

**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**

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора информатики

КИШИНЕВ, 2016

Работа выполнена в Лаборатории интеллектуальных систем управления Института системного анализа и управления Государственного университета «Дубна» Российской Федерации и Лаборатории информационных систем Института математики и информатики Академии наук Республики Молдова.

Научные руководители:

1. **ГАЙНДРИК К. В.**, член-корреспондент АН РМ, доктор хабилитат информатики, профессор, Институт математики и информатики АН РМ,
2. **УЛЬЯНОВ С. В.**, доктор физ.-мат. наук, профессор, Государственный университет «Дубна», РФ.

Официальные оппоненты:

1. **РЫЖОВ А. П.**, доктор технических наук, профессор, МГУ, РФ,
2. **БУРЦЕВА Л.В.** доктор информатики, ИМИ, РМ.

Члены специализированного научного Совета:

1. **КОЖОКАРУ С. председатель**, доктор хабилитат информатики, профессор, ИМИ,
2. **ЧУБОТАРУ К. научный секретарь**, доктор информатики, ИМИ,
3. **КОЛЕСНИКОВ А.**, доктор информатики, ИМИ,
4. **БОСТАН В.**, доктор хабилитат технических наук, ТУМ,
5. **БЕШЛИУ В.**, доктор технических наук, ТУМ,
6. **ГЕРДТ В.П.**, доктор физ.-мат. наук, ОИЯИ, Дубна, РФ
7. **КОТЕЛЯ В.**, доктор хабилитат информатики, Академия экономических наук.

Защита состоится 09.06.2016 г. в 14.00 часов на заседании специализированного научного Совета **Д 01.122.03–02** при Институте математики и информатики АН Республики Молдовы по адресу: ауд. 340, ул. Академическая 5, г. Кишинёв, MD-2028, Республика Молдова.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в библиотеке Института математики и информатики АН РМ и на сайте Национального Совета по аттестации и аккредитации (www.cnaa.md).

Автореферат разослан 06.05.2016 г.

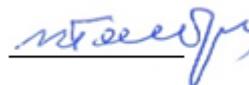
Ученый секретарь спец. научного Совета



ЧУБОТАРУ К.

Научные руководители:

доктор хабилитат информатики, профессор



ГАЙНДРИК К.,

доктор физ.-мат. наук, профессор



УЛЬЯНОВ С.

Автор



Решетников А.

© Решетников Андрей, 2016

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОРИЕНТИРЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

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

Актуальность темы и состояние вопроса

Одной из центральных и актуальных проблем современного этапа развития теории управления является разработка робастных интеллектуальных систем управления (ИСУ), 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 систем искусственного интеллекта.

Целью исследования является разработка методов программно-алгоритмической поддержки процесса моделирования, проектирования и разработки робастных ИСУ 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, мягких вычислений, теории квантовой информации и квантовых алгоритмов.

Основой исследования послужили работы, проведенные в области теории систем интеллектуального управления. Среди них работы: А.Н. Аверкина, В.И. Васильева, Ю.Г. Евтушенко, Ю.И. Журавлева, Л. Заде, Б.Г. Ильясова, П.С. Краснощекова, Л.В. Литвинцевой, И.М. Макарова, В.Ф. Мелехина, Б.Н. Петрова, К.В. Рудакова, А.П. Рыжова, А.Н. Райкова, В.Б. Тарасова, С.В. Ульянова, Ю.А. Флерова, А. В. Язенина, L. Behera, Y. Chen, E. P. Leite, P. Ponte-Cruz и др.

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 не доопределенными 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 работы

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

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

Практическая значимость результатов работы

Результаты исследования, в виде проблемно независимых программных инструментариев, могут быть использованы инженерами и специалистами при проектировании робастных ИСУ для технических систем.

Защищаемые положения

1. 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.

2. Метод верификации математической модели с недостаточно определёнными (не доопределёнными) параметрами на основе генетического алгоритма (ГА), который позволяет использовать дополнительный информационный ресурс для формирования обучающего сигнала (ОС) при проектировании нечетких и квантовых регуляторов (КР).

3. Использование квантовых мягких вычислений даёт возможность повышения робастности автономной встраиваемой интеллектуальной системы управления в нештатных и непредвиденных ситуациях.

4. Реализация квантовых типов вычислений на классическом процессоре позволяет ввести свойство самоорганизации нечетких регуляторов (НР) в структуру ИСУ и повысить робастность системы.

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научных конференциях и конгрессах:

- 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 sriintei: viziuni ale tinerilor cercetatori, Conferinta Stiintifica Internationala a Doctoranzilor, 10 martie, Chisinau, 2015.
- I международная Пospelовская 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 и экспериментальные исследования, выполненные автором в 2010 – 2015 гг. Результатом выполненных исследований стала публикация 38 научных работ, в том числе 4 статей в журналах из перечня ВАК Министерства образования и науки РФ и в Computer Science Journal of Moldova.

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

Автором проведена интерпретация и обобщение полученных результатов моделирования и экспериментов, проведенных на основе автономного робота и его математической модели.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и трех приложений. Общий объем работы, включающий библиографию и приложение, составляет 147 стр., из них основного текста 121 страница. Список литературы содержит 152 наименования.

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

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 в интеллектуальных системах управления, 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.

В первой главе рассмотрено современное состояние процесса разработки и реализации интеллектуальных систем управления с использованием технологий интеллектуальных вычислений и сложности, возникающие при их реализации. Рассмотрена роль интеллектуальных вычислений и синергетического эффекта самоорганизации баз знаний. Анализ литературных данных о современном состоянии процесса проектирования интеллектуальных систем управления показал, что современные инструментарии 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.

В главе рассматриваются основные физические принципы процессов управления, позволяющие устанавливать взаимосвязь между качественными характеристиками динамического поведения объекта управления (ОУ) и исполнительным устройством системы автоматического управления: устойчивостью, управляемостью и робастностью управления. Для этой цели используется информационный и термодинамический подходы, объединенные однородным условием критерия динамической устойчивости (функция Ляпунова), управляемости и робастности.

Приведен краткий обзор развития структур интеллектуальных систем управления. На основе аналитического обзора информационных технологий проектирования интеллектуальных систем управления можно сделать вывод о необходимости решения следующих проблем процесса проектирования:

- 1) разработки и физического 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) проблемы применения технологии проектирования робастных баз знаний в структуре интеллектуальных систем 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 объединением (с применением квантовых вычислений) баз знаний в единую робастную интеллектуальную систему.

Во второй главе представлены основы мягких и квантовых вычислений. Рассматривается разработанный инструментарий для проектирования интеллектуальных систем управления. В своей основе применяемые инструментарии используют технологии мягких и квантовых вычислений, что гарантирует целенаправленное проектирование соответствующего уровня робастности за счёт оптимального проектирования общего количества продукционных

правил и типов функций принадлежности в базе знаний.

На рисунке 1 представлены основные этапы процесса проектирования базы знаний для нечеткого регулятора с использованием разработанного инструментария «Оптимизатор баз знаний» (ОБЗ) [2, 3].

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

Структурно ОБЗ состоит из взаимосвязанных генетических алгоритмов (ГА1, ГА2, ГА3), оптимизирующих отдельные компоненты базы знаний [1] (рис. 1).

Спецификация шагов разработанного алгоритма оптимизации представлена ниже.

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 с участием.

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.).

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 автоматически) уровень активации правила, и

$$R_{total_fs}^l = \sum_{k=1}^N R_{fs}^l(t_k), \quad \text{а} \quad R_{fs}^l(t_k) = \prod \left[\mu_{j_1}^l(x_1(t_k)), \mu_{j_2}^l(x_2(t_k)), \dots, \mu_{j_n}^l(x_n(t_k)) \right],$$

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 правила, которые удовлетворяют условию:

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

Таблица 1. Функции пригодности генетических алгоритмов в оптимизаторе баз знаний

Тип ГА	Критерии	ФП	Роль ФП
ГА₁: Оптимизация лингвистических переменных	Максимум совместной информационной энтропии.	$H^{(j,l)}_{x_i x_k} = H\left(x_i \left _{x_i=\mu^j_{x_i}, x_k=\mu^l_{x_k}}\right.\right) = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left[\mu^j_{x_i}(x_i(t)) * \mu^l_{x_k}(x_k(t)) \right] \log \left[\mu^j_{x_i}(x_i(t)) * \mu^l_{x_k}(x_k(t)) \right]$ <p>где * – выбранная операция нечеткой конъюнкции</p>	Выбор оптимальной мощности термножеств лингвистических переменных компонент ОС
	Минимум информации о сигналах в отдельности	$H^j_{x_i} = -p^j_{x_i} \log(p^j_{x_i}) = -p\left(x_i \left _{x_i=\mu^j_{x_i}}\right.\right) \log \left[p\left(x_i \left _{x_i=\mu^j_{x_i}}\right.\right) \right] = -\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \mu^j_{x_i}(x_i(t)) \log \left[\mu^j_{x_i}(x_i(t)) \right]$	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 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 ГАЗ 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-го этапа является возможность использования подключения к реальному объекту управления и настройки БЗ в режиме реального времени.

В таблице 1 представлены функции пригодности (ФП) для трех генетических алгоритмов, использующихся в ОБЗ. Каждая ФП представляет соответствующий критерий. В таблице описывается также роль выбранной ФП на данном шаге вычисления.

Результатом аппроксимации обучающего сигнала является построенная база знаний для нечеткого регулятора, включающая оптимальное конечное множество правил и оптимально сформированные параметры функции принадлежности входных и выходных переменных нечеткого регулятора.

Таким образом, результатом проектирования является требуемый тип универсального аппроксиматора в виде нечеткого регулятора с оптимальной структурой базы знаний.

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

Таким образом, на рисунке 2 показаны основные компоненты и их взаимосвязи в 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 нечетких регуляторов, являющихся главной составной частью робастной интеллектуальной системы управления. Выходным результатом применения данной ИТП с использованием ОБЗ является робастная база знаний нечеткого регулятора, позволяющая ИСУ функционировать при различных видах и типах информационной неопределённости.

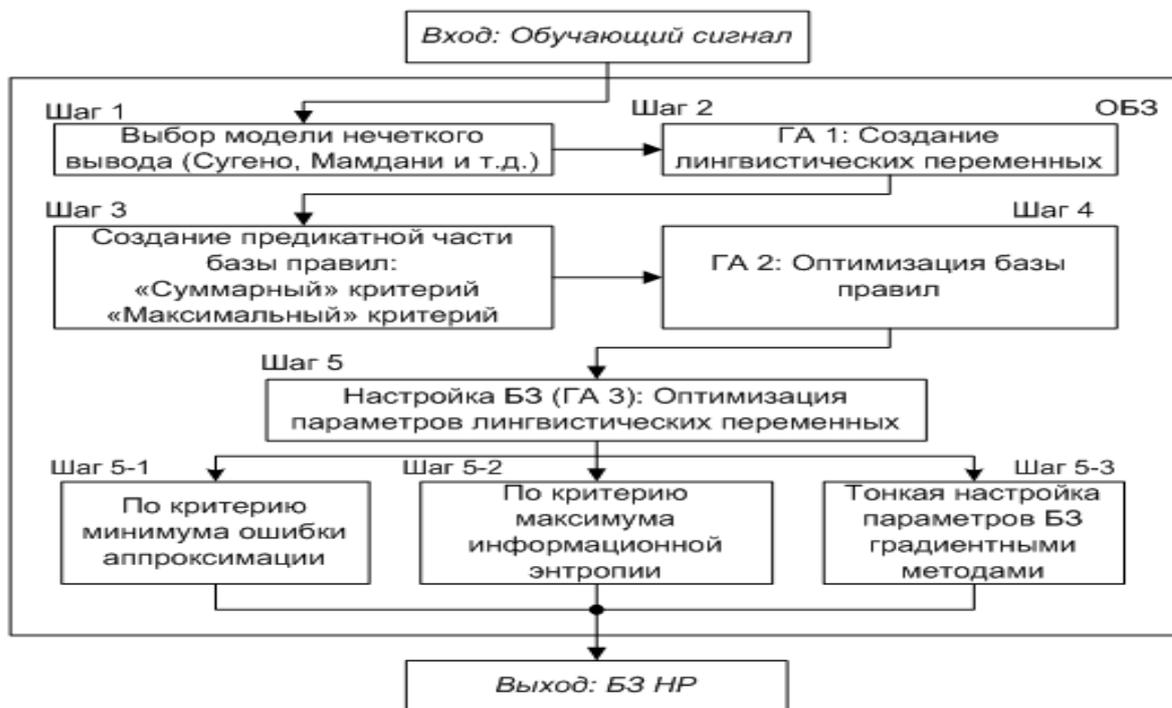


Рис. 1. Основные шаги процесса проектирования БЗ



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

Проведенное исследование показывает, что интеллектуальные системы автоматического

управления обладают следующими достоинствами:

- сохраняют основные преимущества традиционных систем управления, такие как устойчивость, управляемость, наблюдаемость, что составляет основу для проектирования ИСУ;
- имеют оптимальную, в соответствии с заданным критерием качества управления, базу знаний, а также возможность ее коррекции и адаптации к изменяющейся ситуации управления;
- гарантируют достижимость требуемого качества управления на основе спроектированной базы знаний;
- являются открытыми системами, т.е. позволяют вводить дополнительные критерии качества управления и ограничения на качественные характеристики процесса управления.

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

- объективное определение вида функции принадлежности и ее параметров в продукционных правилах базы знаний;
- определение оптимальной структуры нечетких нейронных сетей в задачах обучения (аппроксимация обучающего сигнала с требуемой (заранее заданной) ошибкой и с минимальным количеством продукционных правил в базе знаний);
- применение генетического алгоритма в задачах многокритериального управления при наличии дискретных ограничений на параметры ОУ.

Перечисленные проблемы были решены и апробированы [2-5] с применением технологии мягких и квантовых вычислений. Разработанный и представленный в главе интеллектуальный инструментальный позволил проектировать робастные базы знаний на основе решения одной из алгоритмически трудно решаемых задач теории искусственного интеллекта – извлечения, обработки и формирования объективных знаний без использования экспертных оценок.

В главе рассмотрен математический аппарат квантовых вычислений, применительно к проектированию ИСУ. Описан разработанный программный продукт «Квантовый оптимизатор баз знаний», позволяющий проектировать квантовые нечеткие регуляторы для управления динамически неустойчивыми объектами в нештатных ситуациях [6, 7].

Основной задачей, решаемой процедурой квантового нечёткого вывода (КНВ), является формирование базы знаний с повышенным уровнем робастности из конечного множества баз знаний нечетких регуляторов, сформированных с применением технологии мягких вычислений.

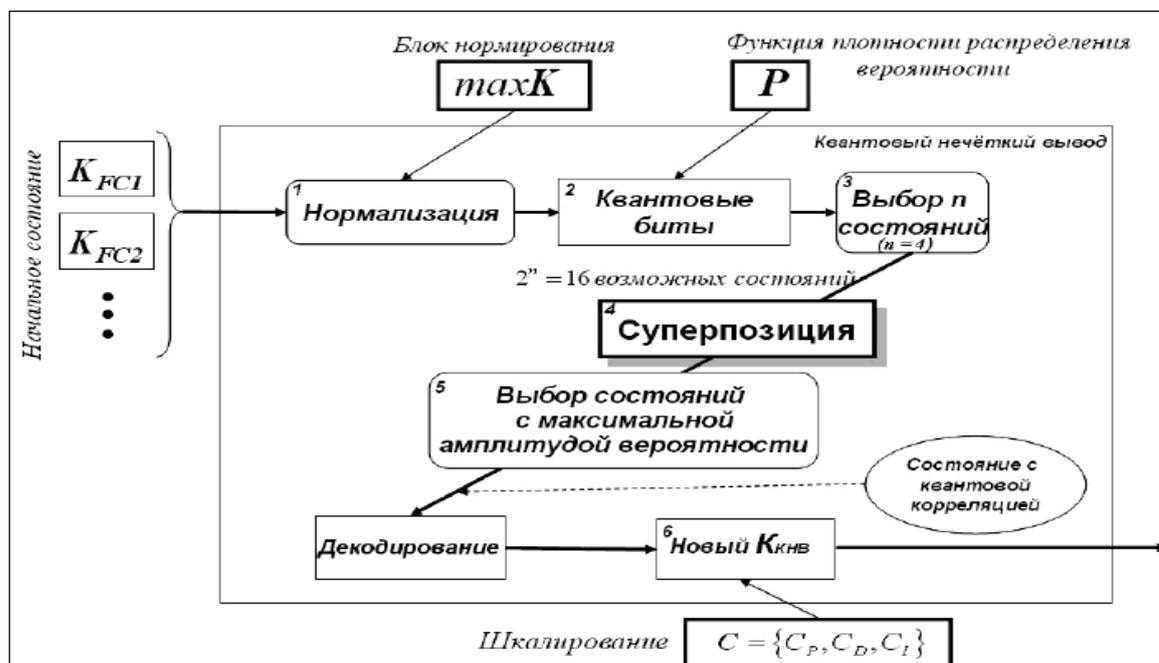


Рис. 3. Функциональная структура КНВ в процессе реального времени

Рассмотрим кратко функциональную структуру и работу основных блоков КНВ. В качестве примера взят процесс извлечения скрытой квантовой информации, обработки данных и формирования робастной базы знаний. При этом используются базы знаний двух нечетких регуляторов, спроектированных для фиксированных, отличных друг от друга, ситуаций управления с использованием различных информационных ресурсов. На рисунке 3 показана функциональная структура модели КНВ.

На первом этапе проектирования КНВ в разработанный квантовый оптимизатор загружаются гистограммы распределения выходных сигналов нечетких регуляторов при функционировании в типовых для них условиях. После загрузки данных выбирается вид квантовой корреляции между коэффициентами усиления. Формирование запутанных состояний осуществляется на основе выбранной корреляционной матрицы, которая устанавливается в рабочем окне разработанного оптимизатора. В квантовом оптимизаторе используются корреляции трех видов: пространственная, пространственно–временная и временная.

Принципиальной отличительной чертой, характеризующей отношение между классической и квантовой типами корреляции, является наличие следующего факта. В квантовом варианте присутствует взаимная (смешанная) корреляция между реальным и виртуальными состояниями нормированного сигнала управления. Классическая корреляция в этом случае является частным случаем полной квантовой корреляции. Следовательно, полная корреляция состоит из следующих частей: классическая (между реальными значениями нормированного сигнала управления); квантовая (между виртуальными

значениями нормированного сигнала управления) и смешанная (между реальными и виртуальными значениями нормированного сигнала управления). Первые два типа корреляций исследуются в корреляционной теории случайных (классических и квантовых) процессов. Третий тип является новым в теории квантовых случайных процессов и отражает эффект интерференции классической и квантовой корреляций. Такой тип полной корреляции содержит скрытую классическую корреляцию в сформированной суперпозиции квантовых битов и служит информационным ресурсом для извлечения дополнительной (ненаблюдаемой) ценной квантовой информации.

На вход КНВ в реальном времени поступают сигналы управления от сформированных заранее баз знаний нечетких регуляторов (шаг «Начальное состояние» на рис. 3). Следующим шагом является процесс нормализации (блок 1 на рис.3) полученных сигналов в интервале $[0, 1]$ путем деления амплитуд траектории сигналов управления на максимальные амплитуды (блок «max K» совместно с блоком 1 на рис.3).

После нормировки сигналов осуществляется формирование квантовых битов (блок 2 на рис. 3) из текущих значений нормированных сигналов управления. С этой целью предварительно и определяется функция плотности распределения вероятности по представленным выборочным траекториям сигналов управления. Далее путем интегрирования полученной функции распределения плотности вероятности определяются интегральные функции распределения вероятностей (блоки Р и 2 на рис.3).

Полученные таким образом функции распределения вероятности позволяют выделить «виртуальные» состояния $|1\rangle$ сигналов управления для формирования суперпозиции с помощью преобразования Адамара из текущего состояния введенных сигналов управления. При этом используется закон вероятности типа $P(|0\rangle) + P(|1\rangle)$, где $P(|0\rangle)$ и $P(|1\rangle)$ – вероятности текущего реального и виртуального состояний сигнала управления, соответственно. Для текущего реального нормированного состояния сигнала управления $|0\rangle$ с помощью интегральной функции распределения вероятности определяется его вероятность. Далее из закона сохранения вероятностей рассчитывается вероятность виртуального состояния сигнала управления.

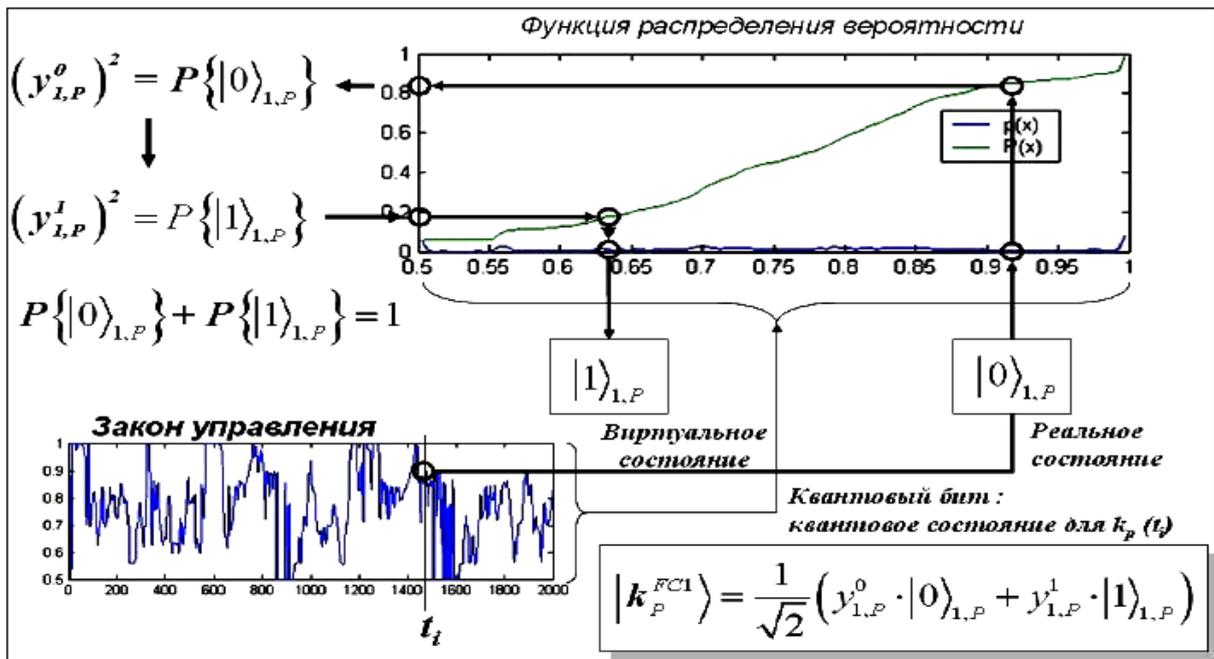


Рис. 4. Процесс формирования квантовых битов (блок 2)

Используя тот же интегральный закон распределения вероятностей, путём обратного отображения, вычисляется численное значение соответствующего виртуального состояния сигнала управления. Следовательно, суперпозиция квантовой системы «реальное состояние – виртуальное состояние» имеет следующий вид:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (\sqrt{P(|0\rangle)}|0\rangle + \sqrt{1 - P(|0\rangle)}|1\rangle) = \text{квантовый бит.}$$

На рисунке 4 схематично отображен вычислительный процесс и формирование квантового бита для текущего состояния нормированного сигнала управления, описывающего коэффициенты усиления нечеткого пропорционально-интегрально-дифференциального регулятора (ПИД-регулятора) в структуре ИСУ.

Операция суперпозиции позволяет осуществить логическое объединение различных баз знаний и выделить приоритет корреляции отдельных состояний в суперпозиции баз знаний с применением разнообразных критериев оптимизации.

Выбор приоритетного в суперпозиции квантового состояния при фиксированном типе корреляции осуществляется в блоке 5 на рис. 3. Для этой цели используется понятие «интеллектуального квантового состояния», введенное в квантовую теорию измерений как состояние с минимальной неопределенностью. В квантовом алгоритме «интеллектуальное квантовое состояние» есть минимум разности между информационной энтропией квантового состояния Шеннона и физической энтропией квантового состояния фон Неймана.

Таким образом, вычислением амплитуд квантовых состояний в суперпозиции состояний

со смешанными видами квантовой корреляции (блок 5 на рис. 3) и выбором среди них максимальной, реализуется модель квантового оракула, обладающего (в соответствии с определением понятия «Квантовый оракул») необходимой информацией об искомом решении. Используя стандартную процедуру декодирования (внутреннего произведения векторов в Гильбертовом пространстве) и выбирая коэффициенты масштабирования для выходных значений проектируемых коэффициентов усиления (рис. 3, блок 6), осуществляется итерационная работа квантового алгоритма КНВ.

Приведенная модель квантового алгоритма для КНВ позволяет решать классические проблемы проектирования робастных баз знаний нечетких регуляторов в структурах ИСУ, не имеющих аналогов решений среди семейства рандомизированных классических алгоритмов.

В третьей главе рассматривается математическое моделирование и проведенный физический эксперимент. Исследование качества управления ПИД-регулятора, нечетких регуляторов и квантовых регуляторов на основе программного инструментария ОБЗ и КНВ проводилось с использованием математической модели и реального ОУ. Регуляторы разрабатывались для функционирования в типовой ситуации управления.

В главе рассмотрена классическая задача управления движением каретки с перевернутым маятником. Данный вид неустойчивого ОУ является типовым (Benchmark) для тестирования программного инструментария робастного интеллектуального управления. 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. 5) с перевернутым маятником, закреплённым на оси.

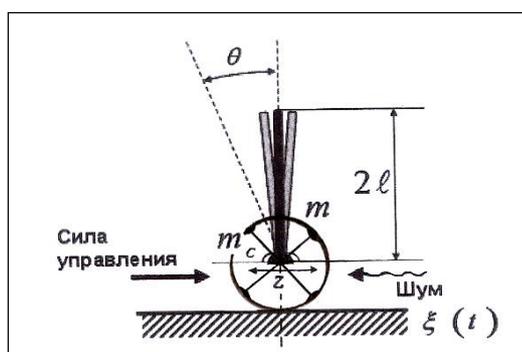


Рис. 5. Модель системы «Каретка – маятник»

Динамика этого неустойчивого ОУ описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка (1), выводимых, с учетом сил трения и упругости каретки, из баланса моментов и проекций сил на горизонтальную ось Z :

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

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{u + \xi(t) + a_1 \dot{z} + a_2 z - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_{\bar{n}} + m} \right) - k\dot{\theta}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_{\bar{n}} + m} \right)} \quad (1)$$

Уравнения, для скорости производства энтропии, следующие:

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

В уравнениях (1) и (2) z и θ – обобщенные координаты; g – ускорение свободного падения (9.8 m/sec^2), m_c – масса тележки, m – масса перевернутого маятника (называемого «шест»), l – половина длины шеста, k и a_1 коэффициенты трения в z и θ соответственно, a_2 – сила упругости тележки, $\xi(t)$ – внешние случайные воздействия (стохастический шум),

а u – сила управляющего воздействия.

Динамическая система обладает глобальной динамической неустойчивостью, при отсутствии управляющей силы происходит неограниченный рост угла отклонения, т.е. маятник падает. Задача управления такой системой состоит в том, чтобы, воздействуя с помощью силы управления на тележку, удерживать маятник в вертикальном положении (угол отклонения оси маятника от вертикали поддерживать близким к 0).

Структура компьютерной модели «Каретка – маятник», выполненная в среде моделирования MatLab/Simulink, представлена на рис. 6.

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 будем использовать ПИД-регулятор в контуре глобальной отрицательной обратной связи и следующее выражение для подсчета управляющего воздействия:

$$u(t) = k_p(t)e(t) + k_I(t) \int_0^t e(\tau) d\tau + k_D(t)\dot{e}(t) \quad (3)$$

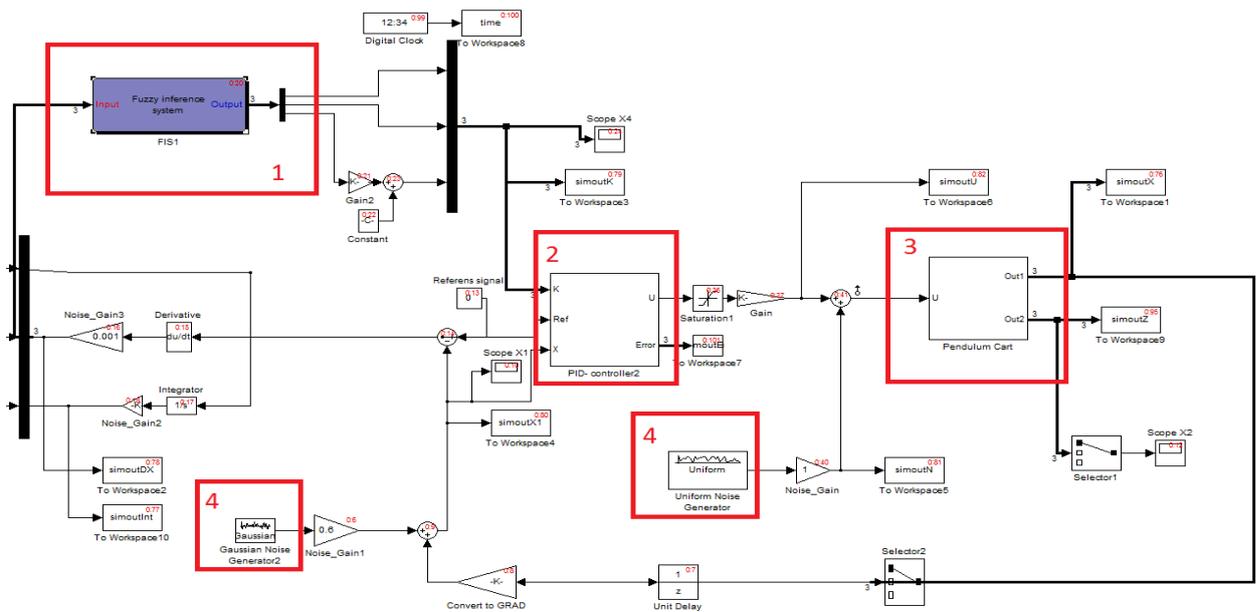


Рис. 6. Структура системы моделирования: 1 - блок нечеткого вывода; 2 – ПИД-регулятор; 3 - объект управления; 4 - генераторы шумов

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.

Для сравнения робастности разработанных систем управления используются непредвиденные ситуации управления. Ситуации моделируются наличием случайных составляющих (шума) в коэффициенте трения колеса о поверхность и в канале управляющего воздействия, присутствующих в физической системе, а также задержкой в выработке управляющего воздействия. В качестве такого шума в физическом эксперименте используется специальное покрытие, а для моделей были установлены соответствующие функциональные значения параметров.

В качестве примера практического применения разработанной модели КНВ для формирования процессов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора представлены результаты математического моделирования и проведенного физического эксперимента с моделью, полученные в одной из непредвиденных ситуаций управления (рис. 7, 8):

Проведенные эксперименты и моделирование показали, что интеллектуальное управление позволяет в непредвиденных ситуациях управления гарантированно достигать цели управления с минимальным расходом ресурса, что, по своей сути, отражает, на содержательном уровне, само определение целенаправленной деятельности ИСУ.

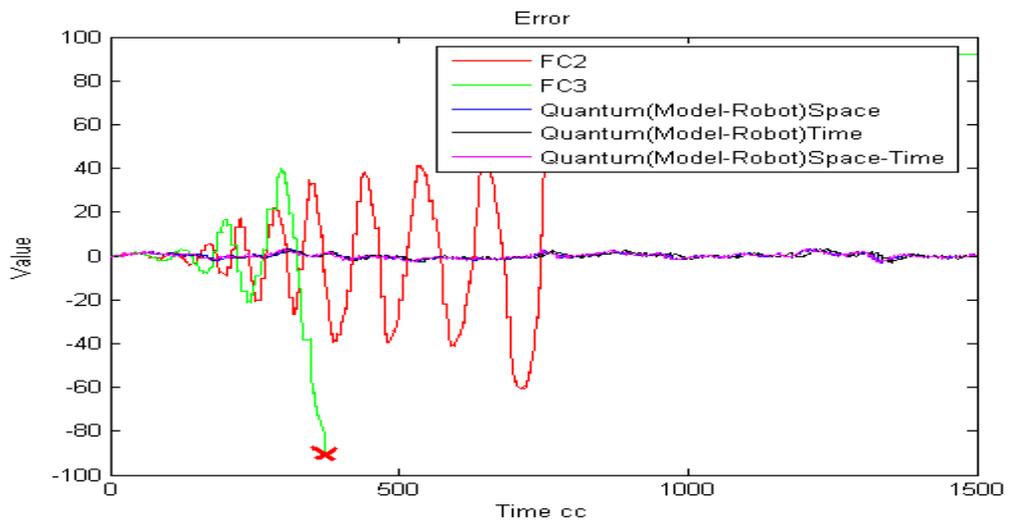


Рис. 7. Динамика угла отклонения математической модели. Непредвиденная ситуация управления. Типы регуляторов указаны в правом верхнем углу рисунка

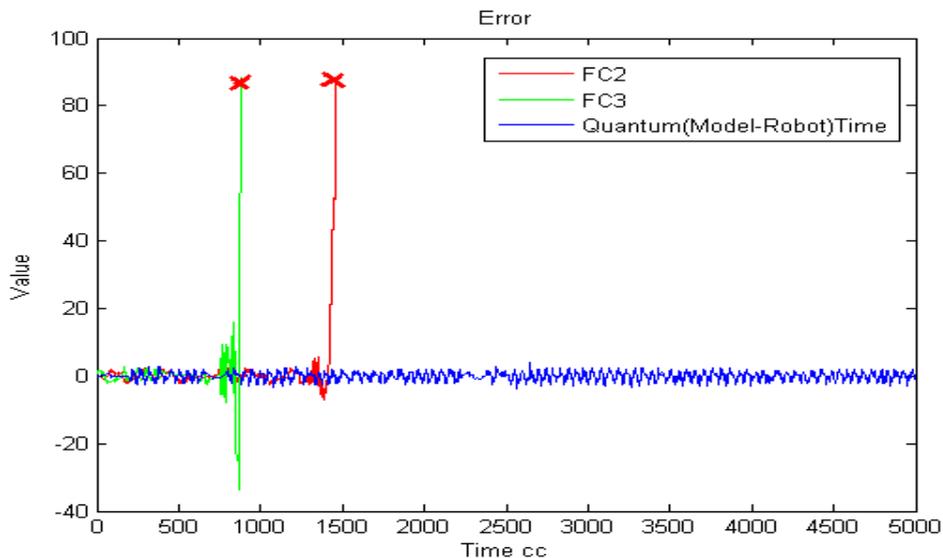


Рис. 8. Динамика угла отклонения макета в эксперименте для непредвиденной ситуации управления. НР на основе ОС с модели и макета, а также КНВ на основе этих регуляторов

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. Представлен алгоритм верификации математической модели объекта управления с не доопределенными параметрами на основе генетического алгоритма и физического сигнала от реального объекта управления, что позволило извлекать знания из физически измеряемого сигнала, исключая 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.

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 вычисления, позволяет эффективно справляться с задачами управления даже в экстремальных условиях, в которых с задачей управления не справляются нечеткие регуляторы на основе квантовых нечетких выводов.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ 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. Ульянов, С. В. и др. Интеллектуальное робастное управление: Технологии мягких вычислений. М.: ВНИИГеосистем, 2011. 408 стр.
2. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Проектирование робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. I, Изв. РАН. ТиСУ, 2006, № 5. стр. 102 – 141.
3. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Квантовый нечеткий вывод для создания баз знаний в робастных интеллектуальных регуляторах. Изв. РАН, ТиСУ, 2007, № 6. стр. 71 – 126.
4. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Интеллектуальные системы управления. I. Квантовые вычисления и алгоритм самоорганизации. Изв. РАН, ТиСУ, 2009, № 6, стр. 69 – 97.
5. Решетников А.Г. Робастное интеллектуальное управление динамически неустойчивым объектом управления, Тринадцатая национальная конференция по искусственному интеллекту, Труды конференции. Том 4, г. Белгород, 2012. стр. 1100 - 1111
6. Ульянов С. В., Решетников А. Г., 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» - электронный научный журнал, 2013. №1. <http://sanse.ru/download/155>, (дата посещения 30.11.2015).
7. Ульянов С.В., Решетников А.Г. и др. Информационная технология проектирования баз знаний нечетких регуляторов. Ч.3: Квантовый нечеткий вывод и квантовая информация, "Системный анализ в науке и образовании", №4, 2010. <http://sanse.ru/download/69>, (дата посещения 30.11.2015).
8. Ульянов С.В., Решетников А.Г., Решетников Г.П. Технологии интеллектуальных вычислений: Квантовые вычисления и квантовое программирование в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления. Дубна: ОИЯИ 2015, 246 стр.

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 quantic 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.

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. Объем 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.

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"**

This 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.

РЕШЕТНИКОВ АНДРЕЙ ГЕННАДЬЕВИЧ

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

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

Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора информатики

Подписано в печать: _____

Формат бумаги 60 x 84 1/16

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Тираж ___ экз.

Печатных листов: _____

Заказ № _____

Отпечатано в _____

**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.

Autoreferatul tezei de doctor în informatică

CHIȘINĂU, 2016