: In Tech, 2011. 546 p.
18. Ivancevic V. G., Ivancevic T.T. Quantum neural computation. Tokyo: Springer Verlag, 2009. 913 p.
19. Jaeger G. Quantum Information: An overview. N. Y.: Springer Verlag, 2007. 284 p.
20. Jalali K. Stability control of electric vehicles with in-wheel motors: A new approach using soft computing techniques. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 308 p.
21. Janzing D. Computer science approach to quantum control. Habilitation: Univ. Karlsruhe (TH) Publ. Germany, 2006. 137 p.
22. Johnson M. W. et al. Quantum annealing with manufactured spins. *Nature*, 2011, Vol. 473. p. 194–198.
23. Kai M. et al. Fuzzy control: Fundamentals, stability and design of fuzzy controllers. Berlin.: Springer, 2006. 411 p.
24. Kaur A. Fuzzy logic and neuro fuzzy algorithms for air conditioning system: Comparison of techniques. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 96 p.
25. Kaye P. et al. An introduction to quantum computing. N. Y.: Oxford. Uni. Press, 2007. 288 p.
26. Kaynak O. et al. Computational intelligence: Soft computing and fuzzy-neuro integration with applications. Berlin: Springer-Verlag, Vol. 162, 1998. 542 crp.
27. Keil M. Fundamentals of quantum information theory. *Physical Reports*, 2002, V. 369, № 5, p. 431 - 548
28. Khrennikov A. Representation of the Kolmogorov model having all distinguishing features of quantum probabilistic model. *Physics Letters*, 2003, V. 316. № 5, p. 279 - 296
29. Khuntia P. Intelligent control strategies for aircraft and other dynamic systems. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2010. 192 p.
30. Kitaev A. Yu. Classical and quantum computation. N. Y.: American Mathematical Soc., 2002. 257 p.
31. 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, Vol. 64, № 1, p. 76–94.
32. Kuljaca O. et al. Intelligent control of industrial and power systems: Adaptive neural network and fuzzy systems. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 204 p.

33. Lanzagorta M., Uhlmann J. Quantum computer science. San Rafael, California: Morgan & Claypool Publ., 2009. 108 p.
34. Leite E. P. Matlab – Modelling, Programming and Simulations. Rijeka, Croatia: In Tech, 2010. 450 p.
35. Leite E. P. Scientific and engineering applications using MATLAB. Rijeka, Croatia: In Tech, 2011. 204 p.
36. Litvintseva L. V., Ulyanov S. V. Quantum fuzzy inference for knowledge base design in robust intelligent controllers. J. of Computer and Systems Sciences Intern, 2007, Vol. 46, № 6, p. 908–961.
37. Luo M. Advanced intelligent vehicles control: by considering natural environment impacts: simulation in a virtual reality platform. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 184 p.
38. Lutfy O. F. Design of an intelligent control system for conveyor-belt grain dryers: An application of soft computing techniques in grain drying systems. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2012. 244 p.
39. Michałowski T. Applications of MATLAB in science and engineering. Rijeka, Croatia: In Tech, 2011. 510 p.
40. Nasir A., et al. 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.
41. 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.
42. Nicolis G., Prigogine I. Self-organization in nonequilibrium systems: From dissipative structures to order through fluctuations. N.Y.: Wiley, 1977. 512 p.
43. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge Univ. Press, UK. 2000. 700 p.
44. Patel J., Gianchandani R. ANFIS control for robotic manipulators: Adaptive neuro fuzzy inference systems for intelligent control. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 88 p.
45. Patent PCT WO 2013/0096698 A1, US 13,273,783, Self-organization quantum robust control methods and systems for situations with uncertainty and risk / Ulyanov S. V. Publ. Date – 14.10.2010; Date of Patent. Apr. 18, 2013.

46. Patent PCT WO 2005/013019 A3, US 7,219,087 B2, Soft computing optimizer of intelligent control system structures / Ulyanov S. V. et al. Publ. Date 10.02.2005; Date of Patent. May 15, 2007.
47. Patent US 6,609,060 B1. System for intelligent control of an engine based on soft computing / Ulyanov S.V., Hasimoto S., Yamaguchi M. Publ. Date 08.11.1999; Date of Patent. Feb. 2, 2001.
48. Patent US 2006/0218108 A1. System for soft computing simulation / Ulyanov S. V. et al. Date of Patent. Sept. 28, 2006.
49. Patent US 2004/0024750 A1. Intelligent mechatronic control suspension system based on quantum soft computing / Ulyanov S.V., Hagiwara T., Litvintseva L.V. et al. 2004.
50. Pati A.K. General impossible operations in quantum information. Phys. Review, V. A66, № 6, 2002 // <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevA.66.062319> (дата посещения 10.02.2009 г.).
51. Perdomo-Ortiz A. et al. Filing low-energy conformations of lattice protein models by quantum annealing. Scientific Reports. 2012. p. 1–7. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/22891157> (дата посещения 17.03.2014).
52. Perutka K. MATLAB for Engineers – Applications in control, electrical engineering, IT and robotics. Rijeka, Publisher: InTech, 2011. 524 p.
53. Ponce-Cruz P. Intelligent control systems with LabVIEW™. Berlin: Springer Verlag, 2010. 218 p.
54. Shapiro M., Brumer M. Quantum control of bound and continuum state dynamics. Physics Reports. 2006. Vol. 425. p. 195–264.
55. Shin Y. C., Xu Ch. Intelligent systems: Modeling, optimization, and control (Automation and Control Engineering). Boca Raton: CRC Press, 2008. 456 p.
56. Shor P. W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. Foundations of Computer Science: Conference Publications, 1994. p. 124–134.
57. Sumathi S. P. Computational intelligence paradigms: Theory and applications using MATLAB. N.Y.: CRC Press, 2010. 851 p.
58. Szederknyi G., Lakner R., Gerzson M. Intelligent control systems: An introduction with examples. The Netherlands: Kluwer Acad. Publ., 2002. 306 p.
59. Ulyanov I.S., Litvintseva L.V., Ulyanov S.V. Design technology of robust KB for integrated fuzzy intelligent control based on quantum fuzzy inference: Inverted pendulum as Benchmark of quantum fuzzy control in unpredicted control situations. Proceedings 4th Internat. Conf. ICSCCW'2007. Antalya, Turkey, 2007. p. 219 – 237.

60. Ulyanov S.V., **Reshetnikov A.G.**, Kerimov T.A., Intelligent Robust Robotic Controllers: SW & HW Toolkit of Applied Quantum Soft Computing, Computer Science Journal of Moldova, vol.21, no.3(63), 2013. p. 360 – 390.
61. Ulyanov S.V. Quantum soft computing in control process design: genetic algorithms and quantum neural network approaches. Proceedings:World Automation Congress (WAC'2004): Soft computing with Industrial Applications. Seville. Spain. 2004. V. 17. p. 99 – 104.
62. Ulyanov S.V. Self-organization of robust intelligent controller using quantum fuzzy inference. Proceedings IEEE 2nd Intern. Conf. ISKE'2008. Xiamen, 2008. V. 1. p. 726 – 732.
63. Ulyanov S.V. et al. Physical limits and information bounds of micro-control. Pt 2: Quantum soft computing and quantum search algorithms. Proceedings Internat. Symp. Micro-machine and Human Science (MHS'98). Nagoya. Japan. 1998. p. 217 – 224.
64. Ulyanov S.V. et al. Information analysis of quantum gates for simulation of quantum algorithms on classical computers. Proceedings Intern. Conf. on Quantum Communication, Measurements and Computing (QCM&C'2000). Capri. Italy, 2000. Kluwer Acad. Plenum Publ. – 2001. p. 207 – 214.
65. Ulyanov S.V. et al. Design of self-organized intelligent control systems based on quantum fuzzy inference: Intelligent system of systems engineering approach. Proc. IEEE Intern. Conf. SMC'2005. Hawaii, USA. 2005. V. 4. p. 3835 – 3840.
66. Ulyanov S.V. et al. Principle of minimum entropy production in applied soft computing for advanced intelligent robotics and mechatronics. Soft Computing. 2000. V. 4. № 3. p. 141– 146.
67. Ulyanov S.V. et al. Applied quantum soft computing for global optimization and robust control design: Methodological approach. Proceedings 4th Internat. Conf. on Applications of Fuzzy Systems and Soft Computing (ICAFS' 2000). Siegen. Germany. 2000. p. 190 – 213.
68. Ulyanov S.V. et al. Computational intelligence with quantum game's approach and robust decision-making in communication information uncertainty. Proceedings of Internat. Conf. on Computational Intelligence (ICCI'2004). Nicosia. North Cyprus. 2004. p. 172 – 187.
69. Ulyanov S.V. et al. Quantum information and quantum computational intelligence: Backgrounds and applied toolkit of information design technologies. Milan: Note del Polo (Ricerca), Universita degli Studi di Milano. 2005. p. 78 – 86.
70. Ulyanov S. V. et al. Stochastic analysis of time-variant nonlinear dynamic systems. Pt 1: the Fokker-Planck-Kolmogorov equation approach in stochastic mechanics. Probabilistic Engineering Mechanics. 1998. Vol. 13. № 3. p. 110–113.
71. Valerio D., Ninteger V. 2.3 fractional control toolbox for MatLab. Univ. Techn. Lisboa Inst. Superior Technico, 2005. 96 p.

72. Xiang Z. L. et al. Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems. *Reviews of Modern Physics*. 2013. Vol. 85. № 2. 623 p.
73. Yanofsky N. S., Mannucci M. A. *Quantum Computing for Computer Scientists*. Cambridge: Cambridge University Press, 2008. 368 p.
74. Yemelyanov S.V., Burovoi I.F., Levada F.Yu, Control of Indefinite Nonlinear dynamic systems. Induced internal feedback. *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, 231, Springer, 1998. 196 p.
75. You J. Q., Nori F. Atomic physics and quantum optics using superconducting circuits. *Nature*. 2011. Vol. 474. p. 589–597.
76. Zadeh L. A. Knowledge representation in fuzzy logic. *IEEE Trans, on Knowledge and Data Eng*, 1989. V. 1. № 1. p. 89 – 100.
77. Zadeh L. A. Fuzzy Sets. *Information and Control*. 1965. Vol.8. p. 338 – 353.
78. Zdenko K., Bogdan S. *Fuzzy controller design: Theory and applications*. Boca Raton.: CRC Press, 2006. 85 p.
79. Аверкин А. Н., Федосеева И.Н. Параметрические логики в интеллектуальных системах управления. Москва: ВЦ РАН, 2000. 120 стр.
80. Алиев Р. А., Алиев Р.Р. Теория интеллектуальных систем. Баку: Чашигоглу, 2001. 412 стр.
81. Алиев Р. А., Церковный А. З., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. Москва: Энергоатомиздат, 1991. 240 стр.
82. Антамошин А. Н. и др. Интеллектуальные системы управления организационно-техническими системами. Москва: Горячая Линия – Телеком, 2006. 160 стр.
83. Асадуллин В., Утляков Г. Интеллектуальные системы управления: Комбинированные системы регулирования напряжения с элементами искусственного интеллекта для бесконтактных синхронных генераторов. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2011. 156 стр.
84. Афонин В. А., Макушкин В. А. Интеллектуальные роботы. Москва: Машиностроение, 2005. 237 стр.
85. Буреш О. В., Жук М. А. Интеллектуальные информационные системы управления социально-экономическими объектами. Краснодар: Красанд, 2012. 192 стр.
86. Васильев В. В., Симак Л. А. Дробное исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем. Киев: НАН Украины, 2008. 256 стр.
87. Васильева С.Н. Интеллектуальные системы управления. М.: Машиностроение, 2010. 535 стр.

88. Гаврилов А. В. Гибридные интеллектуальные системы. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. 164 стр.
89. Гольденблат И. И., Ульянов С. В. Введение в теорию относительности и ее приложения в новой технике. М.: Физматлит, 1979. 272 стр.
90. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления. Киев: Радиоіатор, 2008. 972 стр.
91. Евгеньев Г. Б. Интеллектуальные системы проектирования. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2009. 336 стр.
92. Емельянов С. В. Теория систем с переменной структурой. М.: Наука, 1970. 592 стр.
93. Емельянов С. В. Новые типы обратной связи: управление при неопределенности. М.: Наука, Физматлит, 1997. 352 стр.
94. Емельянов С.В., Коровин С.К., Никитин С.В. Глобальная управляемость и стабилизация нелинейных систем. Матем. Моделирование, 1989, 1:1, стр.51 – 90.
95. Жданов А. А. Автономный искусственный интеллект. М.:БИНОМ лаб. знаний, 2008. 359 стр.
96. Заде Л.А. Основы нового подхода к анализу сложных систем и процессов принятия решений. В кн.: Математика сегодня. М.: Знание, 1974. стр. 5 – 49.
97. Заде Л.А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. Пер. с англ. Под ред. Н.Н. Моисеева. М.: Мир, 1976. 165 стр.
98. Керимов Т.А., **Решетников А.Г.** Робастное интеллектуальное управление динамически неустойчивым объектом: оптимизатор баз знаний на мягких вычислениях, VII Международная Научно-практическая конференция «Интегрированные модели и мягкие вычисления в искусственном интеллекте», Труды конференции Т.3, г. Коломна, 2013. 1100-1111 стр.
99. Красовский А. А. Проблемы физической теории управления. Автоматика и Телемеханика. 1990. № 11. стр. 3–28.
100. Кулаков С. М., Трофимов В. Б. Интеллектуальные системы управления технологическими объектами: Теория и практика. Новокузнецк: СибГИУ, 2009. 222 стр.
101. Лебедев Г. Н. Интеллектуальные системы управления и их обучение с помощью методов оптимизации: учеб. пособие. М.: МАИ, 2002. 112 стр.
102. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Интеллектуальные системы управления. I. Квантовые вычисления и алгоритм самоорганизации. Изв. РАН, ТиСУ, 2009, № 6. стр. 69 – 97.
103. Литвинцева Л.В. и др. Квантовый нечеткий вывод для создания баз знаний в робастных интеллектуальных регуляторах. Изв. РАН, ТиСУ, 2007, № 6. стр.71 – 126.

104. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Проектирование робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. Изв. РАН, ТиСУ, 2006, № 5. стр. 102 – 141.
105. Литвинцева Л. В. и др. Построение робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. Изв. РАН, ТиСУ, 2006, № 4. стр. 69–97.
106. Лукьянов А. А. Интеллектуальные задачи мобильной робототехники. Иркутск: ИГУ, 2005. 312 стр.
107. Макаров И. М. и др. Искусственный интеллект и интеллектуальные системы управления. М.: Наука, 2006. 316 стр.
108. Моисеев Н.Н. Численные методы в теории оптимальных систем. М.:Наука, 1971. 424 стр.
109. Моисеев Н.Н. Элементы теории оптимальных систем. М.: Наука, 1975. 528 стр.
110. Никифоров В. О., Слита О. В., Ушаков А. В. Интеллектуальное управление в условиях неопределенности: учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2011. 226 стр.
111. Николаенко Н. А., Ульянов С.В. Статистическая динамика машиностроительных конструкций. М.: Машиностроение, 1977. 368 стр.
112. Панфилов С. А. и др. Программная поддержка процессов формирования, извлечения проектирования баз знаний робастный интеллектуальных систем управления. Программные продукты и системы, 2004. № 2, стр.2–10
113. Петров Б. Н., Уланов Г. М., Ульянов С. В. Алгоритмическая сложность и информационная теория управления. Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. М.: ВИНТИ АН СССР, 1979, Т. 11, стр. 77–147.
114. Петров Б. Н., Уланов Г. М., Ульянов С. В. Проблемы управления релятивистскими и квантовыми динамическими системами: Информационные и термодинамические аспекты. М.: Наука, 1982. 526 стр.
115. Петров Б. Н. и др. Теория моделей в процессах управления: Информационный и термодинамический аспекты. М.: Наука, 1978. 224 стр.
116. Петров Б. Н., Уланов Г. М., Ульянов С. В. Динамические системы со случайной и нечеткой структурами. Итоги науки и техники. Техническая кибернетика. М.: Наука, 1979. стр. 3–76.
117. Поляхов Н. Д. и др. Интеллектуальные системы управления : учеб. пособие. СПб.: СПбГЭТУ ЛЭТИ, 2010. 115 стр.

118. Попов Е. П. Автоматическое регулирование и управление. М.: Наука, физ. мат. лит., 1966. 388 стр.
119. Пупков К.А. Интеллектуальные системы: проблемы теории и практики. Известия ВУЗов. Приборостроение, 1994, № 9 (10). стр.3 – 5.
120. Пупков К.А., Егупов Н.Д. Методы классической и современной теории автоматического управления: в 5 т. Т. 5. Методы современной теории автоматического управления. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 784 стр.
121. Пупков К. А. Современные методы, модели и алгоритмы интеллектуальных систем : учеб. пособие. М.: РУДН, 2008. 154 стр.
122. Пятковский О. И. Интеллектуальные информационные системы (нейронные сети) : учеб. пособие. Барнаул: АлтГТУ, 2010. 125 стр.
123. **Решетников А. Г.**, Ульянов С. В., Шоланов К. С. Робастное интеллектуальное управление физическим динамически неустойчивым объектом управления «Каретка – перевернутый маятник». Ч.2: Технологии квантовых вычислений, «Системный анализ в науке и образовании», 2013. №1. <http://sanse.ru/download/155>, (дата посещения 30.11.2015).
124. **Решетников А. Г.** Робастное интеллектуальное управление динамически неустойчивым объектом управления, труды конференции: Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту,. Том 4, г. Белгород, 2012. стр.8-15.
125. **Решетников А.Г.**, Взаимодействие интеллектуальных робототехнических систем, «Системный анализ в науки и образовании», №3, 2015, <http://sanse.ru/download/246>, (дата посещения 30.11.2015).
126. **Решетников А.Г.**, Интеллектуальное управление роботом на основе технологии дистанционной передачи баз знаний, «Системный анализ в науки и образовании», №3, 2015, <http://sanse.ru/download/245>, (дата посещения 30.11.2015).
127. **Решетников А.Г.**, Ульянов С. В., Метод извлечения знаний из физически измеряемого сигнала обучения: проектирование баз знаний нечеткого регулятора, «Системный анализ в науке и образовании», №1, 2013, <http://sanse.ru/download/154>, (дата посещения 30.11.2015).
128. **Решетников А. Г.** и др. Технологии мягких вычислений в интеллектуальном управлении, «Программные продукты и системы», 2013. № 4, стр. 186 – 191.
129. **Решетников А. Г.** и др. Робастное интеллектуальное управление с применением технологии мягких квантовых вычислений. Программные продукты и системы, 2013. № 4, стр. 191 – 198.

130. Рыжов А.П. Элементы теории нечетких множеств и ее приложений. ДиалогМГУ, 2003. 81 стр.
131. Сорокин С.В., и др. Архитектура подсистемы нечеткого вывода для оптимизатора баз знаний, «Программные продукты и системы», 2013. № 1, стр. 21 – 25.
132. Срагович В. Г. Адаптивное управление. М.: Наука, Гл. ред. физ. мат. лит., 1981. 384 стр.
133. Тарасик В. П., Рынкевич С. Интеллектуальные системы управления автотранспортными средствами. М.: Технопринт, 2012. 512 стр.
134. Ульянов С. В., и др. Генетические и квантовые алгоритмы. Ч.1: Инновационные модели в обучении, «Системный анализ в науке и образовании», №3, 2010, <http://sanse.ru/download/70>, (дата посещения 30.11.2015)
135. Ульянов С. В., **Решетников А. Г.**, Решетников Г.П. Технологии интеллектуальных вычислений. Квантовые вычисления и программирование в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления, Дубна: ОИЯИ, 2015. 246 стр.
136. Ульянов С. В., **Решетников А. Г.**, Николаева А.В., Интеллектуальные системы управления в непредвиденных ситуациях, Оптимизатор баз знаний на мягких вычислениях, LAP LAMBERT Academic Publishing, OmniScriptum GmbH & Co. KG 2014, 372 стр.
137. Ульянов С. В, и др. Информационная технология проектирования баз знаний нечетких регуляторов. Ч.3: Квантовый нечеткий вывод и квантовая информация, "Системный анализ в науке и образовании", №3, 2010, <http://sanse.ru/download/69>, (дата посещения 30.11.2015).
138. Ульянов С. В., Албу В. А., **Решетников А. Г.** Квантовый оптимизатор баз знаний. Интеллектуальные самоорганизующиеся робастные встраиваемые контроллеры и системы управления, LAP LAMBERT Academic Publishing, OmniScriptum GmbH & Co. KG 2014, 270p.
139. Ульянов С. В., Литвинцева Л. В., Сорокин С. В. Робастность баз знаний самоорганизующихся интеллектуальных регуляторов в непредвиденных ситуациях управления. Нечеткие системы и мягкие вычисления, 2008, Т.3, № 4. стр. 49 – 73.
140. Ульянов С. В., Литвинцева Л. В., Сорокин С. В., Квантовые вычисления и алгоритм самоорганизации баз знаний интеллектуальных систем управления. Нечеткие системы и мягкие вычисления, 2008, Т.3, №3. стр. 7 – 24
141. Ульянов С. В. и др. Интеллектуальное робастное управление: Технологии мягких вычислений, М.: ВНИИГеосистем, 2011. 408 стр.
142. Ульянов С. В. и др. Информационная технология проектирования робастных баз знаний нечетких регуляторов. Ч. 1. Применение мягких вычислений, Системный анализ в науке и образовании, №3, 2010. <http://sanse.ru/download/67>, (дата посещения 30.11.2015).

143. Ульянов С. В. и др. Логические и квантовые парадоксы интеллектуальных квантовых и мягких вычислений, Системный анализ в науке и образовании, № 2, 2010. <http://sanse.ru/download/58>, (дата посещения 30.11.2012).
144. 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, № 4, 2011. <http://sanse.ru/download/111>, (дата посещения 30.11.2013).
145. Ульянов С. В. Физические модели интеллектуальных процессов управления: Квантовые, релятивистские и информационно-термодинамические аспекты : автореф. дис. на соиск. учен. степ. д.ф.-м.н. М.: ИФТП АН СССР, 1992. 240 стр.
146. Усков А. А., Кузьмин А. В., Интеллектуальные технологии управления: Искусственные нейронные сети и нечеткая логика, М.: Горячая ЛинияТелеком, 2004. 143 стр.
147. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем, изд. 2-е, испр. и доп. М.: Наука, 1966, 623 стр.
148. Фрадков В. Н. Адаптивное управление динамическими объектами, М.: Наука, Гл. ред. физ. мат. лит. 1981, 448 стр.
149. Холево А.С., Введение в квантовую теорию информации, М.: МЦНМО, 2002. стр. 127
150. Швецов А. Н. Интеллектуальные информационные системы. Вол: ВоГТУ, 2009. 174 стр.
151. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия–Телеком, 2007. 288 стр.
152. Ярушкина Н. Г. Основы теории нечетких и гибридных систем. М.: Финансы и статистика, 2004. 320 стр.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. 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. П1.1 [127]).

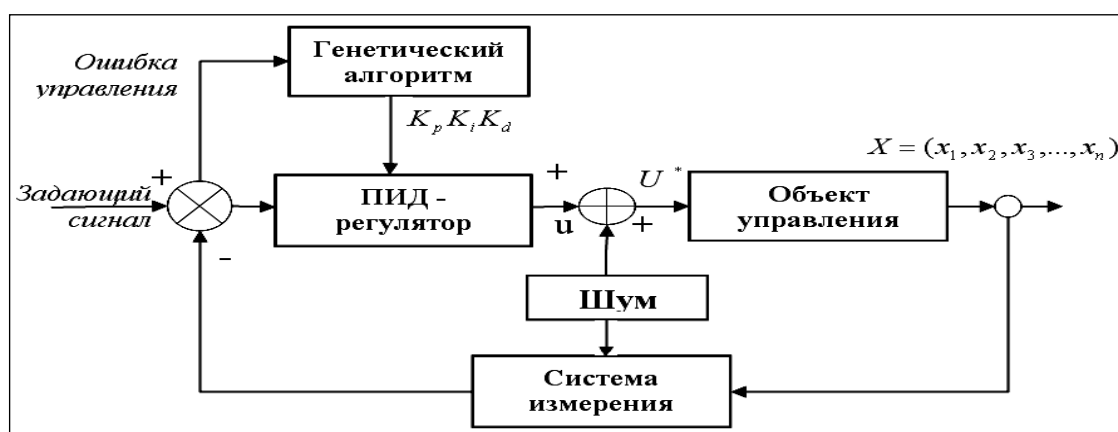


Рис.П1.1. Блок-схема САУ с системой адаптации

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:

$$f(x_r) = \frac{1}{1 + t \cdot \int_0^T e^2 dt}, \quad (\text{П.1.1})$$

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 должно 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. П1.2 [127]).

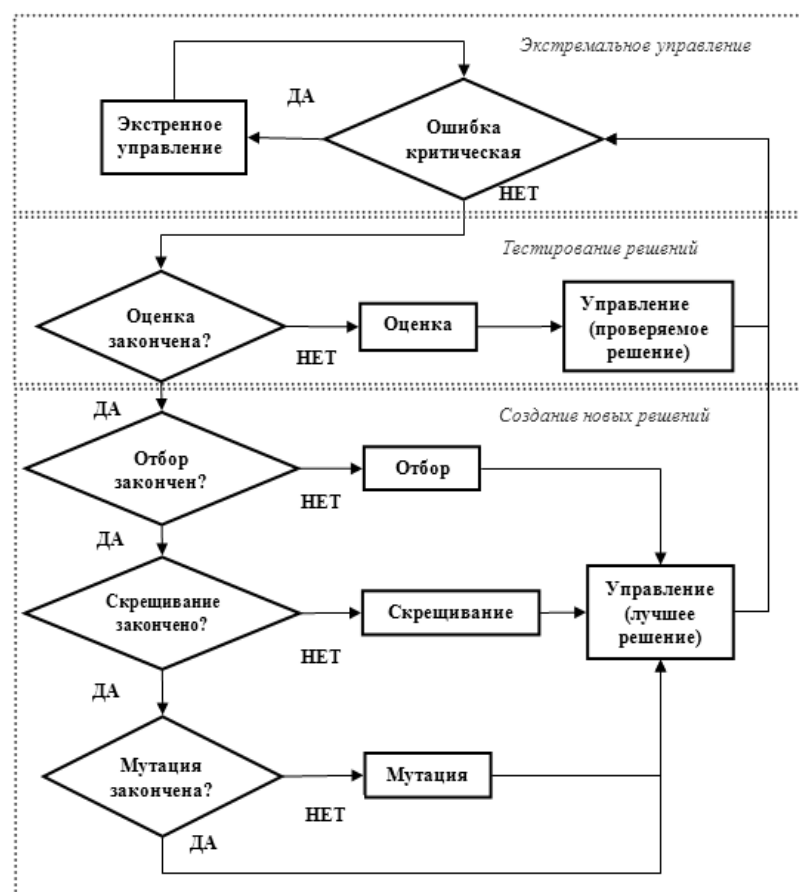


Рис. П1.2. Алгоритм адаптации ГА – ПИД-регулятора

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 .

Графики изменения коэффициентов такой системы управления представлены на рис. П1.3 [127].

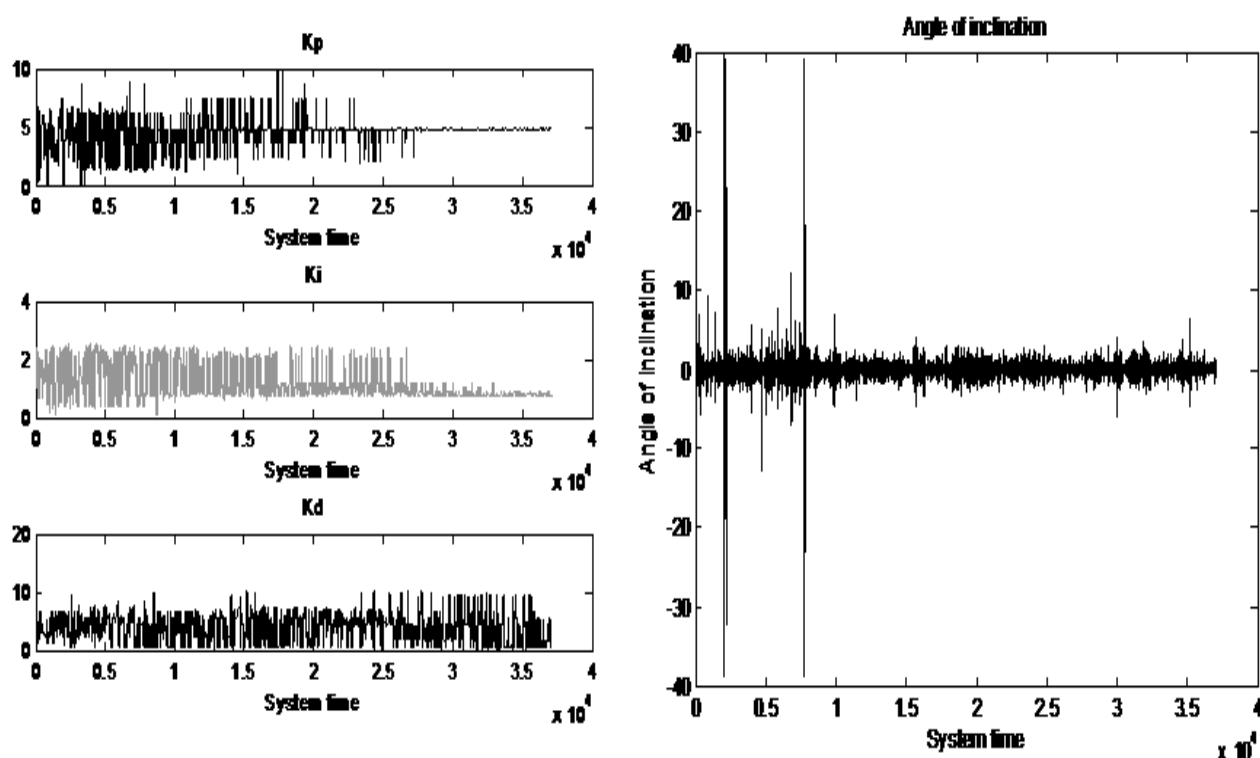


Рис. П1.3. Слева – коэффициенты ГА – ПИД-регулятора в экспериментах с макетом, справа – угол отклонения макета ГА – ПИД-регулятора

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 [139]. Полученные экспериментальные результаты показывают, что система управления на основе ГА – ПИД - регулятора уступает в росте интегральной квадратичной ошибки ПИД - регулятору.

Связан этот факт с самим процессом адаптации робота: снижая качество управления, ГА – ПИД - регулятор повышает свою адаптивность.

Как можно видеть на рис. П1.3, в процессе функционирования коэффициенты усиления сошлись со следующими значениями $k_P = 4.9$, $k_I = 0.7$, $k_D = 4$.

Приложение 2. Эволюция типовых структур интеллектуальных систем управления

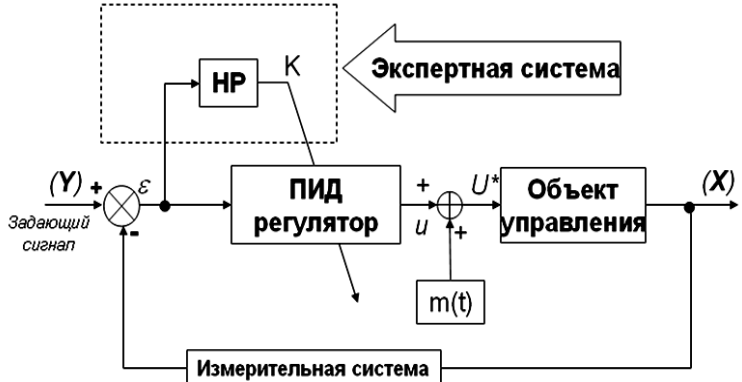
В приложении приводится таблица П2.1 - Эволюция процесса проектирования структур робастных ИСУ и взаимосвязь с классической теорией управления. Представлены преимущества и недостатки соответствующих этапов.

Таблица П2.1. [141]

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

Структуры систем управления и эволюция развития	Уровни качества управления	Преимущества	Предельные возможности
Базовый элемент САУ	Устойчивость Управляемость Точность управления	- простота моделирования и физической реализации (min сложность); - простота при HW реализации; - при минимальной сложности ОУ минимально обеспечивает устойчивость и управляемость; - гарантирует необходимые условия качества управления, но не достаточные	- 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.

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

Структуры систем управления и эволюция развития	Уровни качества управления	Преимущества	Предельные возможности
Интеллектуальные системы управления, основанные на знаниях 	Устойчивость Управляемость Точность управления Частичная адаптация	- простота и эффективность управления сложными ОУ; - легко проектируется и реализуется современными технологиями СБИС; - высокая надежность в эксплуатации; - используется в построении робастных БЗ.	- 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, т.к. отсутствует конструктивный алгоритм формирования БЗ; - требует большого количества времени для построения логических правил нечеткого вывода.

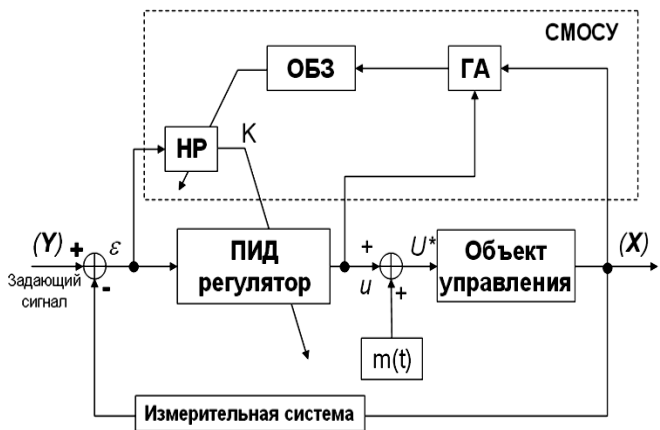
Эволюция процесса проектирования структур робастных ИСУ и взаимосвязь с классической теорией управления

Структуры систем управления и эволюция развития	Уровни качества управления	Преимущества	Предельные возможности
Блок извлечения знаний и формирования БЗ <pre>graph LR Y["(Y) Задающий сигнал"] -- "+" --> Sum1(()) Sum1 -- "ε" --> PID["ПИД регулятор"] PID -- "U" --> Sum2(()) m["m(t)"] -- "+" --> Sum2 Sum2 -- "U*" --> Obj["Объект управления"] Obj -- "X" --> Out["(X)"] Out --> Meas["Измерительная система"] Meas -- "-" --> Sum1 subgraph KB ["Блок извлечения знаний и формирования БЗ"] GA["ГА"] --> NNS["ННС"] NNS --> FL["НР"] end KB -- "К" --> PID</pre>	Устойчивость Управляемость Точность управления Адаптация	- позволяет частично исправить недостатки базового уровня ИСУ и достигнуть требуемого уровня адаптации в фиксированных условиях функционирования ОУ.	- не обладает достаточной робастностью и устойчивостью; - использует информацию об ошибке управления и не использует информацию о динамическом поведении НР и ОУ.

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

Структуры систем управления и эволюция развития	Уровни качества управления	Преимущества	Предельные возможности
Интеллектуальная обратная связь Задающий сигнал (Y) enters a summing junction with error ε. The error signal is fed into the ПИД регулятор (PID controller). The ПИД регулятор also receives a reference signal U^* and outputs a control signal u. The control signal u is summed with U^* to produce the system input. The system output (X) is measured by the Измерительная система (measuring system) and fed back to the error summing junction. A block $m(t)$ is also shown in the feedback path. Inside a dashed box labeled СМОСУ (Self-Organizing Management System), the ННС (Neural Network) outputs a gain K to the ПИД регулятор, and the ГА (Genetic Algorithm) receives the output X and outputs the reference U^*.	Устойчивость Управляемость Точность управления Адаптация Обучение Частичная самоорганизация	- обратная интеллектуальная связь позволяет извлекать объективные знания и построить БЗ НК; - позволяет охватить новый уровень качества управления (частичная самоорганизация).	- ННС не гарантирует требуемую точность аппроксимации обучающего сигнала с выхода ГА; - при резком изменении внешних условий повышает чувствительность ОУ (снижает робастность).

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

Структуры систем управления и эволюция развития	Уровни качества управления	Преимущества	Предельные возможности
Оптимизатор БЗ на мягких вычислениях 	Устойчивость Управляемость Точность управления Адаптация Обучение Самоорганизация заданного уровня	- 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.	- 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.

Приложение 3. Терминологический глоссарий

Автоматизированная система управления — комплекс аппаратных и программных средств, а также персонала, предназначенный для управления различными процессами в рамках технологического процесса, производства, предприятия.

База знаний — база данных, содержащая правила вывода и информацию о человеческом опыте и знаниях в некоторой предметной области.

Генетический алгоритм — это эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путём случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе.

Глобальная отрицательная обратная связь — вид обратной связи, при котором изменение выходного сигнала системы приводит к такому изменению входного сигнала, которое противодействует первоначальному изменению. Иными словами, отрицательная обратная связь — это такое влияние выхода системы на вход («обратное»), которое уменьшает действие входного сигнала на систему;

Интеллектуальные вычисления — методы и системы искусственного интеллекта, направленные на усиление и поддержку приближения к аналитическим возможностям естественного интеллекта. К интеллектуальным вычислениям относятся квантовые вычисления, когнитивные вычисления, мягкие вычисления.

Информационная система — система, предназначенная для хранения, поиска и обработки информации и применения соответствующих организационных ресурсов (человеческие, технические, финансовые и т. д.), которые обеспечивают и распространяют информацию;

Интеллектуальная система управления — системы автоматического управления, в которых процесс принятия решений и формирование управляющих воздействий осуществляется с использованием механизмов извлечения, приобретения, обработки и использования информации, понимаемой как “знание”. Ядром интеллектуальной системы управления является база знаний.

Информационная технология — процессы, методы поиска, сбора, хранения, обработки, предоставления, распространения информации и способы осуществления таких процессов и методов.

Квантовый алгоритм — представляет собой классический алгоритм, который задает последовательность унитарных операций с указанием, над какими именно кубитами их надо совершать; определяет непосредственно качество исследуемой функции.

Квантовая алгоритмическая ячейка — модель вычислений, работающая на небольшом количестве кубитов состоящая из квантовых операторов, предназначенных для реализации на цифровых или аналоговых схемах.

Квантовый бит (кубит) — квантовый разряд или наименьший элемент для хранения информации в реализации квантовых вычислений. Кубиты могут находиться в состоянии, являющемся суперпозицией 0 и 1. Несколько кубитов могут быть в запутанном состоянии (англ. entangled).

Квантовые вычисления — теоретические и практические исследования вычислительных систем, которые делают возможность использования квантово-механических явлений, таких как суперпозиция и запутанность, для выполнения операций на множестве данных.

Квантовая информация — раздел науки на стыке квантовой механики, и теории информации, включающей вопросы квантовых вычислений и квантовых алгоритмов, квантовых компьютеров и квантовой телепортации, квантовой криптографии и проблемы декогерентности. Квантовая информация представляется в кубитах. В квантовой теории информации изучаются общие принципы и законы, управляющие динамикой каналов передачи информации в сложных квантовых системах.

Мягкие вычисления — понятие, введённое Лотфи Заде в 1994 году, объединяющее в общий класс неточные, приближённые методы решения задач, зачастую не имеющие решение за полиномиальное время. Задачи, решаемые такого класса методами, возникают в области биологии, медицины, гуманитарных наук, робастного управления, менеджменте. Технологии мягких вычислений ориентированы на решение задач управления со слабо структурированными объектами управления; инструментарий мягких вычислений использует технику нечётких систем (нечёткие множества, нечёткую логику, нечёткие регуляторы), нечёткие нейронные сети, генетические алгоритмы и эволюционное моделирование.

Надёжность — свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Интуитивно надёжность объектов связывают с недопустимостью отказов в работе.

Пропорционально – интегрально – дифференциальный регулятор — программно аппаратное устройство в управляющем контуре с обратной связью. Используется в системах автоматического управления для формирования управляющего сигнала с целью получения необходимых точности и качества переходного процесса.

Робастное управление — совокупность методов теории управления, целью которых является синтез такого регулятора, который обеспечивает требуемое качество управления (к примеру, запасы устойчивости).

Система автоматического управления — комплекс устройств, предназначенный для автоматического изменения одного или нескольких параметров объекта управления с целью установления требуемого режима его работы.

ДЕКЛАРАЦИЯ ОБ ОТВЕТСТВЕННОСТИ

Нижеподписавшейся, заявляю под личную ответственность, что материалы, представленные в диссертации, являются результатом личных научных исследований и разработок. Осознаю, что в противном случае, буду нести ответственность в соответствии с действующим законодательством.

Решетников Андрей

Подпись

Число

РЕЗЮМЕ АВТОРА

Персональные данные: Решетников Андрей, 21.05.1987, Дубна, Московская обл., Российская Федерация.

Образование:

2004 – 2010 гг., Международный университет природы, общества и человека «Дубна», кафедра Системного Анализа и Управления. **Бакалавр** техники и технологии. **Специальность:** информатика и вычислительная техника. **Тема диссертации:** «Управление динамически неустойчивым объектом на основе генетического алгоритма с дискретными ограничениями»



2010 – 2012 гг., **Магистр** техники и технологии. **Специальность:** теория и математические методы системного анализа и управления в технических системах.

2013 – 2015 гг. **Докторант** Института математики и информатики Академии наук Республики Молдова.

Профессиональная деятельность:

С 2012 г. по настоящее время **ассистент** профессора. Проведение лекций и семинаров, выполнение научно – исследовательской работы. Дубна. Университет «Дубна», кафедра САУ.

С 07.2012 по 10.2015 **программист** в научно - технологическом парке «Дубна». Дубна.

Область исследования: математическое моделирование, интеллектуальные системы управления, человеко – машинные интерфейсы, квантовые и мягкие вычисления

Публикации: опубликовано 38 научных работ, в том числе 4 статьи в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ и в Computer Science Journal of Moldova, 4 учебных пособия, 2 монографии. Участвовал в работе 10 международных конференциях.

Знание языков: Русский (родной), Английский (хорошо)

Контактные данные:

Тел. +7 (916) 868-56-69

E-mail: agreshetnikov@gmail.com

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор выражает благодарность научным руководителям профессорам Гайндрику К.В. и Ульянову С.В. за поддержку и руководство в процессе проведения научных исследований и подготовке диссертационной работы.

За обсуждение научных результатов диссертации, автор благодарит сотрудников Института математики и информатики Академии наук Республики Молдова и Института Системного анализа и управления Университета «Дубна» Российской Федерации.