

Ц, 843.4(07)

У-517



Учебно-
методические
пособия
Учебно-научного
центра ОИЯИ
Дубна

УНЦ-2015-56

С. В. Ульянов, А. Г. Решетников, Г. П. Решетников

ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Квантовые вычисления и программирование
в самоорганизующихся интеллектуальных
системах управления

Учебно-методическое пособие

2015

УЧЕБНО-НАУЧНЫЙ ЦЕНТР ОИЯИ

Ц.843.4(07)
У-517

С. В. Ульянов, А. Г. Решетников, Г. П. Решетников

ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Квантовые вычисления и программирование
в самоорганизующихся интеллектуальных
системах управления

Учебно-методическое пособие

Дубна 2015
НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ
БИБЛИОТЕКА
ОИЯИ

Учебное пособие написано сотрудниками Института системного анализа и управления Международного университета природы, общества и человека «Дубна» профессором С. В. Ульяновым, аспирантом А. Г. Решетниковым, старшим научным сотрудником ОИЯИ Г. П. Решетниковым.

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

Ульянов С. В., Решетников А. Г., Решетников Г. П. Технологии У51 интеллектуальных вычислений. Квантовые вычисления и программирование в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления: Учебно-методическое пособие. — Дубна: ОИЯИ, 2015. — 246 с.: ил.

ISBN 978-5-9530-0422-0

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

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

Ulyanov S. V., Reshetnikov A. G., Reshetnikov G. P. Intelligent Computing Technology. Quantum computing and programming of self-organizing intelligent control systems: Textbook. — Dubna: JINR, 2015. — 246 p.: ill.

ISBN 978-5-9530-0422-0

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

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

© Объединенный институт ядерных исследований, 2015
© Ульянов С. В., Решетников А. Г., Решетников Г. П., 2015

ISBN 978-5-9530-0422-0

Оглавление

Предисловие	5
Введение	7
Глава 1: Квантовый алгоритм самоорганизации баз знаний и квантовый нечеткий вывод в ИТ проектирования ИСУ	13
1.1. Введение: Проблемы разработки и проектирования робастных ИСУ	13
1.2. Технологии ИВ в процессах проектирования ИСУ	19
1.2.1. Технология мягких вычислений	20
1.2.2. Технология квантовых вычислений	23
1.2.3. Постановка задачи и особенности метода решения	25
1.3. Квантовый алгоритм управления процессом самоорганизации	27
1.3.1. Биологически воспроизводимый КА самоорганизации	27
1.3.2. Физическая интерпретация квантовой самоорганизации	29
1.4. Структура обобщенного квантового алгоритма самоорганизации: математическая модель квантовых операторов	32
1.4.1. Структура и особенности квантового алгоритма самоорганизации	33
1.4.2. Обобщенная структура КА управления самоорганизацией	35
1.4.3. КА управления самоорганизацией знаний: модель КНВ	47
1.5. Структурная модель и этапы вычислений КА в КНВ	48
1.5.1. Алгоритмические особенности этапов КНВ при формировании самоорганизации БЗ	51
1.6. Интеллектуальный робастный регулятор в системе управления глобально неустойчивым нелинейным ОУ «Каретка-маятник»	69
1.7. Декомпозиция многокритериальных задач оптимального управления	76
1.8. Заключение	86
Список литературы к Главе 1	87
Контрольные вопросы к Главе 1	91
Глава 2. Проектирование робастного интеллектуального управления динамически неустойчивым объектом на основе квантового нечеткого вывода	92
2.1. Математическая модель и макет объекта управления	92
2.2. Проектирование КНВ на основе программного инструментария «Квантовый оптимизатор»	94
2.3. Моделирование и эксперимент (КНВ)	99
2.4. Дистанционная настройка квантового нечеткого вывода	107
2.5. Эксперимент с дистанционно настроенными ИСАУ	110
2.6. Анализ результатов эксперимента	114
2.7. Беспроводная настройка КНВ	116
2.8. Моделирование и эксперимент	117
2.9. Общие выводы	118
Список литературы к Главе 2	119
Контрольные вопросы к Главе 2	120
Глава 3. Проектирование робастной ИСУ роботом-манипулятором: применение ОБЗ на квантовых вычислениях	121

3.1. Постановка задачи управления	121
3.2. Проектирование интеллектуальной системы управления с применением квантового нечеткого вывода (КНВ)	123
3.3. Проектирование модели Квантового нечеткого вывода с помощью Оптимизатора баз знаний на квантовых вычислениях	124
3.4. Сравнение работы интеллектуальных систем управления с применением технологий квантовых и мягких вычислений	131
3.5. Моделирование непредвиденных ситуаций управления в условиях изменений параметров ОУ	137
Заключение	140
Список литературы к Главе 3	141
Контрольные вопросы к Главе 3	141
Условные обозначения	142
Лабораторный практикум	143
Приложение П1. Оптимизатор баз знаний на основе квантовых вычислений для проектирования самоорганизующихся нечетких регуляторов: Программный инструментарий	161
П1.1. Квантовый оптимизатор баз знаний и программный инструментарий	161
П1.2. Программная поддержка и особенности процесса проектирования робастных БЗ для самоорганизующихся НР с применением КНВ	164
П1.2.1. Программная реализация (версия 1.1) операторов модели КНВ	165
П1.2.2. Квантовый информационный ресурс в КНВ-алгоритме	173
Выводы и заключение	190
Рекомендуемая литература к Приложению П1	191
Приложение П2. Элементы теории квантовых вычислений, квантового программирования и квантовой теории информации	192
П2.1. Элементы теории квантовых вычислений	192
П2.1.1. Основные понятия и определения теории квантовых вычислений: квантовый бит (кубит) и особенности квантовых вычислений	192
П2.1.2. Квантовые операторы суперпозиции, квантовой корреляции (запутанные состояния - entanglement), интерференции и измерений	208
П2.2. Моделирование КАЯ и квантовое программирование	223
П2.3. Элементы квантовой теории информации	233
П2.3.1. Меры квантовой информации и законы квантовой теории информации	233
Рекомендуемая литература к Приложению П2	245

Предисловие

В предлагаемом читателю учебно-методическом пособии описаны новые модели интеллектуальных вычислений и их инженерно-физические применения, что является ее отличием от многих известных в литературе публикаций. В частности, рассматривается актуальная проблема возможности эффективных практических применений моделей интеллектуальных вычислений в новых задачах робастного интеллектуального управления сложными физическими объектами (на примере автономных роботов) при наличии/отсутствии математической модели объекта управления в непредвиденных ситуациях управления и условиях информационного риска.

Термин «интеллектуальные вычисления» является обобщением термина «нечеткие алгоритмы вычислений» и был предложен Л. Заде; далее данный термин стал использоваться рядом авторов с середины 90-х прошлого столетия. Теория и методы дробных исчислений, мягких и перспективных квантовых вычислений относятся к такому классу интеллектуальных вычислений. Данные вычисления являются теоретически достаточно глубоко проработанными исчислениями и могут быть пригодными для эффективного и практического применения в системной инженерии. Основной целью является разъяснение особенностей синергетических и информационных эффектов интеллектуальных вычислений, их роли в реализации принципа «компенсации неполноты описания моделей» объектов и систем управления, введенного ранее в работах авторов. Динамическое поведение объекта управления и системы управления (регулятора) служит источником объективных знаний для формирования баз знаний, полнота (soundness) которой зависит от достоверности, извлекаемой из конкретного источника информации. Неточность (imperfect) измерения (обусловленная объективной природой объекта) и недостоверность (unreliable) представления извлекаемой информации (например, из-за присутствия человеческого фактора в контуре управления) приводит к повышению информационного риска и возникновению непредвиденных ситуаций управления, компенсация которых для обеспечения робастности управления осуществляется применением необходимого уровня интеллектуальных вычислений. Модели интеллектуальных вычислений представлены на уровне качественной физики, в доступном виде, без потери общности описания и детального перегруженного рассмотрения математических моделей.

Такой подход позволяет читателю (на первом этапе детального изучения предметной области исследований) понять сущность и роль интеллектуальных вычислений в системной инженерии и процессах проектирования интеллектуальных систем управления. Однако методы дробных исчислений, мягких и перспективных квантовых вычислений, симбиоз которых породил новое направление – квантовые мягкие вычисления, известны лишь узкому кругу специалистов.

Выбор эффективного инструментария применения для конкретной проблемно-ориентированной области вызывает определенные трудности (или интуитивное противоречие) у студентов, инженеров-исследований и разработчиков новых высоких наукоемких информационных технологий.

В данной книге описание развития и применения технологии интеллектуальных вычислений обусловлено, в частности, требованиями выполнения новых принципов робастного интеллектуального управления: компенсация информационной неполноты представления модели (слабоструктурированных) объектов управления выбором соответствующего уровня интеллектуального вычисления; и соответствие алгоритма

интеллектуального управления уровню сложности и неполноты описания внутренней и внешней среды функционирования объекта управления.

Такой подход позволяет эффективно решать классические (алгоритмически неразрешимые) задачи, в частности задачи проектирования робастных интеллектуальных систем управления, часто функционирующих в условиях информационного риска и нештатных ситуаций. Сами виды и типы интеллектуальных вычислений (алгоритмы и программные инструментари – toolkit) стали рассматриваться как объекты интеллектуальной собственности (ОИС) только в конце 20-го столетия. Это позволило малому и среднему бизнесу интенсивно развивать коммерческую привлекательность разработанного интеллектуального продукта.

Материал пособия основан на лекциях авторов, прочитанных в УНЦ ОИЯИ и Международном университете природы, общества и человека «Дубна».

Коллеги и ученики А.В. Николаева и Т.А. Керимов активно участвовали в подготовке к публикации материалов книги; авторы считают своим приятным долгом выразить им свою признательность и благодарность.

Отбор материала и список цитированной литературы в книге определялся отчасти опытом, научными и практическими интересами автора, а также ограничениями на объем книги. Авторы заранее приносят свои искренние извинения многим авторам, чьи работы известны, но не отражены в данной книге.

Авторы
Дубна, 2015

Введение

При разработке и изучении технологии интеллектуальных вычислений (ИВ) возникают следующие традиционные вопросы:

- В чем принципиальное отличие ИВ от традиционных вычислений?
- Какие имеются особенности ИВ?
- Есть ли преимущества применения в задачах управления ИВ перед традиционными методами вычислений?
- В чем состоит коммерческая привлекательность интенсивно разрабатываемых моделей ИВ?

Ответы на данные и смежные вопросы привлекают много лет внимание исследователей, инженеров и студентов разных специальностей.

Здесь приведены краткие ответы на приведенные и смежные вопросы. Развернутый ответ приведен в тексте данной книги.

При применении в прикладных задачах традиционных методов исчислений по конечному количественному результату численного алгоритма осуществляется соответствующая оценка качественного свойства исследуемого объекта (например, определение глобального экстремума сложной функции от многих аргументов). Логическая оценка свойства в общем случае может быть осуществлена только в конце количественных вычислений, а для алгоритмически неразрешимых численных проблем (в виде энтропийных мер сложности алгоритма по Колмогорову), часто искомая оценка не может быть достигнута.

Целью и новой возможностью технологии ИВ, в частности, мягких вычислений, является определение и введение дополнительно шкал качественных характеристик объекта, алгоритмически оперируя последними также как на числовых шкалах. Базисом в этом случае являются не только числовые шкалы (как в традиционных вычислениях), но и шкалы лингвистического описания качественных характеристик исследуемого объекта. Количественные оценки объекта можно получить из качественных оценок обратным отображением шкал (в общем случае неоднозначно). Мягкие вычисления являются примерами исчислений, в которых количественной характеристике присваивается на качественной шкале лингвистическая переменная, характеризующая свойство числовой переменной.

В квантовых вычислениях (квантовых алгоритмах) качество (свойство) исследуемой функции определяется непосредственно как выходной результат параллельных массивных вычислений.

При этом многие классические трудно решаемые задачи могут быть решены с экспоненциальным ускорением или получены ответы на алгоритмически неразрешимые классическими методами задачи. Так, например, для определения качественной характеристики функции (постоянная или балансирующая для четырех аргументов) в традиционном подходе требуется четыре шага численных операций, в то же время квантовый алгоритм Дейча (опубликованный в 1985 г.) определяет данное качество исследуемой функции за один шаг.

Алгоритм Шора (1994 г.) решает задачу факторизации заданного числа с экспоненциальной скоростью по отношению к лучшему известному алгоритму, а при увеличении его длины решает алгоритмически неразрешимую задачу с полиномиальной сложностью.

Алгоритм Гровера (1996 г.) осуществляет поиск решения в неструктурированных данных с квадратичной скоростью.

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

Такие исчисления открыли новые возможности для теории и проектирования интеллектуальных систем управления (ИСУ). Обобщение понятия числа за счет введения субъективной качественной шкалы (и отображения в нее в виде лингвистической аппроксимации его количественной характеристики) привело к 45-летней дискуссии (в первую очередь с представителями научной школы теории вероятностей) о корректности такого подхода.

Дело в том, что в теории вероятностей понятие функции распределения вероятностей имеет четкое и строгое определение, а аксиоматика позволяет ввести физическую интерпретацию случайных процессов. Поскольку в теории случайных процессов по динамическим характеристикам объекта управления и функции распределения вероятностей входного сигнала с помощью уравнения Колмогорова-Фоккера-Планка можно определить функцию распределения вероятностей выходного сигнала, то аналогичные операции в теории нечетких систем вызвали определенные логические трудности.

К таким трудностям относится, например, корректное определение понятий функций принадлежности (ФП), логические взаимоотношения «нечеткая/случайная величина» и др.

Только практическое применение нечетких систем автоматического управления (САУ) классическими объектами управления разъяснило и сняло разногласия и трудности в определениях 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 нечеткие ИСУ, эффективно решающие задачи управления в условиях существенной неопределенности исходной информации, слабой формализации описания объекта управления (ОУ), нечеткости целей управления, и т.п.

Нестандартные (неклассические) логики, используемые в основе ИВ и 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. Отметим, однако, что сам термин «нестандартная» логика уже включает такую ситуацию, а его введение обосновано стремлением решать задачи, не решаемые существующими технологиями вычислений.

К таким технологиям ИВ относятся мягкие и квантовые вычисления, используемые, например, для проектирования робастных баз знаний (БЗ) в условиях непредвиденных ситуаций управления. Применение новых информационных технологий (ИТ) в инженерной практике теории и систем управления часто сталкивается с проблемами преодоления инерции «прагматической» интуиции и инженерной философии.

Так происходило в середине 70-х прошлого столетия при внедрении в инженерную практику идей мягких вычислений на основе теории нечетких множеств и нечетких систем управления.

В связи с отмеченными фактами, рассмотрим кратко методологические особенности применения ИТ мягких, дробных и квантовых вычислений.

Исторически определение и термин «интеллектуальные вычисления» были введены в середине 90-х годов прошлого столетия. Однако такое (слабо известное) нестандартное исчисление как дробное (fractional calculus), известно более чем 300 лет

и только в конце 20 века нашло применение в науке и технике, в частности в проектировании дробных (fractional или noninteger order) ПИД-регуляторов. Многообразие подходов и проблемная ориентация разработанного инструментария привели к многочисленным дискуссиям и разнообразию разработок прикладного инструментария. Введенные термины Soft Computing и Computational Intelligence условно разделили область ИВ на разработку моделей алгоритмов (типа генетических алгоритмов, нейронных сетей и др.) и проектирование прикладного инженерного инструментария (toolkit) программной поддержки (типа дифференциальной эволюции, нечеткого программирования и др.) ИВ соответственно.

Таким образом, с точки зрения математики целью разработки прикладных моделей ИВ является формирование инструментария, который позволяет непосредственно определять качественные характеристики и свойства исследуемого объекта (например, глобальный экстремум исследуемой функции). Например, в алгоритмах традиционных вычислений качество исследуемого объекта определяется по конечному результату итераций количественных вычислений и при этом не всегда, как отмечалось, гарантируется корректное определение искомых свойств. С точки зрения компьютерных ИТ и системной инженерии применения и реализации методов теории ИВ данный инструментарий позволяет существенно расширить границы прикладных возможностей, повысить эффективность вычислений и моделирования сложных объектов, а также решать алгоритмически неразрешимые классическими методами задачи.

Последующее развитие технологии ИВ нашло свое отражение в новых видах эволюционного программирования, генетических алгоритмах многокритериальной оптимизации, иммунных алгоритмов, на основе поведенческих реакций толпы (людей в тоннеле, колоний муравьев, стай птиц и рыб, животных и т.п.) и др.

Интенсивно стали развиваться квантовые технологии ИВ, такие как квантовые генетические алгоритмы глобальной оптимизации, квантовые нейронные сети обучения, биоинспирированные квантовые алгоритмы, квантовое программирование и др.

Известно, что уровень развития и коммерческая привлекательность прорывных интеллектуальных информационных технологий (ИТ) и оптимальных методов принятия решений в системах управления находится в прямой зависимости от типа ВД, применяемого в процессах извлечения, обработки и формирования знаний, а также от вида интеллектуальной базы программно-аппаратной поддержки процессов обработки и передачи информации. Выполнение требований усовершенствования теории и внедрения инноваций практики систем управления нашло свое отражение, в частности, в развитии новых видов вычислений, например, для решения задач оптимизации, обучения и адаптации на основе технологий ИВ.

Из многочисленных моделей ИВ в данной книге выбраны технологии мягких, дробных и квантовых вычислений, а также квантового программирования, не случайно. Данные инновационные технологии вычислений составляют основу проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ, способных функционировать и гарантировать достижение цели управления в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций и информационного риска.

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

Предметом предлагаемой читателю книги является описание решения данной задачи.

Решение такой задачи связано с необходимостью реализации ряда новых (для робастного интеллектуального управления) физических и информационно-термодинамических принципов: *принцип компенсации информационной неполноты описания модели* (слабоструктурированных) ОУ выбором соответствующего уровня ИВ; *принцип соответствия алгоритма интеллектуального управления* уровню сложности и неполноты представления знаний о внешней среде функционирования ОУ (связь информационной энтропии с мерой алгоритмической сложности Колмогорова); *принцип минимума потерь полезного ресурса* (минимум обобщенной энтропии – физический закон оптимального управления) в системе «ОУ + регулятор»; *принцип не разрушения и повышения эффективности нижнего исполнительского уровня* системы управления за счет самоорганизации БЗ интеллектуального регулятора; и *принцип синергизма извлекаемой скрытой квантовой информации* из классических состояний спроектированных процессов управления.

Для реализации данных принципов робастного интеллектуального управления рассматриваются решения трех проблем.

А. В первом случае в отличие от прямой задачи (описания знаний количественными характеристиками), рассматривается решение обратной задачи теории искусственного интеллекта: извлечение знаний из количественных данных эксперимента. В этом случае разработанная технология проектирования объективных баз знаний на основе мягких и квантовых вычислений исключает субъективизм экспертных оценок

Б. Во втором случае рассматривается проблема разработки и физического обоснования математической модели квантового алгоритма управления самоорганизацией знаний для формирования робастных баз знаний в реальном времени. В данной книге показана роль прямых аналогов физических (квантовых и термодинамических) эффектов в реализации процесса гарантированного достижения качества управления на основе технологии квантовых, мягких и дробных вычислений. При этом основное внимание уделяется описанию и интерпретации качественных особенностей биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации, основные компоненты которой описываются квантовыми операторами и составляют содержание разработанной модели квантового алгоритма управления процессом самоорганизации.

Рассматривается задача робастного управления в непредвиденных ситуациях на основе квантовых стратегий принятия решений в виде инструментария квантового нечеткого вывода как частного случая, разработанного обобщенного квантового алгоритма управления самоорганизацией.

В. Решение третьей проблемы демонстрирует результаты применения технологии проектирования робастных баз знаний в структуре интеллектуальных систем управления. На конкретных примерах (применения структур интеллектуальных систем управления) в данной книге показаны особенности проектирования робастных баз знаний для непредвиденных ситуаций управления и в условиях информационного риска.

Синергетический эффект квантовой самоорганизации баз знаний в условиях непредвиденных ситуаций основан на разработанной одним из авторов (С.В. Ульянов) в 1999г. технологии процессов извлечения скрытой в классических состояниях квантовой информации (дополнительный информационный ресурс).¹

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 «объект управления - регулятор»). Такой подход позволяет сформировать эффективное управление сложным физическим ОУ простым по структуре интеллектуальным регулятором.

Разработанная технология проектирования позволяет использовать данный дополнительный информационный ресурс для повышения уровня робастности ИСУ. Показано, что само свойство робастности является следствием самоорганизации баз знаний нечетких регуляторов (нижний исполнительский уровень управления).

При этом установлен новый (для классической логики управления) квантовый «парадокс» самоорганизации знаний: две базы знаний, спроектированные для двух разных ситуаций управления, и не робастные в новой непредвиденной ситуации управления, с помощью квантового нечеткого вывода дают возможность спроектировать в реальном времени робастную базу знаний.

Спроектированная таким образом робастная база знаний позволяет ОУ гарантированно достичь поставленной цели управления.

Поэтому необходимость в появлении данной книги обусловлена повышенным интересом широкого круга студенческой, инженерной и исследовательской аудитории самых различных специальностей к разработке современных технологий интеллектуальных вычислений и их практического применения для повышения эффективности исследуемых или действующих объектов и систем управления.

Предлагаемая читателю книга отражает прикладные результаты в области разработки новых видов ИВ: ИТ проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ.

Отметим некоторые аспекты данных интеллектуальных ИТ и их роль в интеллектуальной системной инженерии. Предметной областью применения технологий интеллектуальных вычислений является упомянутая выше разработка ИТ проектирования робастных интеллектуальных систем управления, позволяющих повысить эффективность существующих (или разрабатываемых) макро-, микро- и нано-технологических процессов без разрушения нижнего исполнительского уровня управления.

В частности, на основе мягких, дробных и квантовых вычислений и квантового программирования рассмотрена, в качестве наглядного конкретного примера, ИТ проектирования ИСУ, применяемых для промышленных и непромышленных объектов (повышенной сложности и социально-экономической ответственности), и функционирующих, например, в нештатных (непредвиденных) ситуациях управления. В этом случае применение квантового алгоритма самоорганизации баз знаний позволяет в реальном времени достигать цели управления в непредвиденных ситуациях за счет повышения робастности ИСУ в проблемно-ориентированной области.

Содержание и структура книги имеют принципиальное отличие от ранее изданных по исследованию и разработке ИСУ, к структурному проектированию моделей интеллектуального управления, и представляет новое направление в области исследования новых квантовых ИТ, разработки, проектирования и применения робастных самоорганизующихся ИСУ.

Выделим некоторые особенности разработанного подхода к структурному проектированию моделей интеллектуального управления и его отличия от известных работ по разработке ИСУ.

Важным для системной инженерии результатом применения ИТ проектирования ИСУ является показанная возможность реализации квантовых алгоритмов и квантовых вычислений на типовом (а не квантовом) процессоре в стандартной конфигурации аппаратной поддержки роботов – манипуляторов и автономных роботов.

¹ Ulyanov S.V. Self-organized quantum robust control methods and systems for situations with uncertainty and risk // US patent. – № 20130096698. – Publication date 2013-04-18.

В этом случае применение квантового алгоритма самоорганизации баз знаний позволяет в реальном времени достичь цели управления в непредвиденных ситуациях за счет повышения робастности ИСУ в проблемно-ориентированной области. Вычислительным базисом отмеченных направлений разработок является технология квантовых мягких вычислений. Поэтому из многочисленных моделей ИВ в качестве примера в книге представлены прикладные разработки технологий мягких, дробных и квантовых вычислений.

Отмеченная актуальность и широта аудитории пользователей технологиями ИВ объясняется также следующим обстоятельством: одной из предметных областей применения технологий ИВ является разработка прорывных интеллектуальных наукоёмких ИТ.

Поэтому в книге доступно (без потери необходимой математической и физической строгости) изложены принципиальные вопросы разработки и эффективного применения технологий ИВ. Подробно разъяснены возникающие логические «парадоксы» получаемых результатов на основе технологии ИВ, вызывающих в инженерной аудитории трудности в наглядной физической и математической интерпретации.

В книге основное внимание уделено практическому применению данных видов ИВ. В качестве наглядных примеров выбраны объекты интеллектуальной ИТ проектирования ИСУ в проблемно-ориентированной области – интеллектуальная робототехника и мехатроника, инструментарий оптимизаторов баз знаний на основе квантовых мягких вычислений, робастные дробные регуляторы и др. Показана взаимосвязь мягких и квантовых вычислений и совместное применение в задачах проектирования робастных баз знаний.

Коллеги и ученики А.В. Николаева и Т.А. Керимов активно участвовали в подготовке к публикации материалов данного учебного пособия; авторы считают своим приятным долгом выразить им свою признательность и благодарность.

По мнению авторов книги, сделанные замечания многими коллегами, несомненно, послужили улучшению отбора и качества изложения материалов. Естественно, что за качество материалов книги в целом несут полную ответственность авторы.

Глава 1. Квантовый алгоритм самоорганизации баз знаний и квантовый нечеткий вывод в ИТ проектирования ИСУ

Одним из основных назначений и преимуществ эффективного применения интеллектуальных систем управления (ИСУ) является возможность гарантированного достижения цели управления с максимальным качеством управления на верхнем уровне и минимальным расходом полезного ресурса системы «*объект управления (ОУ) + регулятор*» на нижнем (исполнительском) уровне иерархической системы автоматического управления. На содержательном уровне данная возможность отражает назначение целенаправленной деятельности ИСУ в общем случае непредвиденных ситуаций управления. При этом эффективность применения ИСУ зависит от уровня интеллектуальности разработанной системы (формы, вида и глубинного представления знаний). Важную роль при формировании уровня интеллектуальности систем автоматического управления (САУ) играет выбор используемого инструментария технологии интеллектуальных вычислений¹ для проектирования соответствующей базы знаний (БЗ) при заданной цели управления.

1.1. Введение: Проблемы разработки и проектирования робастных ИСУ

Рассмотрим основные проблемы разработки моделей и ИТ проектирования робастных ИСУ в непредвиденных (нештатных) ситуациях управления.

А. *Роль ИСУ.* Разработка ИСУ для традиционных САУ с повышенной робастностью, способных поддерживать требуемые уровни точности и надежности в условиях непредвиденных ситуаций управления, стала объектом интеллектуальной собственности и имеет существенное теоретическое, практическое и коммерческое значение. Программно-аппаратная поддержка ИСУ стала товаром при коммерциализации интеллектуального продукта в инженерном менеджменте основанного на знаниях. В частности, важным направлением прикладного применения ИСУ является повышение *робастности* традиционных (П/ПИ/ПД/ПИД) - регуляторов, используемых на нижнем уровне контуров управления.

Примечание 1. Традиционный в теории управления ПИД-регулятор используется в более чем 85% САУ. Поэтому одной из важных конкретных (теоретических и практических) проблем в создании ИСУ является разработка методов и алгоритмов повышения надежности и качества управления исполнительского (нижнего) уровня САУ, основанного на традиционном ПИД-регуляторе. При этом выполняется принцип «*неразрушения исполнительского уровня*», что приводит к дополнительному эффективному использованию существующих (уже отлаженных) технологических процессов и повышенному экономическому эффекту. Использование нечетких регуляторов (НР) совместно с ПИД-регулятором привело к созданию гибридных нечетких ИСУ с различными уровнями интеллектуальности в зависимости от полноты и корректности спроектированной БЗ. Под термином БЗ понимается стандартное для теории НР определение БЗ в виде конечного множества продукционных правил (look-up table) определенной модели нечеткого вывода с конкретными типами и параметрами функций принадлежности, формирующих законы управления ОУ. Параметры и тип функции принадлежности хранятся в базе данных НР.

¹ Определение и термин «интеллектуальные вычисления» введены в середине 90-х годов прошлого столетия. Последующее развитие технологии интеллектуальных вычислений нашло в новых видах эволюционного программирования, алгоритмах оптимизации типа иммунных алгоритмов, на основе поведенческих реакций толпы (людей в тоннеле, колоний муравьев, стай птиц и рыб, животных и т.п.), квантовых генетических алгоритмов глобальной оптимизации и квантовых нейронных сетей обучения и др.

Структура нечеткого самоорганизующегося ПИД-регулятора с определенным уровнем интеллектуальности была введена авторами и используется в данной книге.

Примечание 2. Для полноты изложения предмета исследования ниже, в п. 1.3 приведен пример проектирования БЗ в виде продукционных правил «Если А, То В», где А и В лингвистические переменные с определенными функциями принадлежности, сформированных с помощью оптимизатора БЗ (ОБЗ) на мягких вычислениях для динамического ОУ «каретка перемещения – перевернутый маятник». На этом же примере проиллюстрировано применение квантового нечеткого вывода (КНВ) для формирования робастных сигналов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора за счет самоорганизации ранее спроектированных (с помощью ОБЗ на мягких вычислениях) БЗ.

Б. Проблемы разработки ИСУ. Одной из трудностей разработки ИСУ для непредвиденных ситуаций управления является решение проблемы проектирования соответствующей робастной БЗ, использующей объективные знания о динамическом поведении ОУ и нечетких ПИД-регуляторов. Решение данной задачи существенно зависит от возможности разработки алгоритмически разрешимой, физически/математически корректной модели и инструментария практической реализации процесса извлечения, обработки и формирования объективных знаний без участия эксперта. Введение физических и информационных ограничений в формализованное описание модели ОУ существенно влияет на качество формируемой БЗ в ИСУ, а исключение этих ограничений из описания моделей ОУ приводит к некорректности и потере робастности проектируемых законов управления соответственно. Поэтому одной из сложных и ключевых проблем разработки основы ИТ проектирования ИСУ для такого широкого класса ОУ является создание процесса проектирования робастных БЗ в непредвиденных ситуациях управления для исполнительского уровня иерархической структуры управления, учитывающего в продукционных правилах БЗ реальные физические и информационные ограничения.

В. Проблемы разработки ИТ проектирования и структуры ИСУ. Рисунок 1.1 показывает типовую структуру ИСУ и описывает рассматриваемую в данной книге проблему проектирования объективной БЗ.

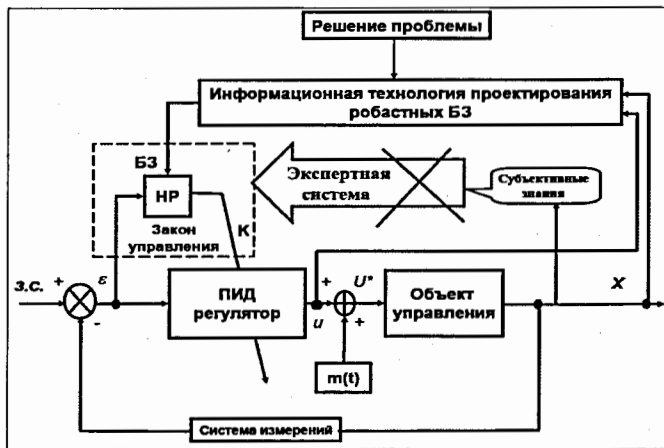


Рис. 1.1. Проектирование робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления: проблема проектирования БЗ

Рис. 1.2 представляет структурную схему информационной технологии и этапы проектирования объективной БЗ для робастных ИСУ, основанных на новых видах интеллектуальных вычислений (ИВ). Отметим, что выходной сигнал из НР на рис. 1.1 определяет вектор усиления ПИД-регулятора $K = \{k_p, k_D, k_I\}$, где $\{k_p, k_D, k_I\}$ означают 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.



Рис. 1.2. Проектирование робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления: структура технологии и этапы проектирования

Примечание 3. 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 ИВ позволяет использовать непосредственно результаты измерений и извлекать из них знания без субъективной интерпретации за счет применения функций пригодности в ГА. Подчеркнем, что в данной книге используются стандартные обозначения структурных схем ИСУ. Поэтому задачей технологии проектирования (обозначенной на рис. 1.1 и структурно представленной на рис. 1.2) является формирование объективных робастных БЗ в ИСУ для непредвиденных ситуаций управления.

Примечание 4. На рис. 1.1 (и ниже на рис. 1.2), а также далее по тексту, используются следующие обозначения: з.с. – задающий сигнал (цель управления);

$u(t)$ – управляющая сила; $m(t)$ – случайные шумы (возмущения), 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. 1.1 пунктирная рамка блока «Закон управления» не охватывает ПИД-регулятор, хотя управляющий сигнал u формируется именно этим устройством.

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 книге в силу интенсивного применения в качестве исходного примера выбран ПИД-регулятор, а данный блок выделен и к нему применен термин «Закон управления». Отметим, что многие регуляторы со скользящими режимами, САУ с переменной структурой, дробные регуляторы (fractional или noninteger order controllers) и др. были исследованы авторами данной работы. Было показано, что они также эффективно проектируются разработанной технологией, представленной на рис. 1.1. 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 надежностью управления за счет повышения уровня интеллектуальности традиционного регулятора.*

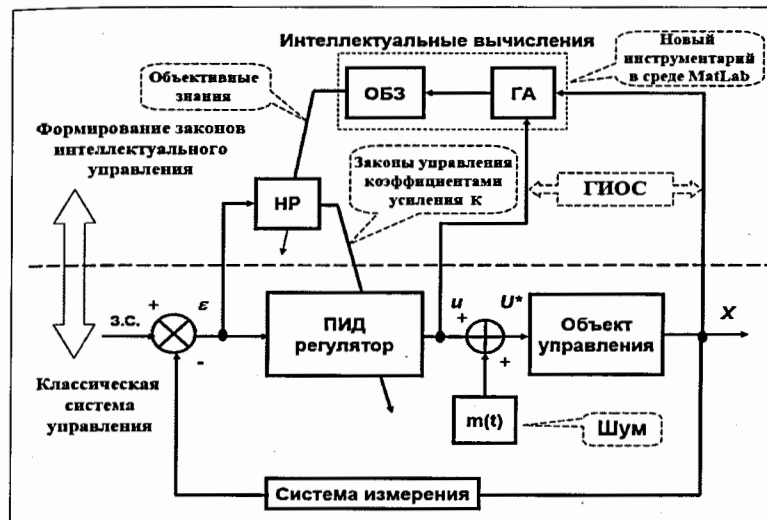
Отметим и кратко опишем основные этапы ИТ проектирования робастных БЗ, представленной на рис. 1.2.

На первом этапе (I) проектирования с помощью технологии мягких вычислений (блок ОБЗ) формируется конечное множество БЗ для конкретных ситуаций управления, отмеченные на рис. 1.2 выноской «Обучающие ситуации управления». На данном этапе 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 ИТ проектирования.

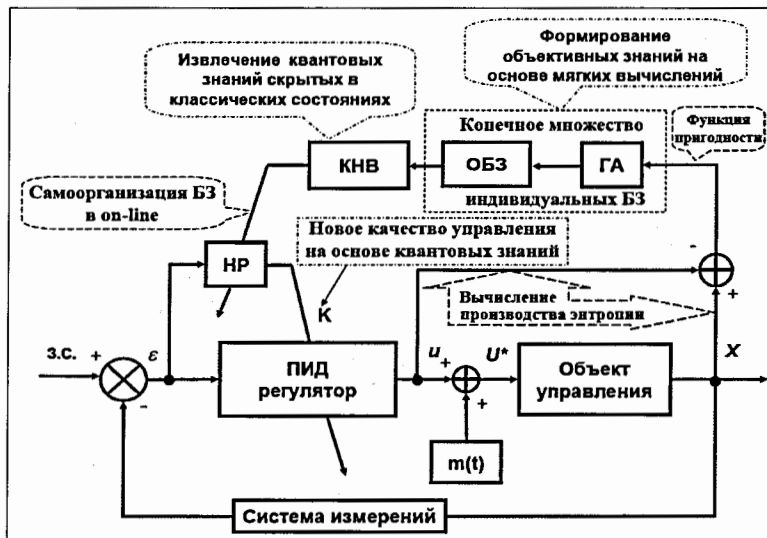
Последовательный переход (от частичной к глобальной робастности) приводит к процессу проектирования квантового НР с использованием квантовых стратегий в нечетком логическом выводе (в виде квантового нечеткого вывода - КНВ, обозначенный соответствующей выноской на рис. 1.2). Реализация данного перехода осуществляется на этапах (II), (III) и (IV) соответственно. После получения результатов работы КНВ блок ГА формирует коэффициенты шкалирования для обобщенных нормированных коэффициентов усиления ПИД-регулятора. Результаты (ii) ∈ этапу (II) и (iii) ∈ этапу (III). Остальные подэтапы процесса проектирования показаны соответствующими выносками на рис. 1.2, интерпретация которых представлена ниже.

Процесс проектирования самоорганизации робастных БЗ в непредвиденных ситуациях управления реализуется суммарным действием перечисленных этапов проектирования.

Структуры робастных ИСУ, основанные на разработанной технологии проектирования (см. рис.1.2), показаны на рис. 1.3.



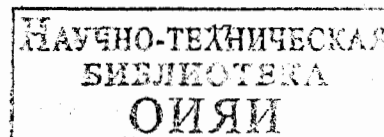
а)



б)

Рис. 1.3. 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

152096



Отметим некоторые особенности обозначений на рис. 1.3. Двусторонняя стрелка «Производство энтропии» на рис. 1.3(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, см. ниже рис. 1.7(а) и является термодинамической величиной. Поэтому в сумматоре на рис. 1.3 выполняется корректная операция с физически однородными переменными (в соответствии с законами термодинамики открытых систем). Пример применения данной операции рассмотрен ниже в Главе 2.

В модели КНВ на рис. 1.3(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 (см., ниже рис. 1.13 и 1.18), формирует и реализует в реальном времени законы управления с учетом нелинейных физических и информационных ограничений на условия функционирования ОУ. В результате с помощью КНВ робастность ИСУ проектируется в законах управления коэффициентами усиления простого ПИД-регулятора, включающих отмеченные особенности. В качестве инструментария моделирования продукционных правил БЗ используются технологии мягких и квантовых вычислений.

Г. *Цель работы.* В данной работе рассматривается квантовый алгоритм управления самоорганизацией знаний и роль аналогов физических (квантовых и термодинамических) эффектов в реализации процесса гарантированного достижения определенного качества управления. При этом основное внимание уделяется описанию качественных особенностей биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации, основные компоненты которой описываются квантовыми операторами и составляют содержание разработанной модели квантового алгоритма управления процессом самоорганизации. Рассматривается задача робастного управления в непредвиденных ситуациях на основе квантовых стратегий принятия решений в виде инструментария КНВ, как частного случая разработанного обобщенного квантового алгоритма управления самоорганизацией. В Главах 2 и 3 демонстрируются результаты применения технологии проектирования робастных БЗ в структуре ИСУ (см. рис. 1.2 и рис. 1.3(б)).

Д. *Прикладные аспекты.* 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. Введенный в данной книге КА является новым квантовым поисковым алгоритмом. Решение задачи проектирования робастного управления ОУ (локально или глобально неустойчивым и существенно нелинейным), с векторным критерием качества управления, рассматривается в данной работе в качестве примера (Benchmark) эффективного использования разработанной информационной технологии проектирования (см. Главу 2).

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.

Е. *Методология и результаты исследования.* Обсуждается роль, особенности и методология применения квантовых вычислений в задачах проектирования робастных ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления. Разработанный КА управления самоорганизацией содержит как частный случай модель КНВ и алгоритм управления самоорганизацией робастных БЗ. Целью применения КА управления самоорганизацией БЗ, используемого в контуре управления, является выполнение введенного термодинамического критерия (в виде минимума обобщенной энтропии в установленном соотношении между такими качественными характеристиками управления как устойчивость, управляемость и робастность). На примере существенно-нелинейного и глобально неустойчивого объекта управления рассмотрено применение КА управления самоорганизацией к решению задачи векторной оптимизации на основе принципа декомпозиции БЗ (см. Главу 2).

Напомним некоторые особенности технологий ИВ для проектирования ИСУ.

1.2. Технологии ИВ в процессах проектирования ИСУ

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 достижима. Основой ИВ являются не только числовые шкалы (как в традиционных вычислениях), но и качественные характеристики исследуемого объекта. Целью и возможностью ИВ является непосредственное определение качественных характеристик объекта, алгоритмически оперируя последними также как на числовых шкалах. Количественные оценки объекта можно получить из качественных оценок обратным отображением шкал. Мягкие и квантовые вычисления являются примерами таких исчислений.

При этом с помощью квантовых вычислений многие классические задачи могут быть решены с экспоненциальным ускорением или решены алгоритмически неразрешимые классические задачи.

Так, например, для определения качественной характеристики функции (постоянная или балансирующая для четырех значений аргумента) в традиционном подходе требуется четыре шага численных операций, в тоже время квантовый алгоритм Дейча определяет данное качество исследуемой функции за один шаг. Алгоритм Шора решает задачу факторизации заданного числа с экспоненциальной скоростью по отношению к лучшему известному алгоритму, а при увеличении длины числа решает алгоритмически неразрешимую задачу с полиномиальной сложностью. Алгоритм Гровера осуществляет поиск решения в неструктурированных данных с квадратичной скоростью.

Нечеткие множества, введенные в 1965г. Л. Заде, позволяют расширить (многovesкое) определение самого числа и ввести множество новых шкал качественных характеристик, которые невозможно определить методами классических исчислений. Такие исчисления открывают новые возможности для теории и проектирования ИСУ.

Нестандартные логики, используемые в основе ИВ и 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. Сам термин «нестандартная» логика уже включает такую ситуацию, а его введение обосновано стремлением решать задачи, не решаемые существующими технологиями вычислений. К таким технологиям ИВ относятся мягкие и квантовые вычисления, используемые в данной работе для проектирования робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления.

Применение новых технологий в инженерной практике теории и систем часто сталкивается с проблемами преодоления инерции «прагматической» интуиции и инженерной философии. Так происходило в середине 70-х годов прошлого столетия при внедрении в инженерную практику идей мягких вычислений на основе теории нечетких множеств в виде нечетких систем управления.

Рассмотрим кратко методологические особенности совместного применения технологий мягких и квантовых вычислений.

1.2.1. Технология мягких вычислений

Обобщение понятия числа за счет введения субъективной качественной шкалы (и отображения в нее в виде лингвистической аппроксимации его количественной характеристики) привело к 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 является *нечеткая логика*, в которой 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. Только практическое применение нечетких САУ классическими ОУ разъяснило и сняло разногласия и трудности определений индивидуальных и массовых событий, операции усреднения и извлечения информации и т.п.

В результате нечеткие модели логического вывода в фазовом пространстве лингвистических переменных позволили разработать нечеткие ИСУ, эффективно решающие задачи управления в условиях существенной неопределенности исходной информации, слабой формализации описания ОУ, нечеткости целей управления. Одной из основных проблем практического и эффективного применения технологии мягких вычислений в задачах управления являлось решение следующих задач: (а) объективное определение вида функции принадлежности и ее параметров в продукционных правилах БЗ; (б) определение оптимальной структуры нечетких нейронных сетей (ННС) в задачах обучения (аппроксимация обучающего сигнала (ОС) с требуемой ошибкой и с минимальным количеством продукционных правил в БЗ); (в) применение генетического алгоритма (ГА) в задачах многокритериального управления и наличии ограничений на параметры ОУ; и др.

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе разработанного оптимизатора БЗ (ОБЗ) 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. Данная задача подробно была рассмотрена в работе авторов, в которой приведены описание структуры ОБЗ, решаемые задачи оптимизации и дана постановка задачи. Согласно рис. 1.2, выходные данные из ОБЗ на этапе I являются входными данными для этапа II, использующего

КНВ для проектирования робастных БЗ. Поэтому отметим некоторые особенности ОБЗ на этапе I. В разработанном оптимизаторе используются три ГА. Физически первый ГА осуществляет оптимизацию лингвистических переменных в левой части продукционного правила типа «*Если А...*» (см. ниже рис. 1.3), устраняет избыточность информации в обучаемом сигнале и реализует выбор оптимальной мощности термножеств лингвистических переменных компонент в обучаемом сигнале. Вторым ГА осуществляется оптимизацию базы продукционных правил и реализует выбор оптимальных параметров правых частей продукционных правил типа «*...ТО В*». Третий ГА осуществляет настройку БЗ. Применение данных ГА позволяет спроектировать, как следствие, оптимальную структуру ННС (вид функций принадлежности и их параметры, количество внутренних слоев и др.), аппроксимирующей ОС с требуемой ошибкой.

Рис. 1.4 показывает результат применения второго ГА для оптимизации количества продукционных правил при аппроксимации сигнала обучения с заданной ошибкой аппроксимации.

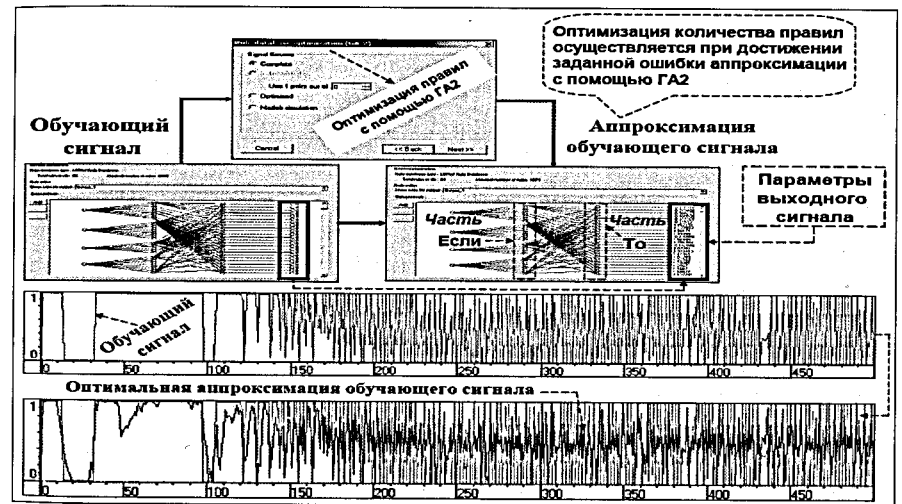


Рис. 1.4. Пример оптимизации количества продукционных правил при аппроксимации сигнала обучения с заданной ошибкой аппроксимации

Рис. 1.5 демонстрирует результат работы второго ГА в ОБЗ при проектировании законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора, используемых в примере моделирования системы «Картка – маятник», рассмотренном в Главе 2.

Объединение методологий стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментарии (разработанного авторами) ОБЗ позволило повысить робастность проектируемых БЗ и решать сложные задачи формирования объективных знаний. Однако, при существенном изменении или непредвиденных ситуациях управления, спроектированные законы управления, не всегда сохраняют свойство робастности. Данный эффект определяется функциональной структурой ГА, в которой (по определению) пространство поиска решений фиксировано и задается экспертом, а

также выбором функции пригодности, которая рассматривается как критерий оптимальности управления.

Мнение эксперта проявляется, в общем случае, в его опыте корректного задания пространства поиска ГА и знании вида функции пригодности. Таким образом, решение, найденное при помощи технологии мягких вычислений (на основе ГА), оптимальное; оно соответствует заданной ситуации управления и содержит (в неявном виде) субъективность исходной информации. При неправильном определении пространства поиска и функции пригодности решение может неадекватно соответствовать заданной ситуации управления.

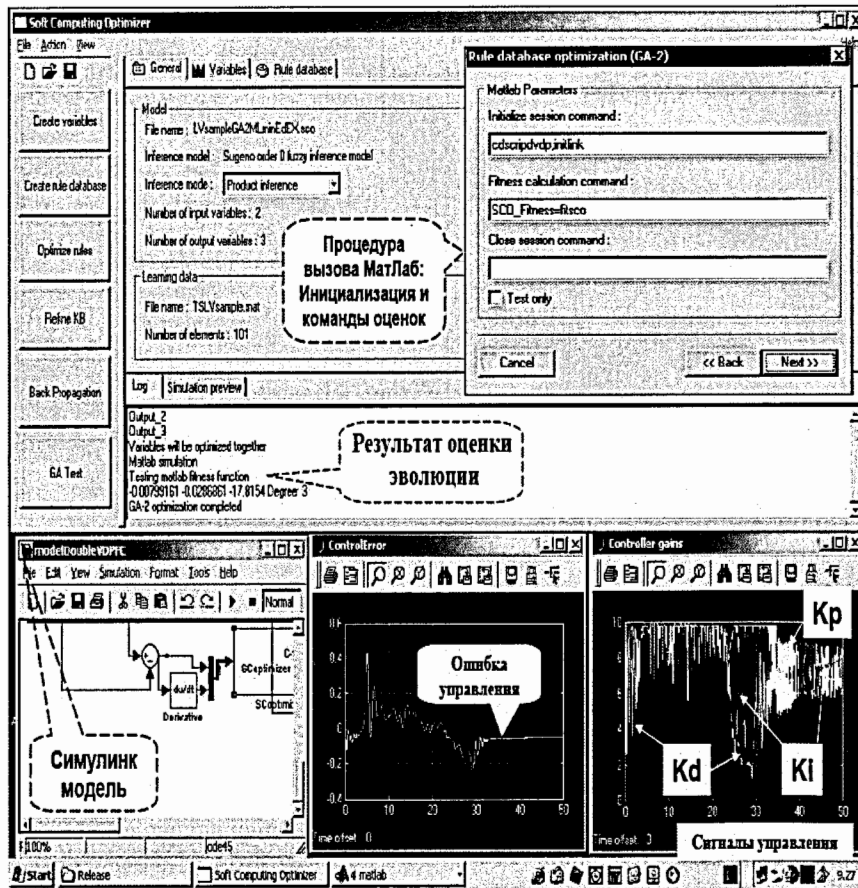


Рис. 1.5. Пример проектирования законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора с заданной ошибкой аппроксимации ОС

Отметим, что решение задачи проектирования САУ для нештатных ситуаций с помощью дополнительных корректирующих контуров управления восходит к середине 80-х годов прошлого столетия и приводит к появлению избыточности информации в

контурах управления. Как следствие, это приводит к снижению надежности САУ. Отметим также, что современные ПИД-регуляторы все чаще на практике реализуются программным путем и на новой современной элементной базе (спинтроника). Поэтому обладают повышенной надежностью.

Данный вопрос был подробно исследован в работах многих авторов.

Проектирование управления в сложных ситуациях простым ПИД-регулятором с повышенным уровнем интеллектуальности с помощью технологий ИВ и является одним из возможных решений таких задач. Поэтому для поиска оптимальных решений для таких ситуаций управления требуется привлечение новых технологий ИВ, таких как технологии интеллектуальных квантовых и мягких 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 годов прошлого столетия) о необходимости применения квантовых вычислений к решению только квантовых задач.

1.2.2. Технология квантовых вычислений

В квантовой логике технологии квантовых ИВ и квантовой теории информации не выполняется классический закон *дистрибутивности*, что отражает новые (необычные) явления типа некоммукативности переменных, неопределенности и невозможности одновременного точного измерения наблюдаемых и др. в квантовой механике. 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 информационной энтропией), при слиянии в единую систему образуют чистое (с нулевой энтропией фон Неймана) запутанное состояние, обладающее высшим уровнем порядка (эффект квантовой самоорганизации). Квантовая суперпозиция, состоящая из двух классических *взаимоисключающих* логических состояний, позволяет образовать одно единое состояние, содержащее, например, одновременно логически противоречащие «да» и «нет» (кот Шредингера). 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 дополнительной информации.

Квантовые стратегии принятия решений позволяют из двух классических игроков, не имеющих стратегий выигрыша в данной игровой ситуации, сформировать игрока-победителя (эффект «Паррондо»), использующего квантовый подход к решению задачи (см. Главу 3).

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.

Рис. 1.6 демонстрирует физическое различие в определении вычислительного базиса мягких и квантовых вычислений.

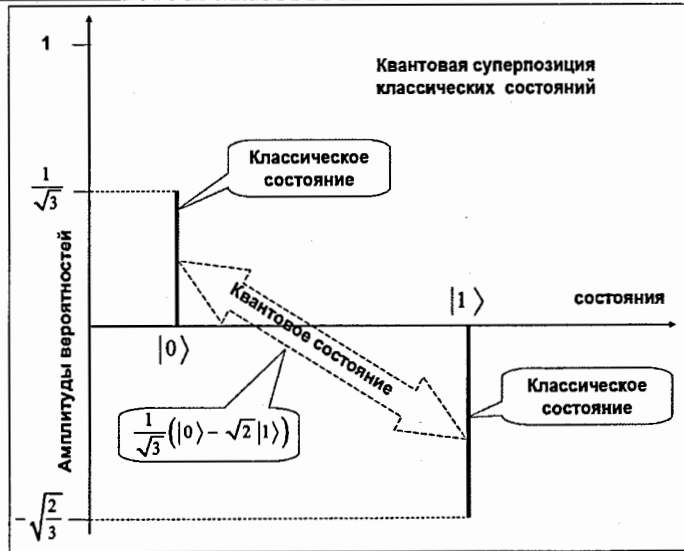
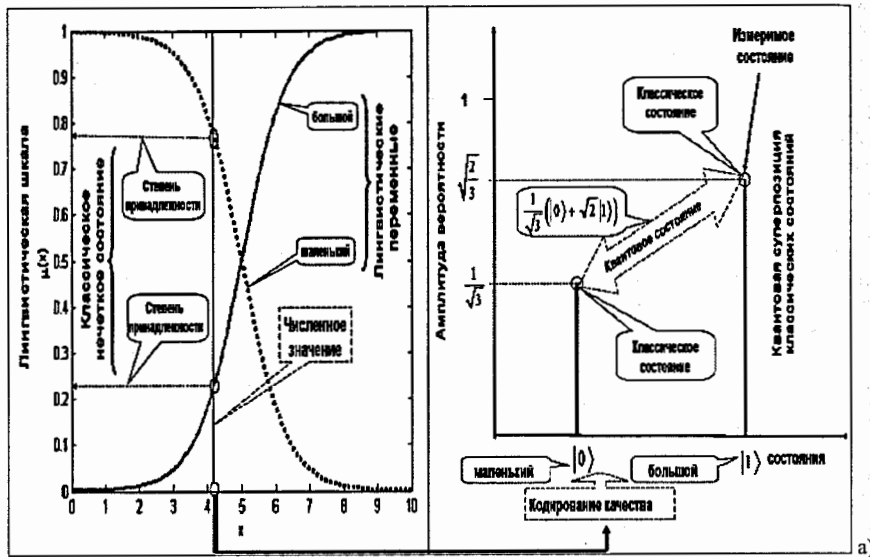


Рис. 1.6. Физическое различие между нечетким и квантовым состояниями:
а) сравнение нечеткого состояния и квантовой суперпозиции; б) состояния квантовой суперпозиции с отрицательной амплитудой вероятности

Из рис. 1.6 (а) видно, что нечеткое состояние числа имеет *два значения* функции принадлежности на шкале лингвистического описания (принцип исключения третьего не выполняется), а квантовое состояние состоит из *двух классических состояний*, качественные характеристики которых закодированы в квантовых переменных, связанных принципом квантовой логической дополнителности. При этом квантовое состояние может иметь как положительное, так и отрицательное значения амплитуды вероятности (см. рис. 1.6 (б)), что существенно отличает квантовую теорию вероятностей от аксиоматики классической теории вероятностей Колмогорова.

Отметим, что возможность существования даже отрицательных значений классической вероятности в квантовых запутанных состояниях была рассмотрена во многих работах по квантовой механике. Поэтому традиционно в работах по квантовой теории вероятностей обсуждается сравнение и отличие аксиоматики Колмогорова от соответствующих определений квантовой теории.

Возможность совместного использования вычислительных базисов, проиллюстрированных на рис. 1.6, приводит к новому виду ИВ – квантовым мягким вычислениям.

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

Такой подход существенно расширяет возможности самих ИВ.

1.2.3. Постановка задачи и особенности метода решения

В данном разделе рассмотрена следующая задача: разработать методологию и основу ИТ проектирования самоорганизующихся ИСУ. Алгоритмический базис такой технологии составляет квантовый алгоритм управления самоорганизацией БЗ.

Примечание 5. Под процессом самоорганизации робастных БЗ понимается процесс проектирования НР, формирующего на выходе робастные сигналы адаптивного управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств, задающих управляющую силу ОУ. При этом используется реакция продукционных правил, ранее спроектированных (на заданные ситуации управления) робастных БЗ 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 разработанного алгоритма самоорганизации (см. ниже).

Объединение на структурном уровне спроектированных ранее конечного числа БЗ совместно с моделью КНВ в один блок квантового НР дает возможность формировать в реальном времени робастное управление из реакций продукционных правил указанных БЗ на непредвиденную ситуацию управления. При этом достаточно использовать только минимальную информацию об изменении ситуации управления, содержащейся в новой ошибке управления (см. ниже описание рис. 1.13 и 1.18).

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

При этом осуществляется редукция избыточной информации в классических состояниях сигналов управления. Результатом работы алгоритма управления 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.

Примечание 6. Во избежание недоразумений в интерпретации процесса самоорганизации, отметим также, что физически по определению «самосборка» и «самоорганизация» являются разными понятиями. Процесс «самосборка» отличается от «самоорганизации» отсутствием в общем виде в процессе «самосборка» предварительного выбора типа корреляции между невязанно связанными элементами («строительными блоками») и процесс осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий. Управление выбором (типа и вида) квантовой корреляции между «строительными блоками» в процессе «самосборка» определяет вид синергетической кооперации в формируемой за счет самоорганизации структуры. Поэтому введение управления выбором корреляции позволяет учитывать в формируемых структурах синергетику целенаправленных кооперативных эффектов из ограниченного числа «строительных блоков» и составляет основу процесса самоорганизации.

Дополнительные физические аспекты самоорганизации, детали и технические подробности управления самоорганизацией читатель может найти в работах [<http://www.qsortimizer.com/>], раздел «Технология проектирования и самоорганизация робастных БЗ»].

Решение данной задачи непосредственно связано со следующей (трудной и принципиально важной для теории и систем управления) проблемой: *определение роли и влияния аналогов квантовых эффектов на повышение уровня робастности проектируемых ИСУ.*

Согласно рис. 1.2 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* (КНВ) осуществляется самоорганизация активных (в реальном времени) знаний из реакций, спроектированных индивидуальных БЗ на новую, непредвиденную ситуацию управления.

Уровни самоорганизации в иерархии когнитивных эволюционных процессов управления были проанализированы 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) нечеткого 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.

Решение поставленной задачи осуществляется на основе технологии мягких и квантовых вычислений. В разработанной ИТ эффективно реализуется новый принцип проектирования робастных структур ИСУ: *проектирование простого по структуре и в практической реализации НР с повышенным уровнем интеллектуальности (wise controller) для эффективного управления сложными ОУ.*

1.3. Квантовый алгоритм управления процессом самоорганизации

Обобщенной физической характеристикой самоорганизующихся систем, представляющей особый интерес для проектирования ИСУ, является следующая характеристика: они обладают *робастными* и/или *гибкими* структурами. При этом за счет отмеченных свойств сам процесс биологически воспроизводимой самоорганизации включает в себя процессы самообучения и самоадаптации.

Наличие свойства самоорганизации в природных и биологически воспроизводимых системах объясняется рядом факторов.

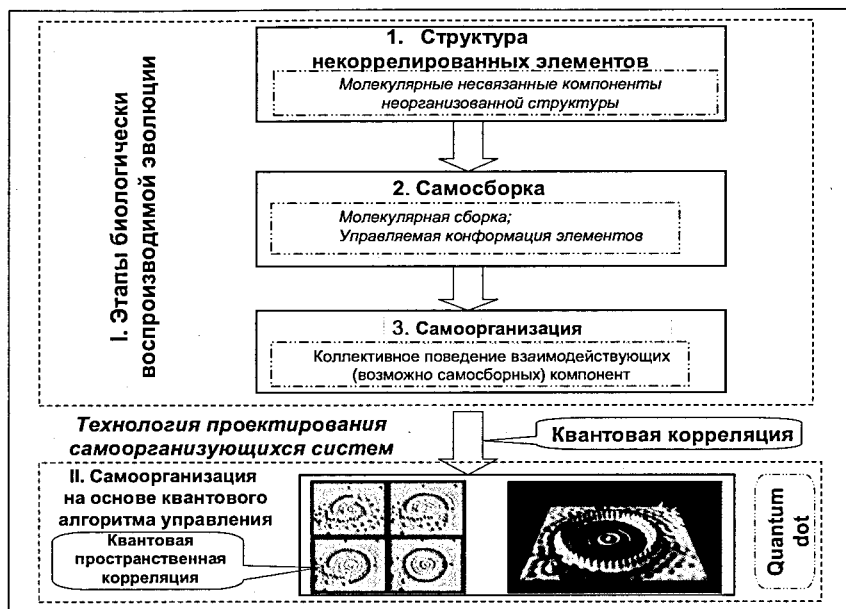
Первым фактом наличия толерантности является *избыточность* или свойство *распределения* самоорганизации между выделенными «защищенными» зонами эволюции структуры системы, в которых выполняется свойство самоорганизации. Вторым фактором наличия внутренней робастности является ее проявление за счет рандомизации, флуктуаций или шумов. Третьим фактором является проявление стабилизирующих эффектов гибких структур в контурах обратных связей.

Рассмотрим общие характеристики (биологически воспроизводимой в естественной природе) процессов самоорганизации. Данные характеристики составляют основу инженерии проектирования (см. рис. 1.2), а также учитываются при разработке в структурах ИСУ модели квантового алгоритма управления самоорганизацией робастных БЗ (см. рис. 1.3(б)).

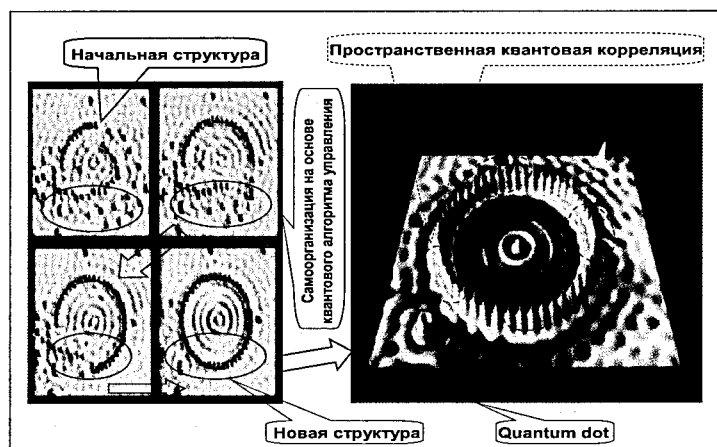
1.3.1. Биологически воспроизводимый КА самоорганизации

Рис. 1.7 иллюстрирует структуру биологически воспроизводимого алгоритма самоорганизации, разработанного на основе анализа макро - и микро - моделей самоорганизации.

А. Для анализа в качестве примеров были выбраны следующие информативно представительные модели из многоуровневой иерархической структуры процессов самоорганизации: 1) самоорганизация поведения толпы людей в тоннеле; 2) самоорганизация (людей, колонии муравьев и т.п.) в экстремальных условиях (типа паники при пожаре и т.п.); 3) самоорганизация движения автомобилей на скоростных трассах; 4) самоорганизация на микроуровне (колонии муравьев при поиске пищи, интеллектуальные активные агенты с обменом информации, инженерия самоорганизации колоний бактерий); 5) квантовая кооперация насекомых, квантовая самоорганизация наноструктур (квантовые кораллы) за счет передачи информации на микроуровне и изменения типа квантовой корреляции.



а)



б)

Рис. 1.7. Структура биологически воспроизводимого алгоритма самоорганизации: а) блок-схема КА самоорганизации; б) пример пространственно-временной квантовой корреляции при самоорганизации квантовой точечной структуры

Отметим общие качественные особенности моделей процессов самоорганизации, полученные на основе проведенного анализа.

Процесс самоорганизации в общем виде включает четыре составляющих механизма: (i) позитивная обратная связь; (ii) отрицательная обратная связь; (iii)

сбалансированное соотношение между используемым и потенциальным ресурсами эволюции (информационно-термодинамического) поведения динамической системы; и (iv) многократное (физическое и информационное) взаимодействие между компонентами.

Природная (биологически воспроизводимая) эволюция достижения самоорганизации динамической системы основана на следующих этапах (см. рис. 1.7): (i) формирование (задание) множества невязанных элементов «строительных блоков» (templating) исходной структуры; (ii) самосборка (self-assembling) новой структуры; и (iii) самоорганизация (self-organization) робастной структуры.

При этом, как отмечалось выше в Примечании 6, «самосборка» в общем виде отличается от «самоорганизации» отсутствием в процессе «самосборка» предварительного выбора типа и вида корреляции между невязанными элементами, а сам процесс осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий.

Данные этапы отражены на рис. 1.7(а).

Рисунок 1.7(б) демонстрирует наличие реальной (экспериментально обнаруженной) квантовой самоорганизации в квантовой точечной структуре (quantum dot). Самоорганизация в этом случае сформирована благодаря наличию пространственно-временной корреляции, содержащейся изначально (закодированной) в структуре «строительных блоков».

Данный экспериментальный факт является физической основой для построения математической модели КА самоорганизации.

Рассмотрим ниже на конкретном примере применение приведенных сведений в разработке математической модели и физической интерпретации КА самоорганизации на рис. 1.7.

1.3.2. Физическая интерпретация квантовой самоорганизации

Рассмотрим общие свойства и признаки качественного описания квантовых эффектов в самоорганизации эволюционных процессов. В качестве наглядного примера обсудим эволюционный процесс самоорганизации пешеходов в различных типах коридоров.

На рис. 1.8(а) показаны динамика движения пешеходов в ограниченном пространстве с различной геометрией и различные типы кооперативного поведения людей, возникающие в процессе самоорганизации толпы пешеходов.

Рисунок 1.8(б) демонстрирует феноменологию возникновения различных типов квантовой корреляции (временной и пространственной), влияющей на вид самоорганизации при информационном взаимодействии потоков пешеходов. В частности, на рис. 1.8(б) (см., Блок 1 на рис. 1.8(а)) показан процесс самоорганизации (позволяющий избежать столкновений) встречных потоков пешеходов, используя суперпозицию в виде кооперации пар людей.

Аналогично рис. 1.8(б) демонстрирует на микроуровне процесс обмена информацией между отдельными парами пешеходов с запутанными состояниями на встречных потоках пешеходов в геометрически разделенных перегородками для пешеходов пространствах (Блок 2 на рис. 1.8(а)). Роль квантовой интерференции также демонстрируется на рис. 1.8(б) (для случая Блока 3 на рис. 1.8(а)). Рисунок 1.8(б) демонстрирует эффект временной корреляции для случая Блока 4 на рис. 1.8(а).

Рис. 1.9 описывает эволюцию квантовых операторов, описывающих динамическое поведение пешеходов в перечисленных на рис. 1.8(а и б) ситуациях.

Так, например, физически квантовая суперпозиция возникает в случае движения пешеходов в туннеле и продемонстрирована на рис. 1.9(а). На рис. 1.9(б) показана эволюция квантовой корреляции (запутанных состояний) в зависимости от количества конфликтных столкновений пешеходов в ограниченном пространстве. На рис. 1.9(в) феноменология возникновения квантовой интерференции показана в случае движения пешеходов по встречным потокам при сложной геометрии разделения потоков (случай возникновения паники у пешеходов).

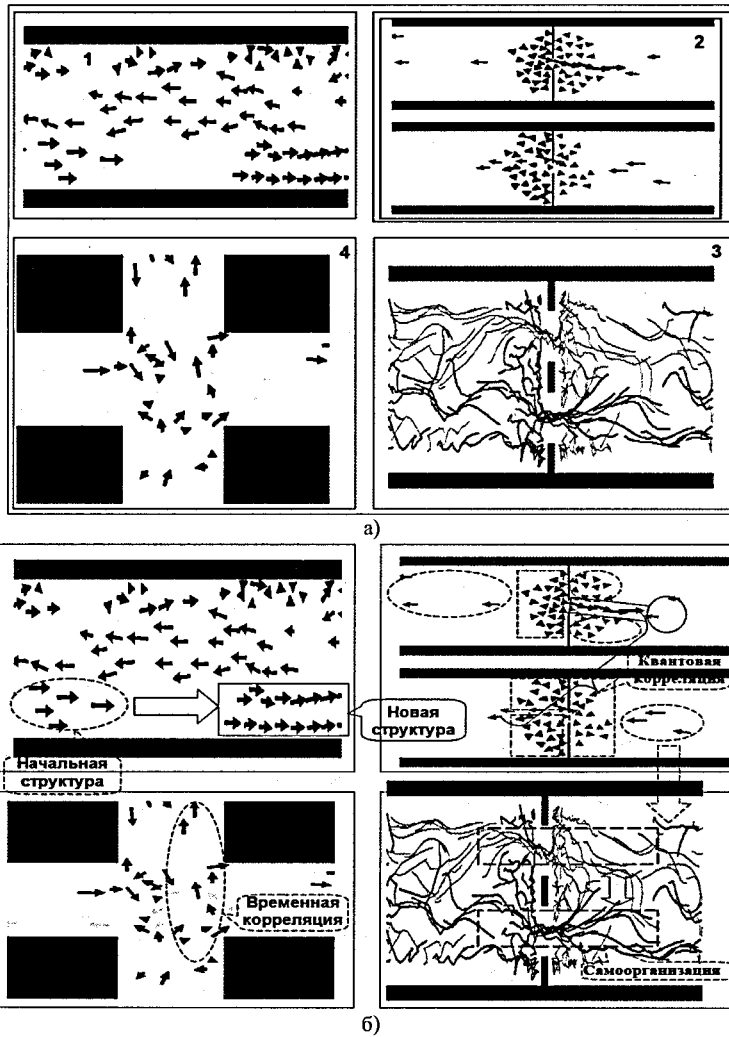


Рис. 1.8. Динамика движения пешеходов в ограниченном пространстве с различной геометрией и различными типами кооперативного поведения людей:
 а) примеры самоорганизации толпы пешеходов;
 б) феноменология возникновения различных типов квантовой корреляции

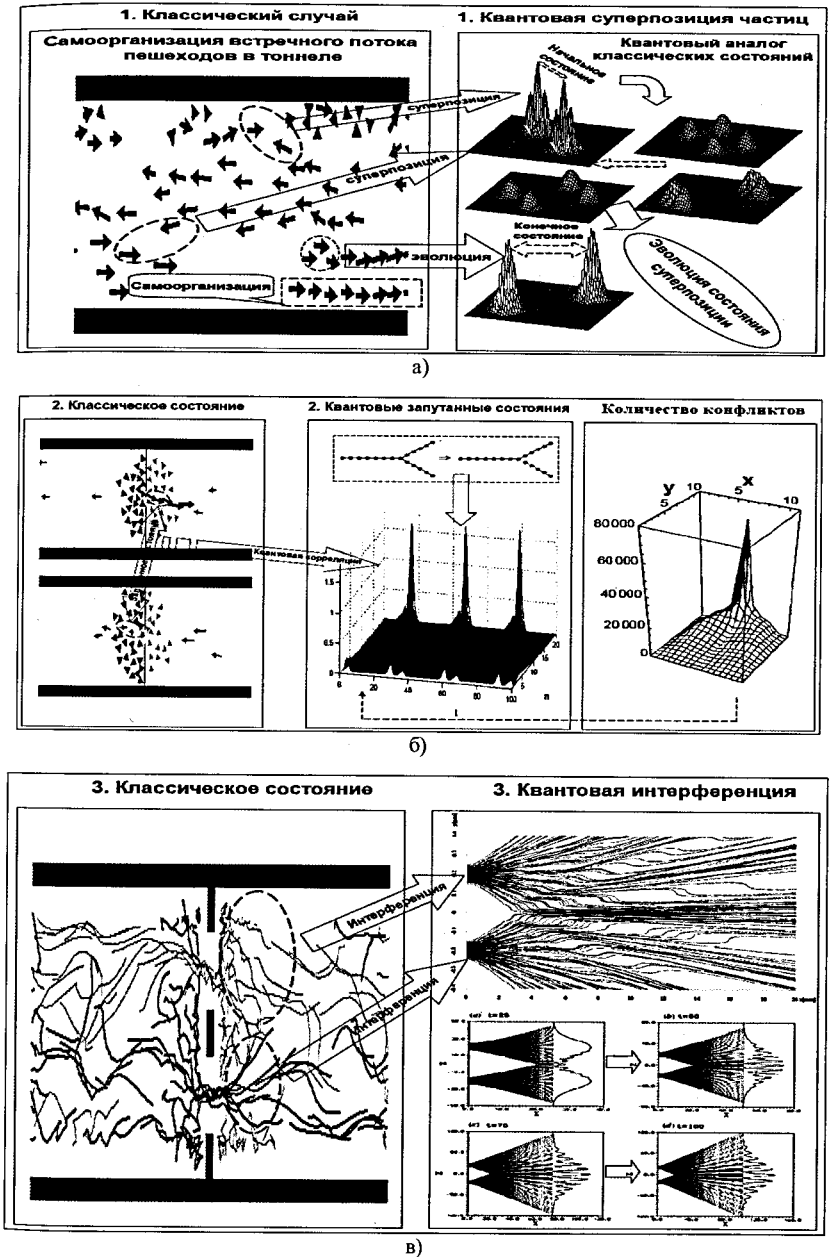


Рис. 1.9. Эволюция квантовых операторов, описывающих динамическое поведение пешеходов:
 а) квантовая суперпозиция; б) эволюция квантовой корреляции (запутанных состояний);
 в) феноменология возникновения квантовой интерференции

Процесс самоорганизации, таким образом, может рассматриваться как макроскопический процесс, содержащий квантовые (скрытые) эффекты на микроуровне в информационно взаимодействующих компонентах. За счет эволюции локально взаимодействующих (индивидуальных) суперпозиционных состояний, квантовой корреляции и интерференции осуществляется самоорганизация пешеходов, позволяющая избегать столкновений.

Подробное описание физических свойств операторов, приведенных на рис. 1.9, дано в работах [http://www.qcoptimizer.com/, раздел «Технология проектирования и самоорганизация робастных БЗ»].

Примечание 7. Существует «парадокс», утверждающий, что процессы самоорганизации находятся в противоречии со вторым законом термодинамики, согласно которому эволюция систем стремится к беспорядку (возрастанию энтропии). Данный «парадокс» разрешен в терминах многократных взаимодействий макро- и микроуровней эволюции (открытая термодинамическая система) самоорганизации и снижением производства энтропии на макроуровне (увеличение упорядоченности) за счет повышения производства энтропии на микроуровне (увеличение хаоса поведения).

Все выбранные для анализа физические примеры самоорганизации обладают перечисленными механизмами.

Б. Из анализа свойств перечисленных моделей самоорганизации следует наличие у них общих биологически воспроизводимых и экспериментально обнаруженных квантовых эффектов, присутствующих в процессах самоорганизации, а сами модели основаны на следующих *информационно-термодинамических* концепциях: (i) взаимодействия между элементами и микро- и макроуровнями осуществляются с обменом информацией. Так, в модели интеллектуальных агентов микроуровень представляется в виде информационного пространства, на котором проводится обмен информацией между агентами и приводит к уменьшению энтропии на макроуровне за счет возрастанию энтропии на микроуровне; (ii) коммуникация и передача информации на микроуровне (явление «квантовый мираж» в квантовых кораллах, см. рис. 1.7(б); (iii) различные типы квантовой корреляции спинов (или запутанных состояний – entanglement), используемых при проектировании различных самоорганизующихся структур; например, в квантовых точечных структурах – quantum dot; (iv) координированное управление за счет извлечения и обмена информацией; например, самоорганизация коллектива роботов за счет информационно-энтропийного обмена между агентами и уровнями организации.

На рис. 1.7, 1.8 и 1.9 отмечены перечисленные алгоритмические особенности моделей самоорганизации. Ниже в пп. 1.4 рассмотрим модель квантового алгоритма управления самоорганизацией, включающего перечисленные эффекты и физические особенности квантовых операторов моделей самоорганизации.

1.4. Структура обобщенного квантового алгоритма самоорганизации: математическая модель квантовых операторов

Рассмотрим предварительно необходимые определения и факты из теории квантовых вычислений, квантовой теории информации и КА, используемых в структуре КА управления самоорганизации.

1.4.1. Структура и особенности квантового алгоритма самоорганизации

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. 1.10 дано качественное сравнение структур КА и алгоритма самоорганизации, позволяющее наглядно представить квантовую природу алгоритма самоорганизации, представленного на рис. 1.7(а).

Прежде всего, отметим некоторые особенности КА.

Рис. 1.10(а, б) показывает обобщенную структуру КА в теории квантовых вычислений.

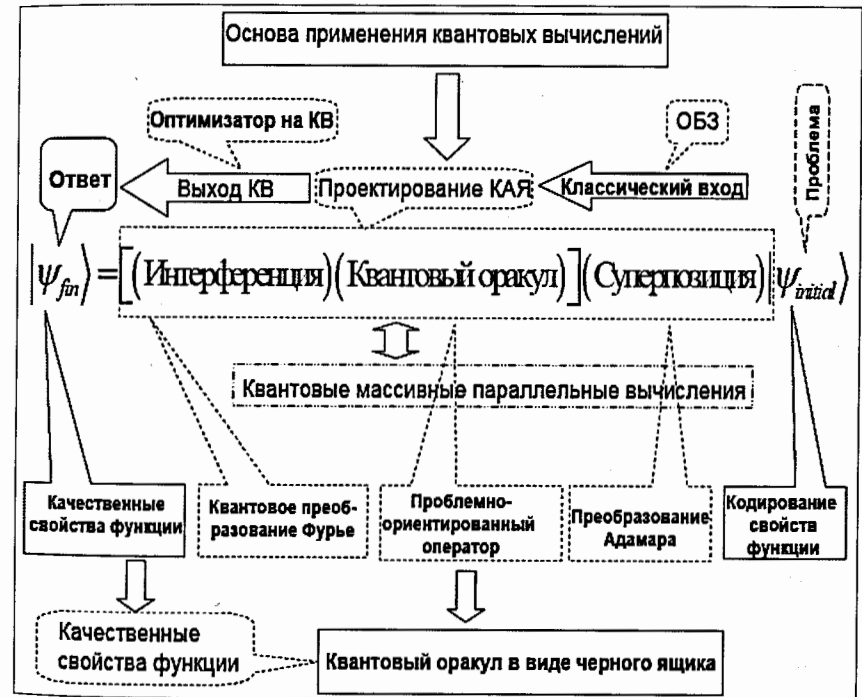


Рис. 1.10 (а). Структура и основные операторы квантовых алгоритмов: структура и функциональные связи квантового алгоритма

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. 1.10(а) обозначен квантовый оператор, осуществляющий данный поиск. Вид оператора оракула определяет тип КА (поисковый или принятия решений).

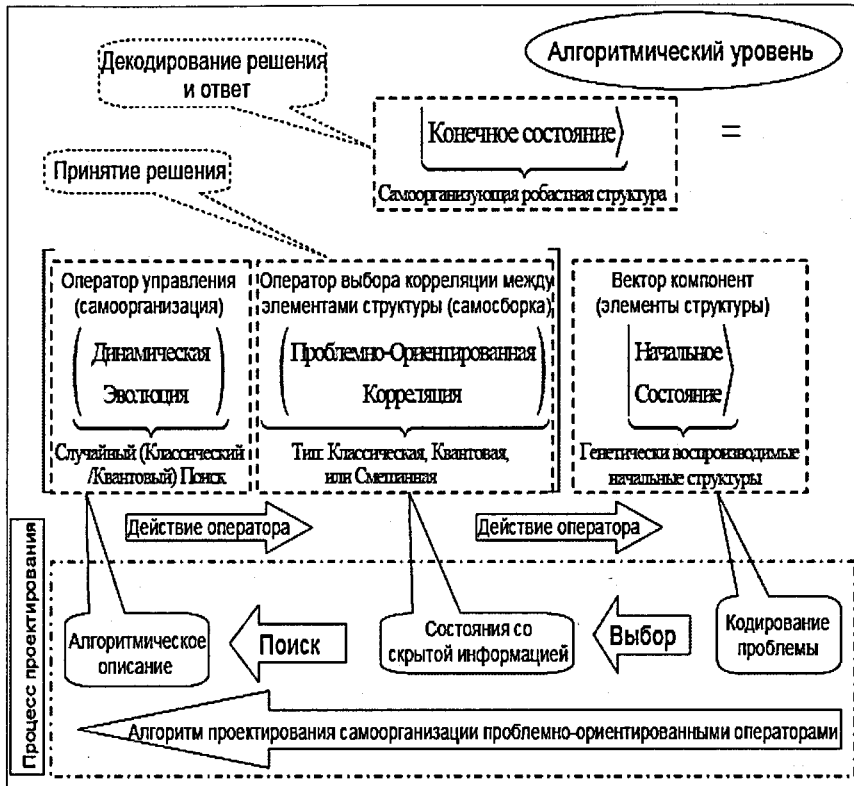


Рис. 1.10 (б). Структура и основные операторы квантовых алгоритмов: структура и функциональные связи квантового алгоритма управления самоорганизацией

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 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 $|\psi_{fn}\rangle$ и $|\psi_{fn}\rangle = H|\psi_{in}\rangle$, 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 мы интересуемся также возможностью адекватного описания на языке логического вывода квантовых состояний и эффектов: применение традиционного формализма, его мощности и выразительности как *квантовой системы нечеткого логического вывода*.

Работа квантовых операторов обозначена выносками на рис. 1.10(а) и осуществляется в итеративном режиме в зависимости от типа КА.

Описание основных квантовых операторов приведено ниже.

Рассмотрим теперь особенности КА управления самоорганизацией, представленного на рис. 1.10(б).

1.4.2. Обобщенная структура КА управления самоорганизацией

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. 1.10(б)): (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.

Примечание 8. Для более наглядного восприятия результатов сравнения на рис. 1.10(б) работа квантовых операторов (также, как и на рис. 1.10(а)) и процессы проектирования эффекта самоорганизации проблемно-ориентированными операторами обозначены выносками. Применение квантовых операторов, осуществляемое в итеративном режиме в зависимости от типа КА, позволяет получать перечисленные эффекты.

Примечание 9. 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.

• Особенности математической модели КА управления самоорганизацией ВЗ

Математическая модель самоорганизации знаний, представленной на рис. 1.10(б), описывается в виде следующего КА:

$$\begin{aligned}
& \left\{ \begin{array}{l} \text{Конечное состояние (законы управления)} \\ \text{Самоорганизация робастной структуры БЗ} \end{array} \right\} \\
& = \left[\begin{array}{l} \left(\begin{array}{l} \text{Эволюция процесса} \\ \text{Квантовый случайный поиск} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{l} \text{Квантовые} \\ \text{вычисления} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{l} \text{Проблемная ориентация} \\ \text{Тип корреляции} \end{array} \right) \\ \left(\begin{array}{l} \text{Начальное состояние} \\ \text{Био-инспирированные состояния} \end{array} \right) \cdot \left(\begin{array}{l} \text{Воспроизводится ОБЗ} \\ \text{на мягких вычислениях} \end{array} \right) \end{array} \right] \cdot \left(\begin{array}{l} \text{Классическая, квантовая, смешанная} \end{array} \right) \quad (1.1)
\end{aligned}$$

В (1.1) обозначение \bullet означает применение соответствующего инструментария или операции.

На первом этапе алгоритма (1.1) 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 моделирования.

Рассмотрим без потери общности простой случай двух траекторий законов управления коэффициентами усиления, траектории которых принадлежат множеству S_1 и S_2 . Согласно (1.1), суперпозиция классических состояний на множестве $S = S_1 \cap S_2$ образует единое квантовое состояние в виде

$$|\psi_S\rangle = \sum_j \lambda_j |\psi_{S_1}^j\rangle \otimes |\psi_{S_2}^j\rangle, \quad (1.2)$$

где $|\psi_{S_1}^1\rangle, |\psi_{S_1}^2\rangle, \dots$ и $|\psi_{S_2}^1\rangle, |\psi_{S_2}^2\rangle$

образуют ортонормированный вычислительный базис в пространстве состояний S_1 и S_2 соответственно.

Физически (1.2) рассматривается как одно состояние, в котором запутанные состояния (entanglement) формируются из процесса движения частиц вдоль классических траекторий за счет информационного обмена.

Рис. 1.11 показывает процесс обмена информацией по квантовым каналам связи между частицами на траекториях $A_{\text{вх}} \in S_1$ и $B_{\text{вх}} \in S_2$.



Рис. 1.11. 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, a_n . 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. 1.11 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. 1.11. $A_{\text{вх}}, B_{\text{вх}}$ 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 . 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 (1.2) 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 (1.2) 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

$$U_{f(i)} = \begin{pmatrix} \sqrt{f(i)} & -\sqrt{1-f(i)} \\ \sqrt{1-f(i)} & \sqrt{f(i)} \end{pmatrix} \quad (1.3)$$

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

В результате для (1.2) 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 y 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.

Рис. 1.12 показывает влияние типа квантовой корреляции между спинами на вид наноструктуры квантового «коралла».

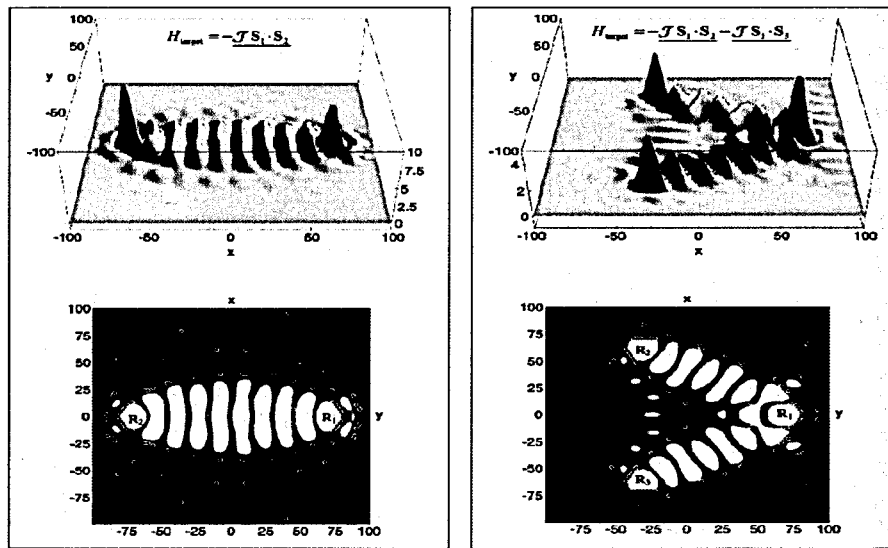


Рис. 1.12. Пример влияния типа квантовой корреляции между спинами на вид наноструктуры квантового «коралла»

Изменение типа квантовой корреляции ($J S_1 \cdot S_2$) на ($J S_1 \cdot S_2 + J S_1 \cdot S_3$) в целевом Гамильтониане H_{target} взаимосвязанной цепочки спинов приводит к существенному изменению вида самоорганизующейся структуры квантового коралла.

Отметим, что описание физической основы формирования квантовой корреляции, ее роль в механизме формирования самоорганизации и влияния на вид структуры, а также введение физической интерпретации математической модели соответствующего квантового алгоритма в данной непредвиденной ситуации управления не входили пока в задачу и поэтому представлены на содержательном физически качественном уровне.

Таким образом, существование и влияние типа квантовой корреляции на формирование самоорганизующейся структуры являются экспериментально установленными фактами, которые учитываются в блоке «Тип корреляции» КА (1.1) на основе модели обмена информацией по квантовым каналам связи, представленной на рис. 1.11.

По максимуму амплитуды вероятности (минимум информационной энтропии Шеннона) из «интеллектуального» состояния (см., ниже рис. 1.13(б)) извлекается корреляционное информативное состояние с помощью оператора интерференции (в виде оператора идентичности) совместно с процедурой классического измерения (наблюдения).

Отметим теперь некоторые особенности физической интерпретации представленного на рис. 1.7(а) и 1.10(б) КА управления самоорганизацией.

• *Физическая интерпретация КА управления самоорганизацией*

С точки зрения процесса биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации (см., рис. 1.7(а) и 1.10(б)) оператор суперпозиции на первом этапе применения КА в (1.1) реализует процедуру формирования множества независимых элементов структуры в виде «строительных блоков» (*templating*) и осуществляет кодирование искомого решения (см., соответствующую выноску «Кодирование проблемы» на рис. 1.10(б)). При этом формируется процедура взаимодействия элементов микро- и макроуровней с обменом информации активных агентов.

Примечание 10. Поясним, следуя понятиям и определениям теории самоорганизации, что активными агентами макроуровня здесь являются текущие значения процесса управления, полученные как результат реакции от робастных БЗ НР. Под активными агентами микроуровня в данной работе понимаются виртуальные значения процесса управления, полученные в результате применения квантового принципа дополнителности к реальным значениям состояниям управления на макроуровне.

Выбор типа квантовой корреляции реализует процесс самосборки требуемой структуры, используя ресурс взаимодействия через процессы коммуникации и передачи информации на микроуровне. В этом случае тип корреляции формирует уровень робастности ИСУ. С помощью применения квантового оракула вычисляется «интеллектуальное» квантовое состояние структуры самоорганизации, которое содержит ценную информацию для использования и реализации координированного управления. Интерференция используется для извлечения результатов координированного управления и проектирования робастных БЗ.

Конкретная модель КА управления самоорганизацией на основе КНВ и ее применение в технологии проектирования робастных БЗ рассмотрена ниже (см. Приложение). В частности, рассмотрен пример квантового алгоритма самоорганизации (на основе самоорганизации поведения толпы людей в тоннеле) формированием (в реальном времени) знаний на основе робастных БЗ в нечетких ПИД-регуляторах в условиях неопределенности исходной информации и непредвиденных ситуаций управления.

• *Цель применения КА управления самоорганизацией и термодинамический критерий минимума обобщенной энтропии*

Рисунок 1.13(а) показывает основное термодинамическое соотношение качества робастного интеллектуального управления, и критерий оптимизации, используемый в КА самоорганизации.

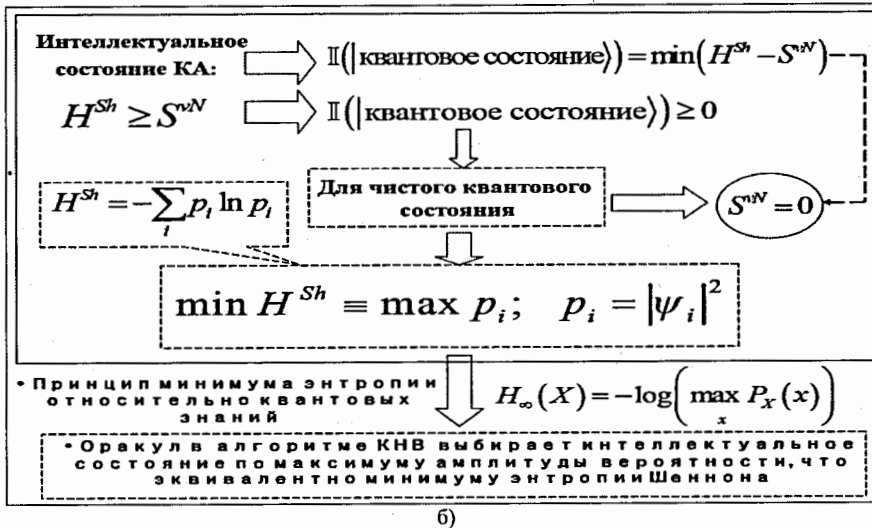


Рис. 1.13. Проектирование качества робастного управления: а) термодинамический критерий качества робастного управления; б) выбор «интеллектуального» квантового состояния

Примечание 11. На рис. 1.13 приняты следующие обозначения: V – функция Ляпунова; S_{OY}, S_P – производство энтропии в ОУ и регуляторе, соответственно;

$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i^2 + \frac{1}{2} S^2; S = S_{OY} - S_P; \dot{q}_i = \varphi(q_i, u, t)$ – уравнение движения ОУ; S^{vN} – квантовая энтропия фон Неймана; ψ – волновая функция; p_i – вероятность события.

Рисунок 1.13(б) иллюстрирует детали вычислительного процесса выбора «интеллектуального» квантового состояния по принципу минимума информационной энтропии Шеннона (максимум амплитуды вероятностей).

Пример 1. Понятие и определение «интеллектуального» квантового состояния. Рассмотрим возможный подход к выбору критерия оптимизации извлечения приоритетного состояния из сформированной суперпозиции закодированных возможных состояний. Для этой цели используется понятие «интеллектуального квантового состояния», введенное в квантовую теорию измерений как состояние с минимальной неопределенностью (в смысле минимума неравенства неопределенности Гейзенберга). Данное понятие связывают также с решениями квантовых волновых уравнений (типа Шредингера и др.), для которых волновой пакет состояния квантовой системы является когерентным состоянием. На когерентном состоянии соотношение неопределенности достигает глобального минимума. Определение и вычисление состояния в КА дается на основе определения энтропии фон Неймана и информационной энтропии Шеннона в данном квантовом состоянии. В этом случае, «интеллектуальное квантовое состояние» в КА есть минимум разности между информационной энтропией квантового состояния Шеннона и физической энтропией квантового состояния фон Неймана:

$$\mathbb{I}(\text{Квантовое состояние}) = \min(H^{Sh} - S^{vN}), \quad (1.4)$$

где H^{Sh} и S^{vN} – энтропии Шеннона и фон Неймана соответственно. Согласно законам квантовой теории информации, имеем следующее неравенство:

$$H^{Sh} \geq S^{vN} \text{ т.е. } \mathbb{I}(\text{Квантовое состояние}) \geq 0. \quad (1.5)$$

Напомним, что квадрат амплитуды вероятностей состояния в квантовой механике равен классической вероятности нахождения квантовой системы в данном состоянии (постулат Борна, который имеет несколько вариантов строгого обоснования). С точки зрения квантовой теории информации чистое квантовое состояние характеризуется, как известно, нулевым значением энтропии фон Неймана. Следовательно, «интеллектуальное» квантовое состояние в рассматриваемом КА определяется через определение минимума информационной энтропии Шеннона. Искомый минимум достигается, в свою очередь, при максимуме вероятности состояния (по определению информационной энтропии квантового состояния Шеннона $H^{Sh} = -\sum_i p_i \ln p_i$, т.е. глобальный минимум наблюдается при максимуме вероятности p_i). Так как p_i по определению есть квадрат соответствующей амплитуды вероятностей, то принцип максимума амплитуды вероятностей при коррелированном состоянии может быть принят за критерий отбора приоритетного «интеллектуального» корреляционного (когерентного) состояния в суперпозиции возможных кандидатов (см. рис. 1.13(б)).

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.1.14.

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.



Рис.1.14. Иерархическая структура КА проектирования самоорганизации робастных БЗ в ИСУ (ПАП – программно-аппаратная поддержка)

Программно КА встроен в структуру ИСУ для реализации требуемого свойства самоорганизации. На рис. 1.14 показаны иерархические уровни процесса проектирования с применением КА, взаимосвязи и взаимоотношения перечисленных свойств самоорганизации робастных БЗ. Из уровней, представленных на рис. 1.14, 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).

Как следует из рис. 1.14 (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 (см. рис. 1.13(а)).

Процесс проектирования робастных БЗ (рис. 1.14) 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. 1.14 (уровень 1). В связи с этим, поясним информационные свойства и логические особенности формирования синергетического эффекта самоорганизации, и используемые в программном инструментарии QCOptKB™, описание которого приведено в Приложении.

- Информационные процессы формирования синергетического эффекта самоорганизации

Информационный синергетический эффект самоорганизации знаний заключается в приобретении системой требуемого свойства робастности за счет информационного (а не прямого физического) взаимодействия не робастных БЗ, т.е. появления нового качества в объединенной системе, отсутствующего во взаимодействующих подсистемах, которые составляют единое целое. Данный эффект реализуется процессом переноса информации и является следствием формирования виртуальных каналов передачи квантовой информации между классическими состояниями сигналами управления.

Отмеченное свойство присутствует во многих квантовых системах. Некоторые из существующих необычных физических явлений, которые включают в себя синергетический эффект, аналогичный применяемому в данной работе, рассмотрим на примерах. В частности, обсудим познавательный сопутствующий пример: две подсистемы, каждая из которых отдельно находится в смешанном хаотическом состоянии (и с отличной от нуля максимальной энтропией), при слиянии в единую систему образуют чистое (с нулевой энтропией) состояние, обладающее высшим уровнем порядка (эффект квантовой самоорганизации). При этом количество информации в целой системе меньше, чем в каждой из ее составляющих подсистем. Взаимная условная энтропия имеет отрицательное значение. Но классическая подсистема в единой системе должна находиться по определению в чистом состоянии, а для квантовой подсистемы это требование выполняется не всегда. Парадокс состоит в том, что энтропия целой системы равна нулю, а энтропии двух подсистем положительны и имеют максимальное значение 1. Данный факт и означает, что информация, содержащаяся в целой системе, меньше количества информации, присутствующей в каждой из подсистем. Пояснение физического смысла и особенности отмеченного эффекта, трудно воспринимаемого и сложного в интерпретации (с позиции булевой логики), при использовании в разработке процессов извлечения квантовой информации из классических состояний приведено выше. Подобное специфическое свойство структуры квантовых состояний сформулировал Шредингер следующим образом: «The best possible knowledge of a whole does not necessarily include the best possible knowledge of all its parts». - «Лучшее возможное знание о целом не обязательно содержит наилучшее возможное знание обо всех его частях» (Перевод и дополнение, выделенное курсивом, выполнены авторами).

Примечательно, что отмеченный парадокс разрешим за счет еще более странного свойства (с точки зрения теории информации Шеннона) - отрицательного

значения условной энтропии. Эксперимент подтвердил теоретическое утверждение, что две взаимодействующие подсистемы в этом случае находятся в смешанных состояниях с отличными от нуля энтропиями. В этом случае неклассические физические свойства нелокальности суперпозиции с квантовой корреляцией между подсистемами как математического объекта приводят к парадоксу нарушения элементарного арифметического правила в виде: $2 \neq 1 + 1$. Физическая реализация квантового состояния суперпозиции в электронной наноструктуре («квантовом коралле») с указанным свойством переноса квантовой информации волновыми функциями подсистем описана выше. Измерением из данных подсистем можно получить только статистические знания. Следовательно, в отличие от классической теории информации Шеннона квантовая условная энтропия фон Неймана может принимать отрицательные значения, когда рассматриваются запутанные состояния. Этот факт непосредственно связан с квантовой неразделимостью запутанных состояний, а сами они интерпретируются как гигантски коррелированные (супер-) состояния.

Таким образом, отрицательность условной энтропии указывает на наличие запутанных состояний в составной квантовой системе и определяет нижнюю границу их корреляции. Последнее означает, что информация о состоянии составной системы, не максимальна, а подсистемы имеют более хаотическое поведение, чем составная система.

Отмеченное свойство используется в модели КНВ при извлечении дополнительной квантовой информации из классических сигналов управления. Следовательно, информационный анализ неопределенности в состоянии составной квантовой системы позволяет четко разъяснить наличие необычных (неклассических) свойств: игнорирование в ней части информации о состоянии подсистемы приводит к увеличению квантовой неопределенности.

В результате, количества квантовой неопределенности в «части» (подсистеме) больше, чем в «полной» (составной) квантовой системе.

Такой эффект отсутствует в классических системах в силу свойств меры информационной энтропии Шеннона. Подобное странное для классических систем свойство, когда о составной системе имеется полная информация (энтропия равна нулю), а о подсистемах - только часть информации, характеризует способность квантовых систем к самоорганизации за счет использования свойства суперкорреляции (квантовой корреляции), содержащейся в запутанных состояниях. Именно из-за наличия квантовой корреляции у смешанных составных состояний появилась возможность сформировать чистое состояние.

Приведенный результат характеризует особое свойство синергетического эффекта, присущего квантовой составной системе и принципиально отсутствующего в классической системе. Этот факт свидетельствует о глубоком различии между классическими и квантовыми состояниями.

Поэтому избыточное количество информации, скрытое в подсистемах, можно извлечь и использовать как дополнительный информационный ресурс. Описанный информационный эффект самоорганизации и выявленные возможности (наличие дополнительного количества информации за счет квантовой корреляции) применяются в модели КНВ при формировании робастного сигнала управления из двух неробастных сигналов с привлечением новых видов квантовой корреляции (см. описание в разд. 1.5).

Как было показано, что для достижения самоорганизации (уровень 3 на рис. 1.14) в структуре ИСУ необходимо использовать КНВ. Общая функциональная структура блоков КНВ, принципы работы КНВ и его отдельных блоков подробно рассмотрены ниже в разд. 1.5.

В Таблице 1.1 приведена структура ИСУ, включающая модель КНВ, описаны ее преимущества и недостатки.

Модель КНВ основана на физических законах теории квантовых вычислений, а именно в вычислениях участвуют унитарные, обратимые квантовые операторы. В общем виде КА состоит из трех основных унитарных операций: суперпозиция; квантовая корреляция (квантовый оракул или запутанные операторы) и интерференция. Четвертый оператор, оператор измерения результатов квантовых вычислений, является необратимым (классическим).

Таблица 1.1

Таблица: Структура и качественные характеристики самоорганизующейся ИСУ на основе КНВ

Структура системы управления	Уровень качества управления	Преимущества и достоинства	Предельные возможности
	<p>Устойчивость</p> <p>Управляемость</p> <p>Точность управления</p> <p>Адаптация</p> <p>Обучение</p> <p>Самоорганизация</p> <p>Элементы саморазвития</p>	<p>Введен новый уровень качества управления (самоорганизация с элементами саморазвития).</p> <p>Гарантирует качество управления на различных пространствах поиска решений КНВ в режиме реального времени.</p> <p>Процесс проектирования унитарной БЗ осуществляется автоматически операторами суперпозиции и квантовой интерференции с помощью «зудрого» контроллера, основанного на принципе минимума информационной энтропии и максимума квантовой корреляции (максимум квантовой амплитуды вероятности квантового состояния)</p>	<p>Гарантирует только необходимые условия для оптимизации процесса проектирования робастной БЗ.</p> <p>В КНВ отсутствует возможность оптимального управления квантовыми операторами.</p> <p>Процесс глобальной оптимизации зависит от выбора вида функции пригодности и осуществляется комбинаторным методом.</p> <p>Требует большого количества времени вычисления (высокая временная сложность вычислений)</p>

Отметим следующие аспекты разработки модели самоорганизации: 1) целью разработанного КА управления самоорганизацией знаний является достижение термодинамического критерия (см. рис. 1.14) оптимального соотношения между устойчивостью, управляемостью и робастностью, используемого в контуре управления в реальном времени; 2) принцип минимума обобщенной энтропии системы «динамический ОУ + регулятор» позволяет одновременно достичь глобальной робастности и реализовать оптимальное интеллектуальное управление с минимальной потерей полезного энергетического ресурса.

- Отличие модели квантового алгоритма управления самоорганизации от биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации

Основными отличиями 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 (1.1) 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.

1.4.3. КА управления самоорганизацией знаний: модель КНВ

Математическая модель КА самоорганизации знаний в продукционных правилах БЗ гибридного ПИД-регулятора следует из (1.1) как частный случай КА самоорганизации и имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{Законы управления коэффициентами усиления} \\ \text{гибридного нечеткого ПИД-регулятора} \end{array} \right\} \cdot (\text{Выход}) = \\
 & \text{Самоорганизация робастной структуры БЗ} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} (\text{Интерференция})[\max(\text{Амплитуды вероятностей})](\text{Суперпозиция}) \cdot (\text{Квантовые вычисления}) \\ \text{Квантовый случайный поиск} \\ \text{Проблемная ориентация ОУ} \\ (\text{Тип и вид корреляции}) \cdot (\text{Выбор типа и вида квантовой корреляции}) \\ (\text{Внешняя, внутренняя}) \cdot (\text{Классическая, квантовая, смешанная}) \\ \text{Формирование качества и глубины представления знаний} \end{array} \right\} \\
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{"Строительные" блоки} \\ \text{Начальное состояние} \\ \text{Состояния выходных сигналов НР на новую ошибку управления} \end{array} \right\} \cdot \left[\begin{array}{l} (\text{Реакция продукционных правил БЗ в НР на мягких вычислениях}) \cdot \\ (\text{Вход}) \cdot (\text{Ошибка управления в непредвиденной ситуации}) \end{array} \right] \quad (1.6)
 \end{aligned}$$

Модель (1.6) описывает математическую структуру КНВ.

Поэтому модель КА в КНВ выступает как частный случай обобщенной модели КА самоорганизации, представленной на рис. 1.14 (уровень 3).

Рассмотрим в этой связи кратко математические особенности этапов и вычислительные аспекты КА (1.6) в модели КНВ для проектирования робастных БЗ на основе синергетического принципа самоорганизации.

На первом этапе алгоритма (1.6) с помощью ОБЗ на мягких вычислениях создаются «строительные» блоки самоорганизации знаний на основе ГА в виде законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора с привлечением продукционных правил БЗ. Полученные траектории законов управления

интерпретируются как классические состояния – хаотические пути интеллектуального коллективного движения частиц в «толпе» – с информационным взаимодействием (swarm intelligence) и обменом информацией.

На втором этапе применяется КНВ. Такое описание является одним из эффективных методов алгоритмизации квантовых моделей коллективного поведения частиц (swarm method of collective particle behavior) в виде соотношений (1.2) – (1.6).

1.5. Структурная модель и этапы вычислений КА в КНВ

На рис. 1.15(а) показана эквивалентная уравнению (1.6) функциональная структура упрощенной модели КНВ: Формирование суперпозиции и вычисление амплитуд вероятностей. Согласно рис. 1.15, в модели (4.6) 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.

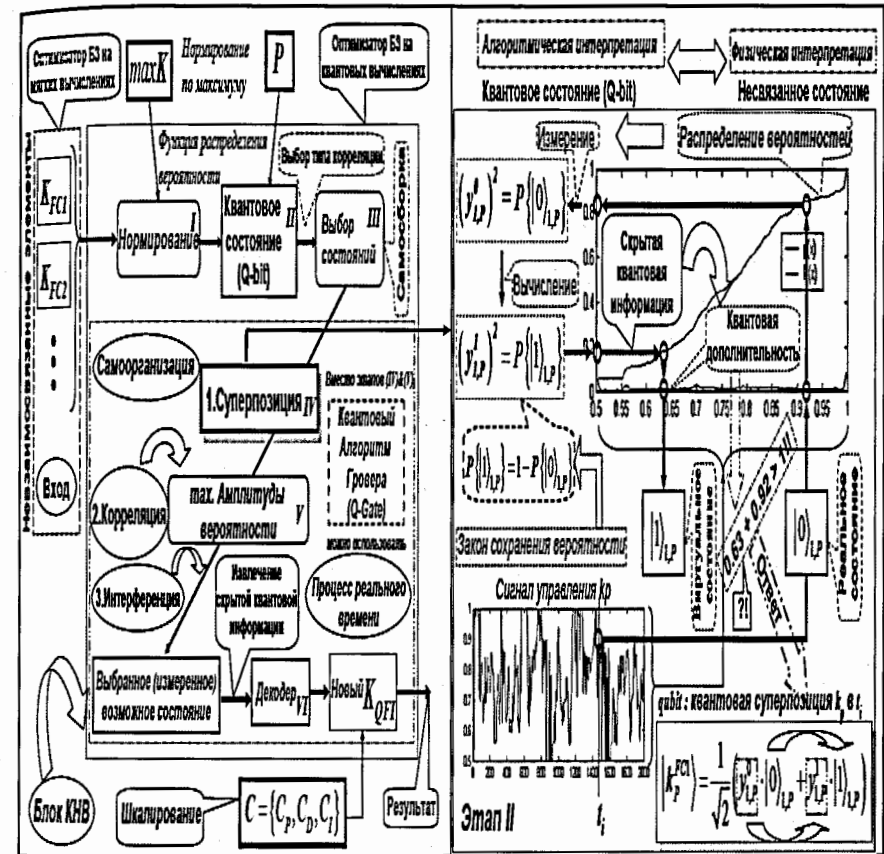


Рис. 1.15 (а, б). Структурная реализация процесса самоорганизации в модели КНВ: а) функциональная структура модели КНВ; б) интерпретация реализации процесса самоорганизации на основе формирования квантового состояния суперпозиции в модели КНВ (этап 4)

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.

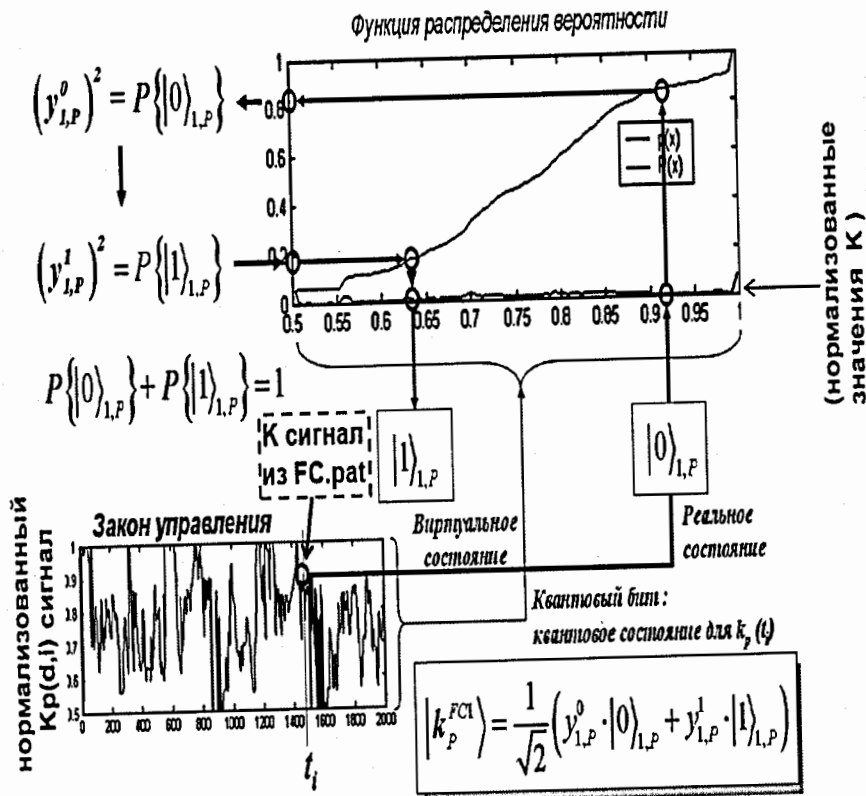


Рис. 1.15(в). Структурная реализация процесса самоорганизации в модели КНВ: в) процесс формирования суперпозиции кубита и вычисление амплитуд вероятностей

На рис. 1.16 показана структура КА модели КНВ соответствующая структуре блока КНВ на рис. 1.15(а).

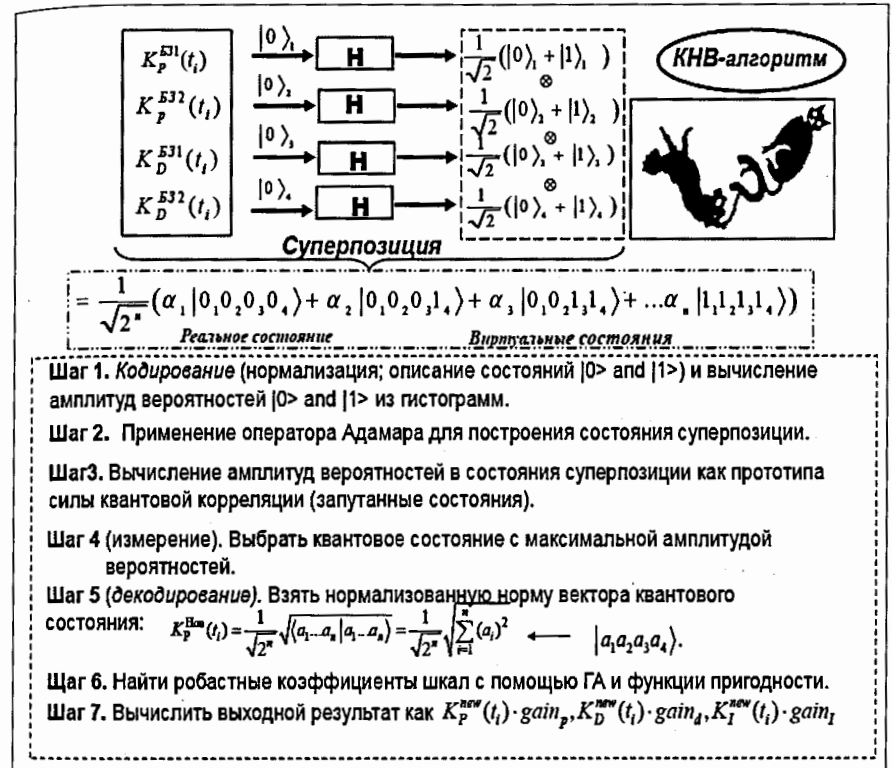


Рис. 1.16. Структура и этапы КА модели КНВ

Таким образом, модель (1.6) КНВ реализует процесс проектирования синергетического эффекта самоорганизации БЗ в непредвиденной ситуации управления. Поэтому область эффективного функционирования структуры ИСУ может быть существенно расширена за счет включения такой важной характеристики качества управления, как *робастность*. Согласно изложенному в п. 1.4, робастность управляющего сигнала – основа для поддержки надежности и точности эффективного интеллектуального управления в условиях неопределенности информации или слабо формализованного описания условий функционирования ОУ и/или целей управления.

1.5.1. Алгоритмические особенности этапов КНВ при формировании самоорганизации БЗ

Рассмотрим кратко основные этапы и особенности реализации этапов КА в КНВ.

А. Основные этапы построения БЗ в НР с помощью ОБЗ на мягких вычислениях. На входе модели КНВ, как следует из рис. 1.15(а), формируются сигналы управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора в виде реакции продукционных правил БЗ в НР. Индивидуальные независимые БЗ для заданной ситуации обучения проектируются с помощью ОБЗ на мягких вычислениях в режиме off-line в соответствии со следующими этапами.

Этап 1. Определение типовой ситуации обучения (параметры математической модели ОУ; конкретизация внешних шумов, начальных условий, ограничений и времени задержки).

Этап 2. Построение обучающего сигнала (ОС) происходит на основе стохастического моделирования поведения ОУ в типовой ситуации, проведенного с использованием математической модели ОУ и ГА с выбранными критерием оптимизации и областью поиска.

Этап 3 (выбор модели нечеткого вывода). Пользователь задает тип нечеткой модели вывода (Сугено, Мамдани и т.д.), операцию нечеткого «И» (произведение или минимум), число входных и выходных переменных. В нашем выборе это модель Сугено. Пусть n_1, n_2, n_3 есть количество функций принадлежности, описывающих ошибку управления e , ее скорость и интеграл, тогда общее число нечетких правил будет $n_1 \times n_2 \times n_3$.

Само нечеткое (продукционное) правило в БЗ выглядит следующим образом:

$$\text{IF } e \text{ is } A_i \text{ and } \dot{e} \text{ is } B_j \text{ and } \int e \text{ is } C_k \text{ THEN } K_p = D_{ijk}, K_d = E_{ijk}, K_i = F_{ijk},$$

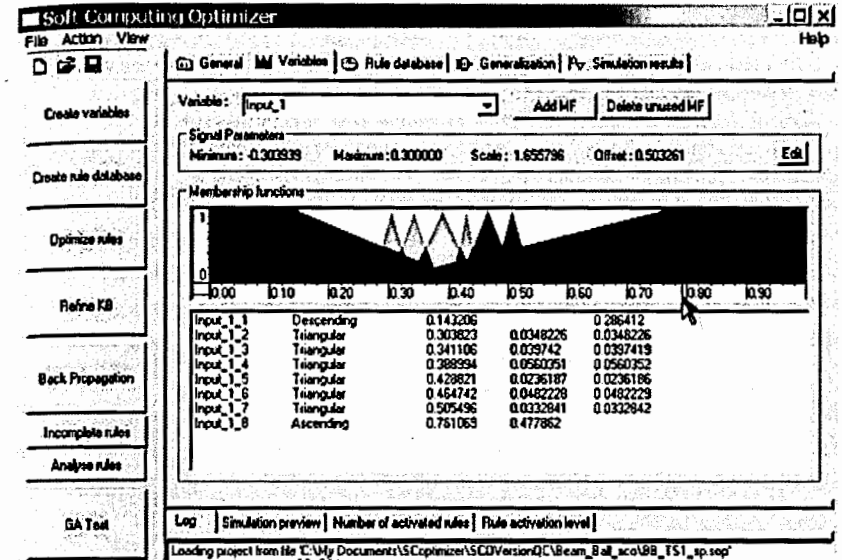
где A_i, B_j, C_k – функции принадлежности, описывающие ошибку управления e , ее скорость и интеграл. Конечный результат нечеткого вывода в заданной БЗ вычисляется по следующим формулам:

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

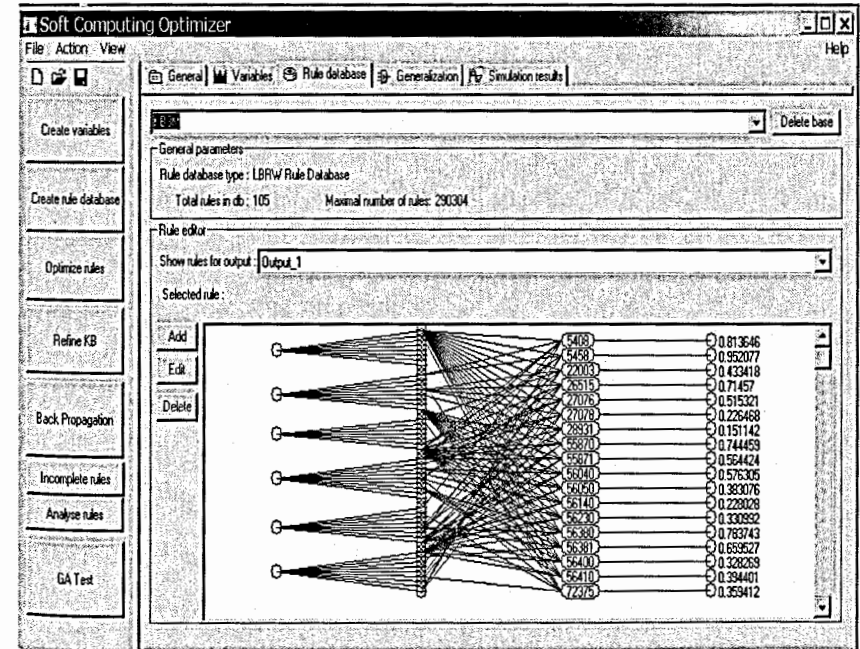
где $\omega_{ijk} = A_i(e) \cdot B_j(\dot{e}) \cdot C_k(\int e)$, и « \cdot » – символ операции нечеткого умножения;

Этап 4. Создание лингвистических переменных для входных значений (ошибка управления, скорость ошибки управления, интегральная ошибка управления) ИР. С помощью ГА (ГА1) определяется оптимальное число функций принадлежности для каждой входной лингвистической переменной, а также выбирается оптимальная форма представления их функций принадлежности (треугольная, Гауссовская и т.д.). В качестве критерия оптимальности той или иной конфигурации лингвистических переменных используется максимум совместной информационной энтропии и минимум информации о сигналах в отдельности.

На рис. 1.17 показан пример построения нечеткого вывода на мягких вычислениях с помощью ОБЗ на мягких вычислениях.



а)



б)

Рис. 1.17. Проектирование БЗ на основе ОБЗ на мягких вычислениях.

а) пример выбора функций принадлежности; б) пример проектирования оптимальной БЗ

Для описания входных значений ошибки управления ОБЗ с помощью ГА выбрал восемь функций принадлежности (рис. 1.17(а)).

Этап 5 (создание, оптимизация и настройка БЗ). В разработанном оптимизаторе используются три ГА, подробно описанные ранее. На этапе создания БЗ применяется специальный алгоритм отбора наиболее «робастных правил» в соответствии с принятыми 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. Переменная $R_{total_fs}^l$ вычисляется по следующей формуле:

$$R_{total_fs}^l = \sum_{k=1}^N R_{fs}^l(t_k), \text{ и } R_{fs}^l(t_k) = \prod [\mu_{j1}^l(x_1(t_k)), \mu_{j2}^l(x_2(t_k)), \dots, \mu_{jn}^l(x_n(t_k))],$$

где t_k – моменты времени, $k=1, \dots, N$, а N равно числу точек в управляющем сигнале; $\mu_{jk}^l(x_k)$, $k=1, \dots, n$, – функции принадлежности входных переменных, l – индекс правила в БЗ; символ « Π » – операция нечеткой конъюнкции (в частности, может интерпретироваться как произведение); 2) «максимальный» критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют условию $\max R_{fs}^l(t) \geq TL$. Далее с помощью серии ГА происходит оптимизация БЗ и ее настройка.

Применение ГА позволяет спроектировать, как следствие, оптимальную структуру ННС (вид функций принадлежности и их параметры, количество внутренних слоев и др.), аппроксимирующей обучающий сигнал с требуемой ошибкой. Объединение методологий стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментари ОБЗ позволило повысить уровень робастности проектируемых БЗ и решать сложные задачи формирования объективных знаний.

Пример построенной с помощью ОБЗ оптимальной БЗ для НР, решающего задачу управления, рассматриваемого ОУ, показан на рис. 1.17(б), из которого видно, что полная структура БЗ для данного НР состоит из 290 304 продукционных правил. Однако, используя этап 5 проектирования, ОБЗ выбрал оптимальную структуру БЗ, состоящую из 105 активных правил, существенно сократив избыточное количество правил.

Моделирование оптимальных сигналов управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора осуществляется в среде MatLab/Simulink со встроенным блоком ОБЗ SCOptKB™ согласно структурной схеме, представленной на рис. 1.18.

Процедуры необходимых программных действий также приведены на рис. 1.1(б). В результате на вход блока КНВ поступают в реальном времени сигналы управления из спроектированных индивидуальных независимых БЗ на мягких вычислениях (шаг «Вход» на рис. 1.15(а)) в виде реакции НР на ошибку управления (рис. 1.18, блок «Ошибка управления»).

Б. Нормирование сигналов управления. Следующим шагом является процесс нормирования (блок I на рис. 1.15(а)) полученных сигналов управления в интервале [0,1] путем деления амплитуд траекторий сигналов управления на максимальные амплитуды (блок $\max K$ совместно с блоком I на рис. 1.15(а)).

На рис. 1.19(а, б) соответственно показаны процесс формирования нормированных сигналов управления и программная реализация в среде MatLab / Simulink согласно структурной схеме на рис. 1.18, соответственно.

Вычисление нормированного сигнала управления пропорциональным коэффициентом усиления K_p по схеме на рис. 1.19(а) осуществляется программным путем. Пример вычисления трех максимальных коэффициентов усиления K_p, K_D, K_I и формирование файла FC2.pat нормированных сигналов управления от НР2 приведен на рис. 1.19(б).

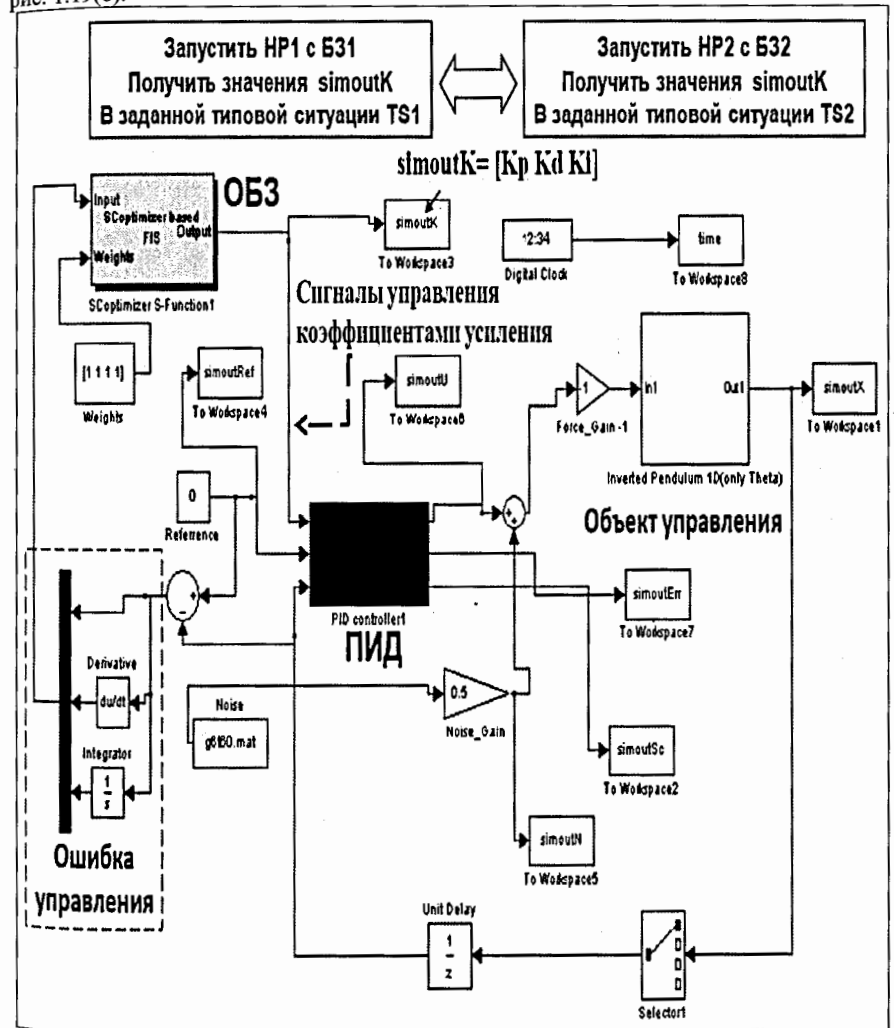


Рис. 1.18. Структурная схема моделирования оптимальных БЗ и сигналов управления ПИД-регулятора в среде MatLab/Simulink

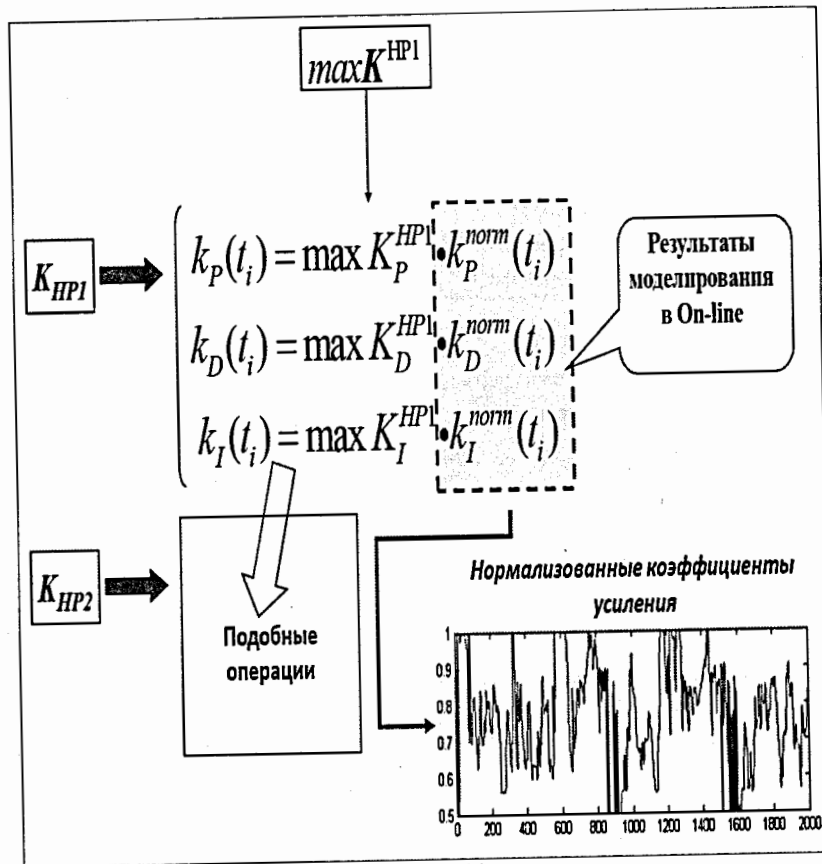


Рис. 1.19 (а)

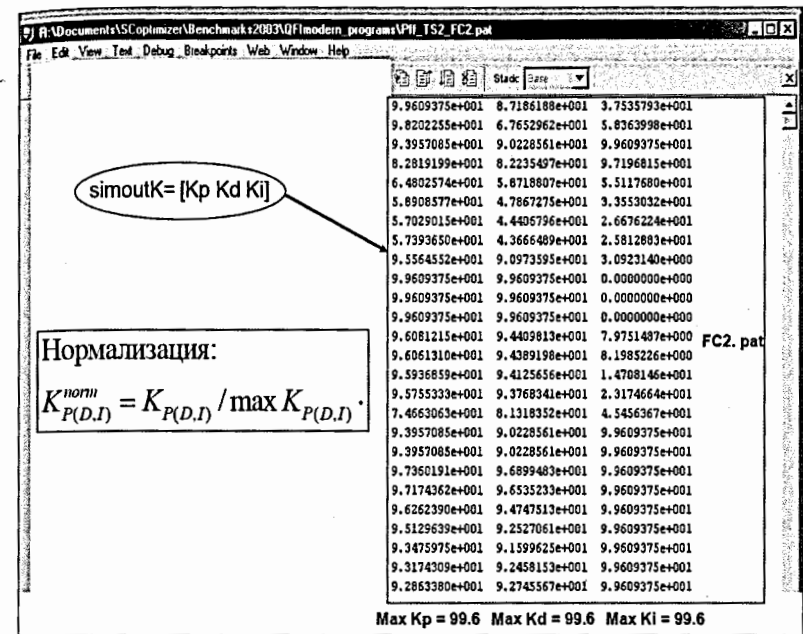


Рис. 1.19 (б)

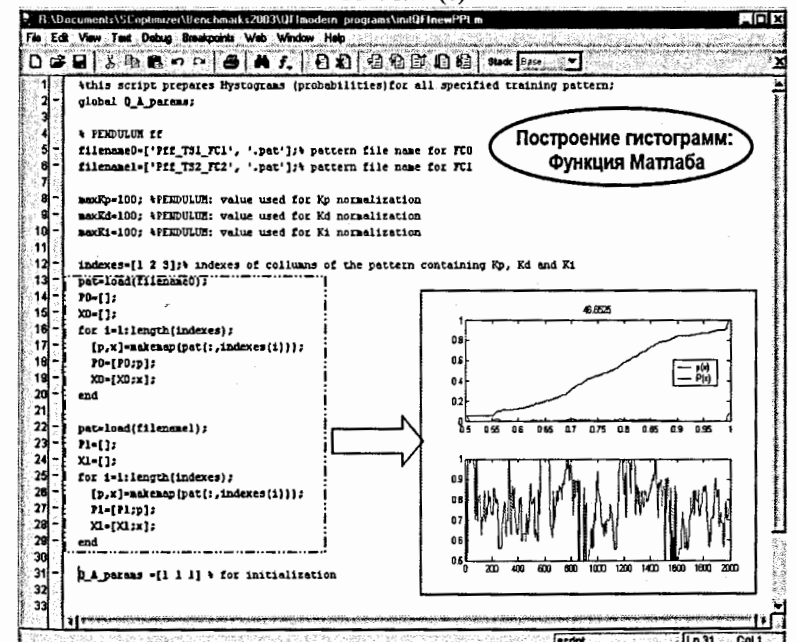


Рис. 1.19 (в)

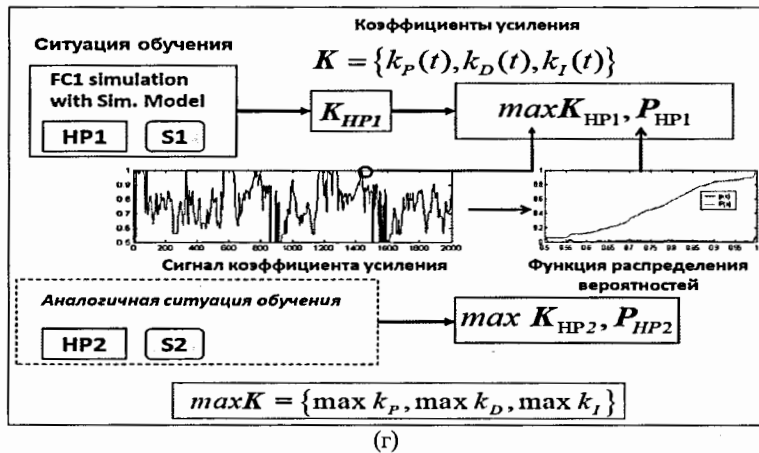


Рис. 1.19. Процесс нормирования сигналов управления в модели КНВ:

a - процедура нормированных сигналов управления; *b* - программная реализация процедуры нормирования в среде MatLab/Simulink и вычисления трех максимальных коэффициентов усиления при формировании файла нормированных сигналов управления; *в* - пример программной реализации формирования дифференциальной и интегральной функций вероятностей в стандартном блоке среды MatLab/Simulink; *г* - обобщенный процесс формирования нормированного сигнала управления и соответствующей интегральной функции вероятностей в заданной ситуации обучения.

В. Определение функции плотности распределения вероятностей и формирование виртуального квантового состояния. После нормировки сигналов осуществляется формирование квантового состояния в виде квантовых битов (блок II на рис. 1.15(а) из текущих значений нормированных сигналов управления. С этой целью, с помощью, встроенной в среде MatLab/Simulink операции, предварительно определяются функции плотности распределения вероятностей по представительным выборочным траекториям сигналов управления, полученным с помощью ОБЗ на мягких вычислениях. Далее путем операции интегрирования функций плотности распределения вероятностей рассчитываются интегральные функции распределения вероятностей (блоки P и II на рис. 1.15(а)). Пример программной реализации формирования дифференциальной и интегральной функций вероятностей в стандартном блоке среды MatLab/Simulink (рис. 1.16, шаг 1) содержится на рис. 1.19(в).

На рис. 1.19(г) показан обобщенный процесс формирования нормированного сигнала управления и соответствующей интегральной функции вероятностей в заданной ситуации обучения. Для текущего реального нормированного состояния сигнала управления $|0\rangle$ с помощью интегральной функции распределения вероятностей определяется его вероятность $P(|0\rangle)$ (промежуточные выкладки (рис. 1.15(б, в)) и подробное описание, см. ниже). Из закона сохранения вероятностей рассчитывается вероятность виртуального состояния $|1\rangle$ нормированного сигнала управления $P(|1\rangle) = 1 - P(|0\rangle)$. Используя тот же интегральный закон распределения

вероятностей, путем обратного отображения $P(|1\rangle)$ вычисляется значение соответствующего виртуального состояния сигнала управления (рис. 1.15(в)).

Г. Определение суперпозиции квантового состояния. Полученные таким образом функции распределения вероятностей позволяют выделить «виртуальные» состояния $|1\rangle$ сигналов управления для формирования суперпозиции с помощью преобразования Адамара (4.3) из текущего состояния введенных сигналов управления. При этом применяется закон вероятностей типа $P(|0\rangle) + P(|1\rangle) = 1$, где $P(|0\rangle)$ и $P(|1\rangle)$ - вероятности текущего реального и виртуального состояний сигнала управления соответственно (рис. 1.15(в)). Суперпозиция двухуровневой квантовой системы «реальное состояние $|0\rangle$ - виртуальное состояние $|1\rangle$ » имеет следующий вид:

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

На рис. 1.15(б) функционально отображен вычислительный процесс и формирование квантового бита в виде квантовой суперпозиции для текущего состояния нормированного сигнала управления коэффициентом усиления нечеткого ПИД-регулятора в структуре ИСУ. При этом скрытая в виртуальном состоянии квантовая информация и квантовый принцип дополнительности устанавливают новое численное значение виртуального состояния, отличающегося от соответствующего значения, определенного законом отрицания булевой логики.

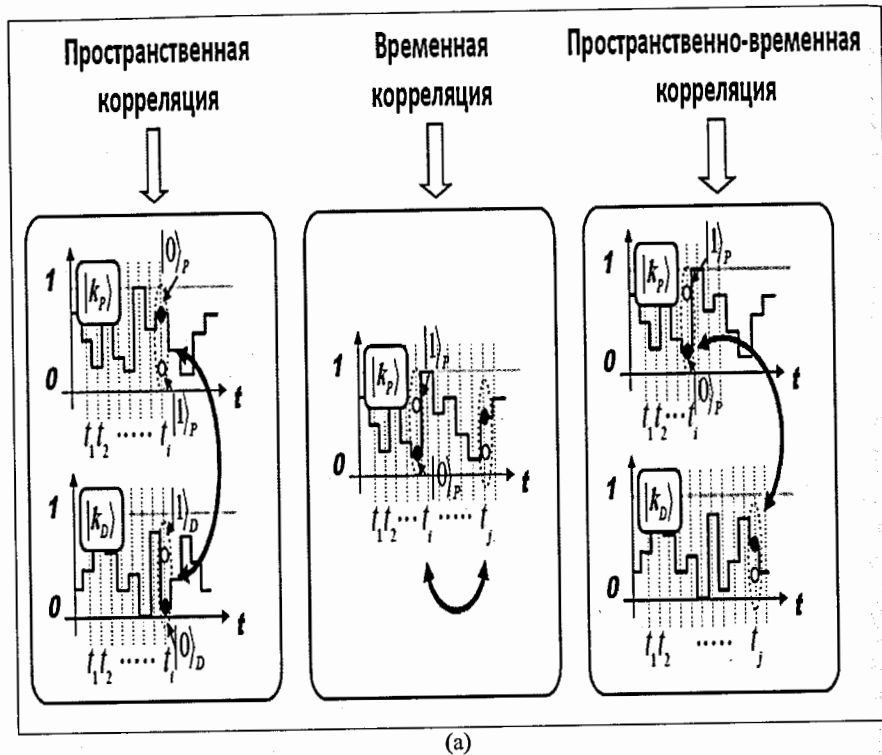
Пример 2. Так, например, из рис. 1.15(б) следует, что для реального состояния $|0\rangle$ имеем значение 0.92 и вероятность данного значения 0.8. Тогда вероятность виртуального состояния $P(|1\rangle) = 1 - P(|0\rangle) = 0.2$. Численное значение виртуального состояния равно 0.63, в то время как закон отрицания дает значение $1 - 0.92 = 0.08$. Приведенный пример показывает принципиальное отличие квантовой дополнительности от закона классического логического отрицания.

Д. Выбор вида и типа квантовой корреляции при формировании квантовой суперпозиции. При выборе вида и типа квантовой корреляции между реальными и виртуальными значениями амплитуд сигналов управления коэффициентами усиления необходимо классифицировать сами виды корреляции между элементами суперпозиции в структуре КА (1.6).

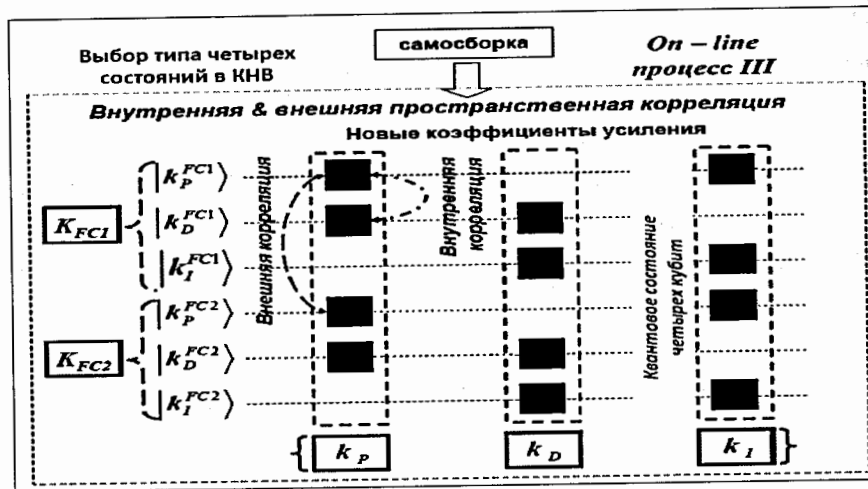
Пример 3. Полная, квантовая и классическая корреляции в процессе извлечения скрытой информации. Процесс оптимального извлечения ценной квантовой информации из классических состояний, рассмотренный выше в примере 1, базируется на следующих четырех фактах в квантовой теории информации: 1) существует эффективный КА сжатия данных; 2) в квантовом состоянии присутствует «сцепленное» представление классической и квантовой информации; 3) полная корреляция в квантовом состоянии представляет собой «смесь» классической и квантовой корреляций; 4) присутствует скрытая (частично доступная извлечению) классическая корреляция в квантовом состоянии.

На рис. 1.20 (а, б) показаны перечисленные три вида и два типа корреляции.

В качестве примера использованы корреляции между законами управления коэффициентами усиления двух нечетких ПИД-регуляторов. Для рассматриваемой ситуации возможны три вида квантовой корреляции (содержащих скрытую в спроектированных БЗ ценную квантовую информацию): *пространственная, временная и пространственно-временная.*



(a)



(б)

Рис. 1.20. Виды (а) и типы (б) корреляции

В Табл. 1.2 приведены математические модели для данных типов корреляции для сигналов управления соответствующими коэффициентами усиления гибридного нечеткого ПИД-регулятора.

Таблица 1.2.
Типы квантовой корреляции

КНВ на основе пространственной корреляции	$k_P^{KB_1, KB_2}(t_i) k_D^{KB_1, KB_2}(t_i) \rightarrow k_P^{new}(t_i) \cdot gain_P$ $k_D^{KB_1, KB_2}(t_i) k_I^{KB_1, KB_2} \rightarrow k_D^{new}(t_i) \cdot gain_D$ $k_I^{KB_1, KB_2}(t_i) k_P^{KB_1, KB_2}(t_i) \rightarrow k_I^{new}(t_i) \cdot gain_I$
КНВ на основе временной корреляции	$k_P^{KB_1, KB_2}(t_i) k_P^{KB_1, KB_2}(t_i - \Delta t) \rightarrow k_P^{new}(t_i) \cdot gain_P$ $k_D^{KB_1, KB_2}(t_i) k_D^{KB_1, KB_2}(t_i - \Delta t) \rightarrow k_D^{new}(t_i) \cdot gain_D$ $k_I^{KB_1, KB_2}(t_i) k_I^{KB_1, KB_2}(t_i - \Delta t) \rightarrow k_I^{new}(t_i) \cdot gain_I$
КНВ на основе пространственно-временной корреляции	$k_P^{KB_1}(t_i) k_D^{KB_1}(t_i - \Delta t) k_P^{KB_2}(t_i - \Delta t) k_D^{KB_2}(t_i) \rightarrow k_P^{new}(t_i) \cdot gain_P$ $k_D^{KB_1}(t_i) k_I^{KB_1}(t_i - \Delta t) k_D^{KB_2}(t_i - \Delta t) k_I^{KB_2}(t_i) \rightarrow k_D^{new}(t_i) \cdot gain_D$ $k_I^{KB_1}(t_i) k_P^{KB_1}(t_i - \Delta t) k_I^{KB_2}(t_i - \Delta t) k_P^{KB_2}(t_i) \rightarrow k_I^{new}(t_i) \cdot gain_I$

Примечание 12. Выбор вида корреляции определяется свойствами рассматриваемого ОУ. Многочисленные результаты моделирования сложных нелинейных ОУ показали, что пространственная корреляция эффективна для проектирования робастных ИСУ глобально динамически неустойчивыми ОУ; временная корреляция целесообразна для локально неустойчивых нелинейных ОУ; для нелинейных ОУ с различными в структуре видами динамической неустойчивости (по части обобщенных координат) может использоваться смешанная пространственно-временная квантовая корреляция. Применение выбранного вида корреляции в сочетании с различными типами (внешними или внутренними) корреляции между компонентами сигналов управления позволяют расширить ресурс и увеличить потенциал квантовых корреляций.

Данный подход рассмотрен ниже на конкретном примере.

Отношение между полной, классической и квантовой типами корреляции (как меры неопределенности квантового состояния), задается в следующем виде:

$$\text{Полная неопределенность} = \text{Классическая часть} + \text{Квантовая часть}. \quad (1.7)$$

Соотношение (1.7) выполняется для замкнутых квантовых состояний при измерении без обмена сообщениями между указанными частями. В открытой системе возможен дополнительно взаимный обмен сообщениями между активными агентами (расположенными на классических и квантовых уровнях) и уровнями самоорганизации. Это означает, что присутствует взаимная (смешанная) корреляция между реальным и виртуальным состояниями нормированных сигналов управления. Классическая корреляция в этом случае выступает частным случаем полной квантовой корреляции. При этом передача сообщений, согласно п. 1.5.2, выполняется по квантовым каналам, обеспечивающим организацию передачи суперпозиции сигналов с различными видами корреляции между агентами.

Такие квантовые каналы передачи информации являются специальным классом квантовых коррелированных (между входом - выходом) каналов связи, в которых достаточно иметь конечную память и возможно реализовать новые квантовые стратегии передачи сообщений с простым протоколом связи. Кодирование сообщений в таких каналах связи с конечной памятью и особенности смешанных каналов связи позволяют эффективно проводить передачу потоков информации через квантовые механизмы извлечения (декодирования) данных.

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. При этом интенсивность квантовой корреляции выше классической корреляции (неравенство Белла).

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 квантовых состояниях сформированной суперпозиции квантовых битов и служит информационным ресурсом для извлечения дополнительной (ненаблюдаемой) ценной квантовой информации.

Таким образом, 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 внутренней и внешней типов корреляции осуществляется обмен информацией и координированное управление между коэффициентами усиления проектируемого робастного нечеткого ПИД-регулятора.

Рассмотрим эффект извлечения скрытой и приращения дополнительной квантовой информации с точки зрения квантовой теории информации и его программное формирование в структуру КА самоорганизации БЗ.

Пример 4. Эффект извлечения скрытой квантовой информации. Без потери общности выделим простую ситуацию одностороннего обмена данными при определенном количестве скрытой (ненаблюдаемой) классической корреляции в квантовом состоянии. Будем интерпретировать процесс обмена данными между двумя БЗ (как процесс передачи информации по квантовому каналу связи) в виде игровой ситуации, допускающей обмен данными между игроками A и B , в пространстве размерности $d = 2^n$. Согласно законам квантовой механики, с помощью матрицы плотности ρ описывается начальное квантовое состояние, образованное двумя классическими состояниями (Б30 и Б31). Начальная матрица ρ рассматривается как стартовый информационный ресурс и распределяется между подсистемами A (Б30) и B (Б31) в пространстве размерности d ,

$$\rho = \frac{1}{2d} \sum_{k=0}^{d-1} \sum_{t=0}^1 (|k\rangle\langle k| \otimes |t\rangle\langle t|)_A \otimes (U_t |k\rangle\langle k| U_t^\dagger)_B.$$

Здесь квантовые операторы $U_0 = I$ и U_1 переводят исходный вычислительный базис в объединенный взаимно несмещенный базис (MUB – mutually unbiased basis) следующего вида $|\langle i | U_t | k \rangle| = 1/\sqrt{d} \quad \forall i, k$. В случае одностороннего обмена данными игрок A имеет полную информацию о состоянии игрока B , который в свою очередь выбирает состояние $|k\rangle$ случайным образом из пространства состояний

размерности d в двух возможных случайных вычислительных базисах. Информационный ресурс состояния ρ используется по следующему алгоритму. Игрок A формирует случайную выборку длиной в n -битов и передает ее игроку B в состоянии $|k\rangle$ или $H^{\otimes n} |k\rangle$ в зависимости от случайного выбора бита $t = 0$ или 1 . Здесь, как и ранее, H является преобразованием Адамара. Игрок A посылает бит t игроку B без возможности наблюдения впоследствии сформированной в состоянии B корреляции.

Применение преобразования Адамара и измерение единичного квантового бита достаточно для приготовления состояния ρ и извлечения в дальнейшем ненаблюдаемой корреляции в новом состоянии ρ' . Через ρ и ρ' обозначены состояния до и после проведения операций обмена сообщениями $\rho' = \Lambda(\rho)$. Начальная корреляция в состоянии ρ – малая величина, и количество информации, содержащееся в нем, определяется как $I_{CA}^{(l)}(\rho) = \frac{1}{2} \log d$. Количество информации в конечном состоянии после полного измерения M_A в одностороннем обмене информацией равно $I_{CA}(\rho') = I_{CA}^{(l)}(\rho) = \log d + 1$, т.е. количество доступной извлеченной информации возросло.

Этот эффект невозможно описать на классическом уровне, он носит чисто квантовый характер. При этом состояния, имеющие такое свойство, не обязательно должны быть запутанными, а соответствующий канал передачи информации может быть реализован с помощью преобразования Адамара. Поэтому, используя преобразование Адамара и эффект квантовой корреляции как физический носитель передачи сообщений между конечным числом спроектированных БЗ, можно добиться увеличения содержащейся информации в исходном квантовом состоянии за счет учета существующей скрытой классической корреляции. Приведенные в примерах 1, 3 и 4 эффекты и результаты учитываются в этапах формирования соответствующей корреляции в суперпозиции реальных и виртуальных состояний сигналов управления при работе КА в КНВ. Рассмотрим на примере (из двух коррелированных сигналов управления) этапы программной реализации процесса формирования квантовой суперпозиции, рассмотренной в этом разделе (п. Г и Д), за счет применения матрицы Адамара и операции тензорного произведения.

Е. Программная реализация процесса формирования квантовой суперпозиции и выбора «интеллектуального состояния» в КА. На данном этапе формируется структура компонент суперпозиции и осуществляется выбор вида и типа квантовой корреляции (рис. 1.15(а), блок III) и соответствующих компонент для используемого типа корреляции из нормированных сигналов управления.

Указанные операции показаны на рис. 1.21(а) – г и отвечают операциям на рис. 1.16, шаг 2.

На рис. 1.21(а) графически наглядно отражена идея формирования и выбора компонент суперпозиции из различных сигналов управления и состояний (реальных и виртуальных) в виде кубитов с целью последующего извлечения знаний из динамического поведения регулятора и ОУ. Процесс формирования квантовой корреляции (пространственной, внешней и внутренней) между сигналами управления коэффициентами усиления K_p и K_D от двух БЗ графически иллюстрируется на рис. 1.21(б).

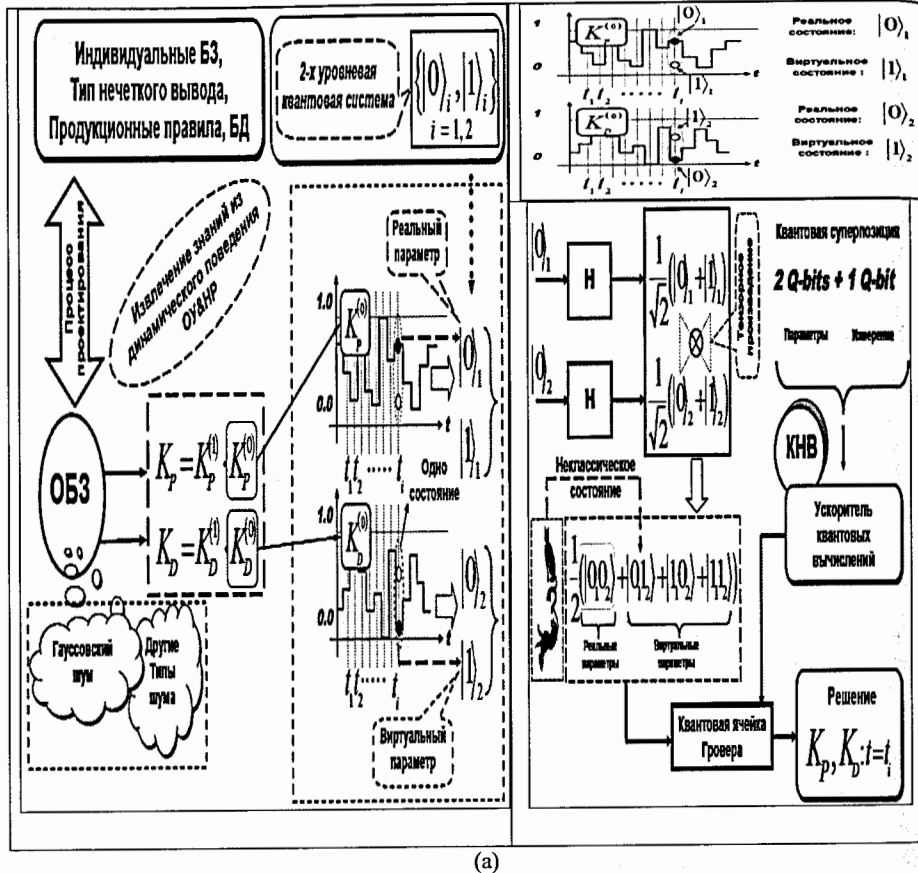


Рис. 1.21. Программная реализация процесса формирования квантовой суперпозиции и выбора «интеллектуального состояния» в КА:

a - формирование и выбор компонент суперпозиции из различных сигналов управления и состояний (реальных и виртуальных); *б* - процесс формирования квантовой корреляции (пространственной, внешней и внутренней) между сигналами управления коэффициентами усиления K_p и K_D от двух БЗ; *в* - графический интерфейс пользователя формирования квантовых состояний в суперпозиции и их кодирование; *г* - алгоритм вычисления пространственной корреляции и процесс формирования «интеллектуального» состояния; *д* - графический интерфейс пользователя для формирования и вычисления «интеллектуального» квантового состояния по принципу максимума амплитуды вероятностей; *е* - алгоритм вычисления амплитуды вероятностей квантового состояния и его реализация в среде MatLab/Simulink; *ж* - пример результатов блока измерений квантовых состояний с максимальной амплитудой вероятностей для трех коэффициентов усиления

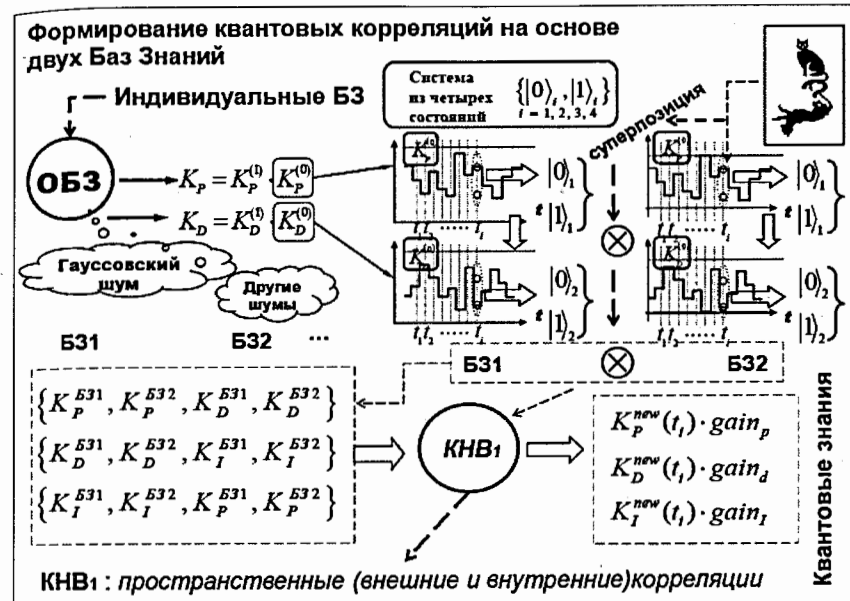


Рис. 1.21 (б)

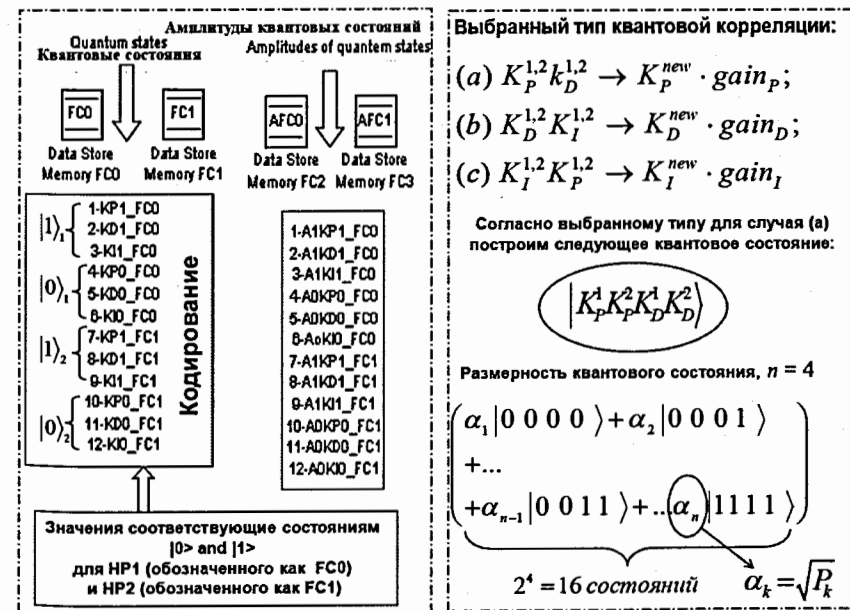


Рис. 1.21 (в)

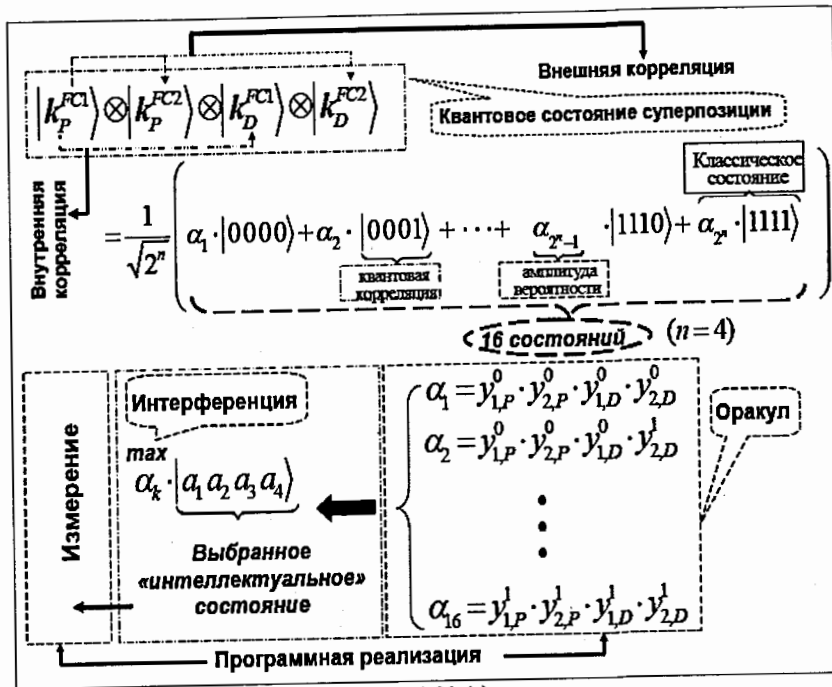


Рис. 1.21 (г)

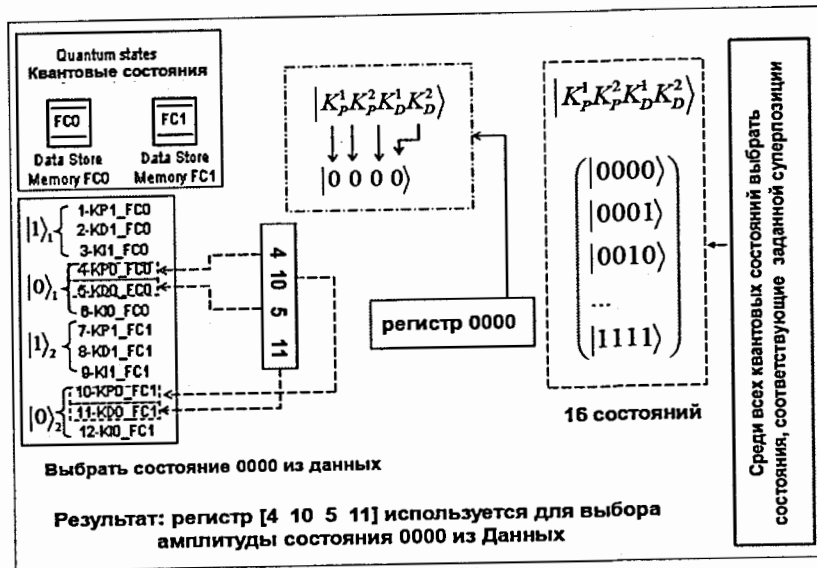


Рис. 1.21 (д)

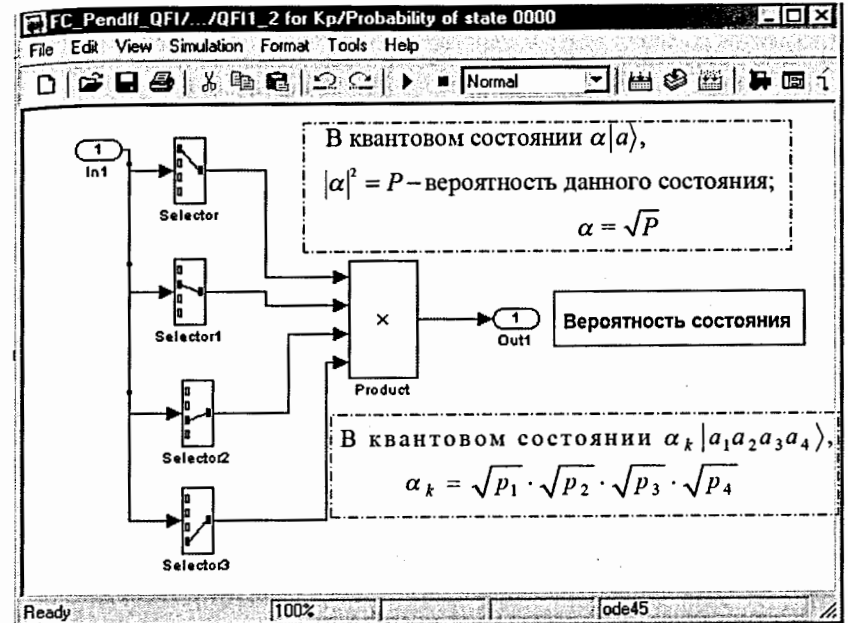


Рис. 1.21 (е)

Пример результатов блока измерений в непредвиденной ситуации управления:

	$K_P(t_i)$	$K_D(t_i)$	$K_I(t_i)$
Состояния с максимальной амплитудой вероятностей	1110	1101	1111
	1010	0101	1111
	1111	1111	1111
	1111	1111	1111
	1111	1111	1111
	1111	1111	1111
	1111	1111	1111
	1111	1111	1111
	1111	1111	1111
	1111	1111	1111
	1111	1111	1111
	1111	1111	1111
	1011	0111	1111
	1111	1111	1111
	0011	0111	1011
	0011	0111	1011
	0011	0111	1011
	0011	0111	1011
	0011	0111	1011
	0011	0111	1011
	0101	1111	1010
	0101	1111	1010
	0101	1111	1010
	1101	1111	1110
	1101	1111	1110

1- виртуальное состояние,
0- реальное состояние
 $t_i, i = 0, 1, \dots, 21$
- моменты времени
управления

Рис. 1.21 (ж)

Пример 5. Рассмотрим, например, согласно рис. 1.21(б), следующий тип квантовой корреляции:

$$\{k_p^1(t), k_D^1(t), k_p^2(t), k_D^2(t)\} \rightarrow k_p^{new}(t), \quad (1.8)$$

где индексы 1 и 2 указывают принадлежность к соответствующим БЗ. Тогда квантовое состояние

$$|a_1 a_2 a_3 a_4\rangle = |k_p^1(t) k_D^1(t) k_p^2(t) k_D^2(t)\rangle$$

рассматривается как коррелированное (entangled) состояние.

Графический интерфейс пользователя для формирования квантовых состояний в суперпозиции (1.8) и их кодирование для выбранного типа квантовой корреляции показан на рис. 1.21(в). Рисунок 1.21(г) содержит алгоритм вычисления пространственной корреляции (см., рис. 1.20(б)) и процесс формирования «интеллектуального» состояния. На этом же рис. 1.21(г) показаны внутренняя и внешняя корреляции между сигналами управления коэффициентами усиления двух различных БЗ.

Графический интерфейс пользователя для формирования и вычисления «интеллектуального» квантового состояния по принципу максимума амплитуды вероятностей отражен на рис. 1.21(д). Алгоритм вычисления амплитуды вероятностей квантового состояния и его реализация в среде MatLab/Simulink представлены на рис. 1.21(е). Пример результатов работы блока измерений квантовых состояний с максимальной амплитудой вероятностей для трех коэффициентов усиления приведен на рис. 1.21(ж). Детали процессов вычисления в остальных блоках КНВ на рис. 1.15(а) и 1.16 несут технический характер и здесь не рассматриваются (см. Приложение П1).

В результате применения КНВ в структуре ИСУ осуществляется извлечение дополнительной (скрытой) квантовой информации, а ее использование дает возможность проектировать робастные сигналы управления в реальном времени из реакций НР на непредвиденные ситуации управления.

Примечание 13. Такой подход позволяет более полно и глубоко понять решение следующей трудной и принципиально важной для теории и систем управления проблемы (отмеченной ранее): *определение роли и влияния квантовых эффектов на повышение уровня робастности проектируемых ИСУ.* Эффективное применение квантовых эффектов в КНВ осуществляется за счет извлечения дополнительной квантовой информации, скрытой (и только частично доступной) в корреляционных классических состояниях законов управления, спроектированных только на основе классических методов технологии мягких вычислений. В результате срабатывает эффект редукции избыточной информации в классических законах управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора.

Сам эффект редукции избыточной информации достигается за счет внедрения новых видов квантовой корреляции результатов реакций НР (с заданными БЗ) на непредвиденную ситуацию управления. Оптимальное соотношение типа и вида квантовой корреляции выполняет важную роль координированного управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора на нижнем исполнительском уровне ИСУ (см. Приложение П1).

Рассмотрим применение КНВ в структуре ИСУ, представленной на рис. 1.3(б).

1.6. Интеллектуальный робастный регулятор в системе управления глобально неустойчивым нелинейным ОУ «Каретка – маятник»

На рис. 1.22(а, б) показаны расчетная модель (параметры и уравнения движения ОУ) и система моделирования модели ОУ «Каретка – маятник» в среде MatLab/Simulink.

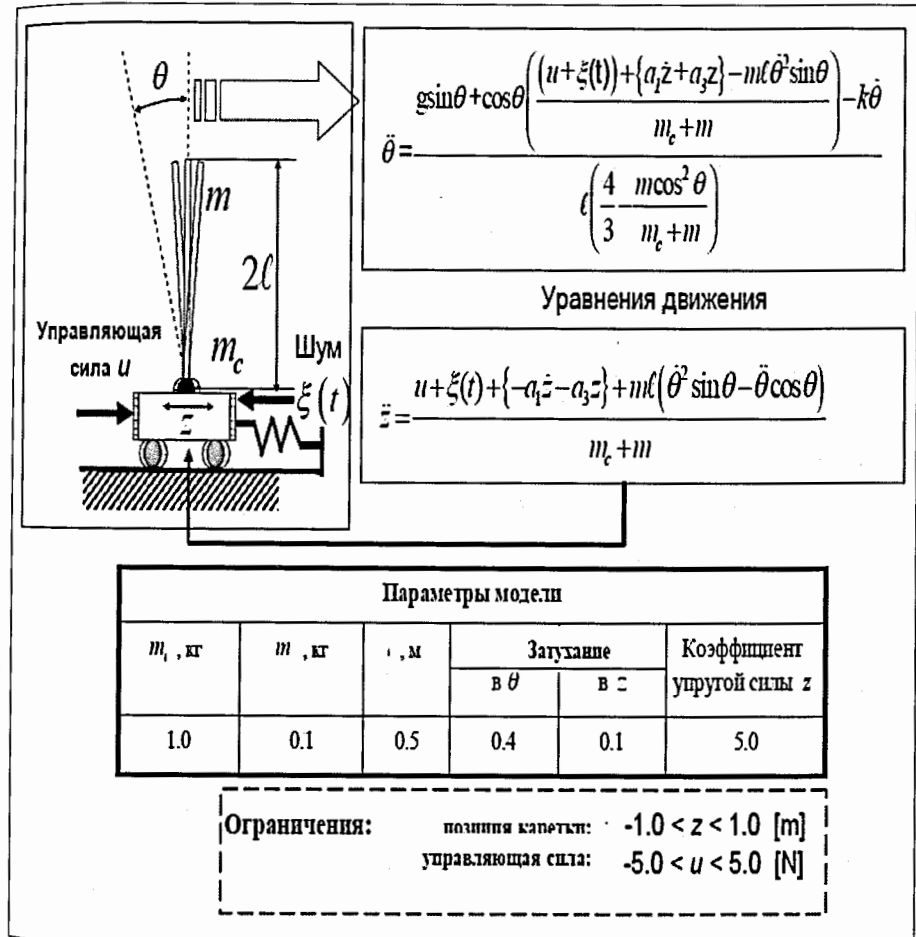


Рис. 1.22 (а)

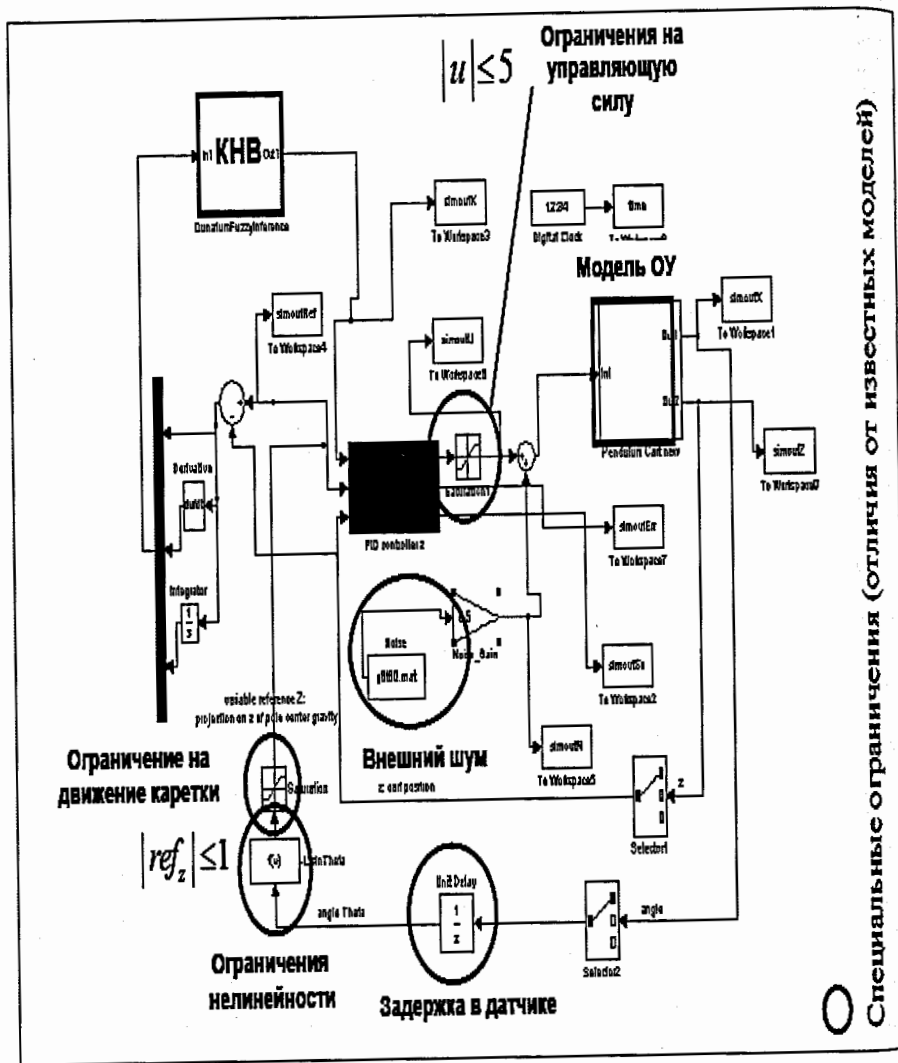


Рис. 1.22. Динамическая система ОУ «Каретка – маятник»: а – модель ОУ; б – модель ОУ в MatLab

Модель ОУ усилена новыми (по отношению к известным) ограничениями, отмеченными на рис. 1.22(б) и представляет большую сложность для традиционных методов оптимального управления.

Рисунок 1.23 иллюстрирует методологию тестирования робастности (рис. 1.23(а)) и источники непредвиденных ситуаций управления (рис. 1.23(б)) для ИСУ на рис. 1.3(б).

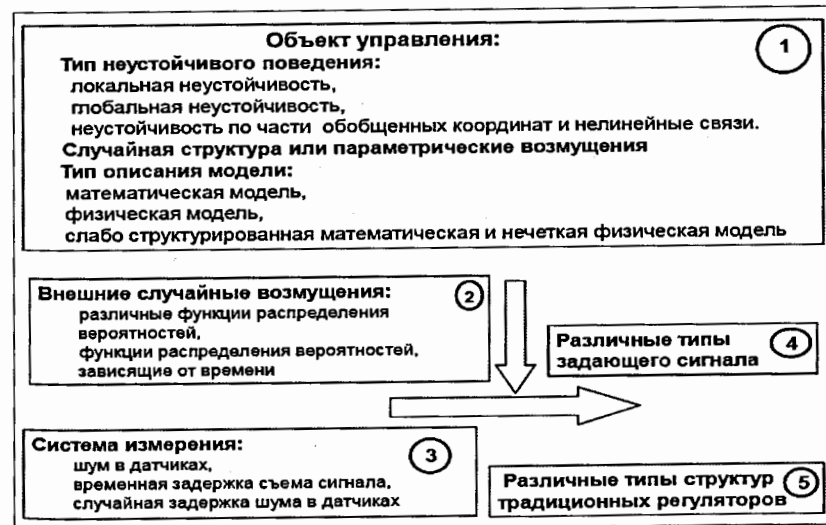
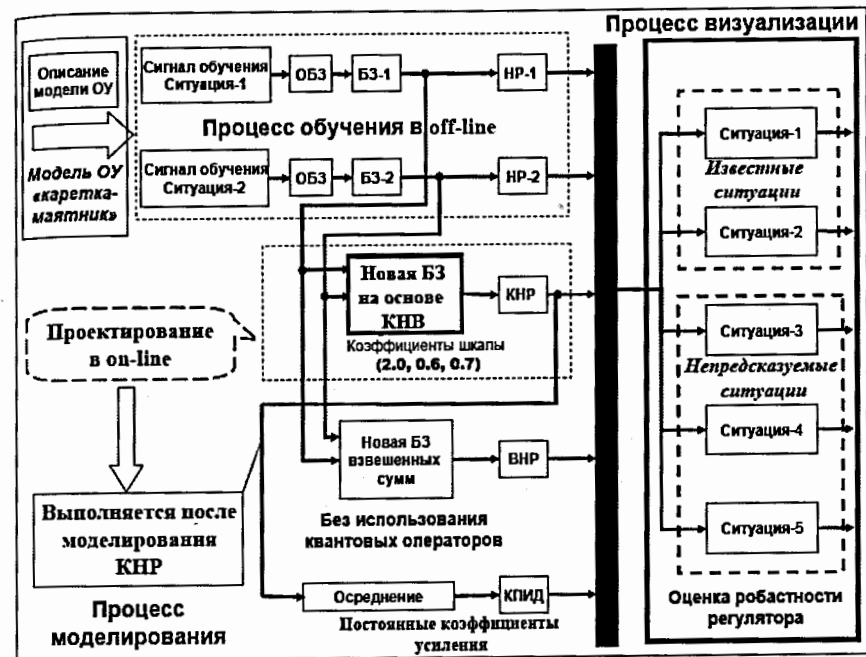


Рис. 1.23. Тестирование робастности ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления: а – схема и алгоритм тестирования; б – источники непредвиденных ситуаций управления в ИСУ

Моделирование процессов самоорганизации осуществлялось на разработанном программном инструментарии технологии интеллектуальных квантовых и мягких вычислений (см., Приложение П1). БЗ для НР-1,2 были предварительно спроектированы с помощью ОБЗ на мягких вычислениях с ориентацией на гауссовский и рэлеевский шумы соответственно (см. ниже рис. 1.24(г, д)).

На рис. 1.24 отражены результаты моделирования ИСУ на непредвиденную (физически неоднородную) ситуацию управления: в схеме на рис. 1.22(б) новое время задержки сигнала датчика равно 0.002 сек; внутренний гауссовский шум с амплитудой составляет 0.01; новые начальные условия

$$[\theta_0, \dot{\theta}_0] = [13, 1] \text{ (в гр.)}, [z_0, \dot{z}_0] = [0, 0].$$

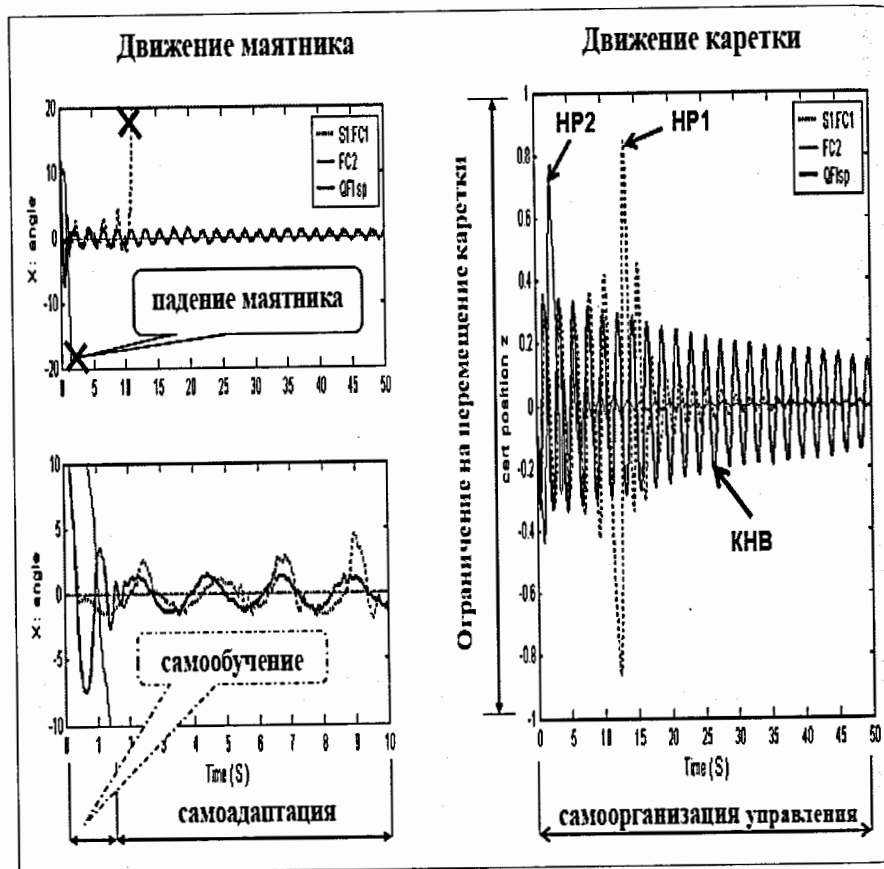


Рис.1.24 а

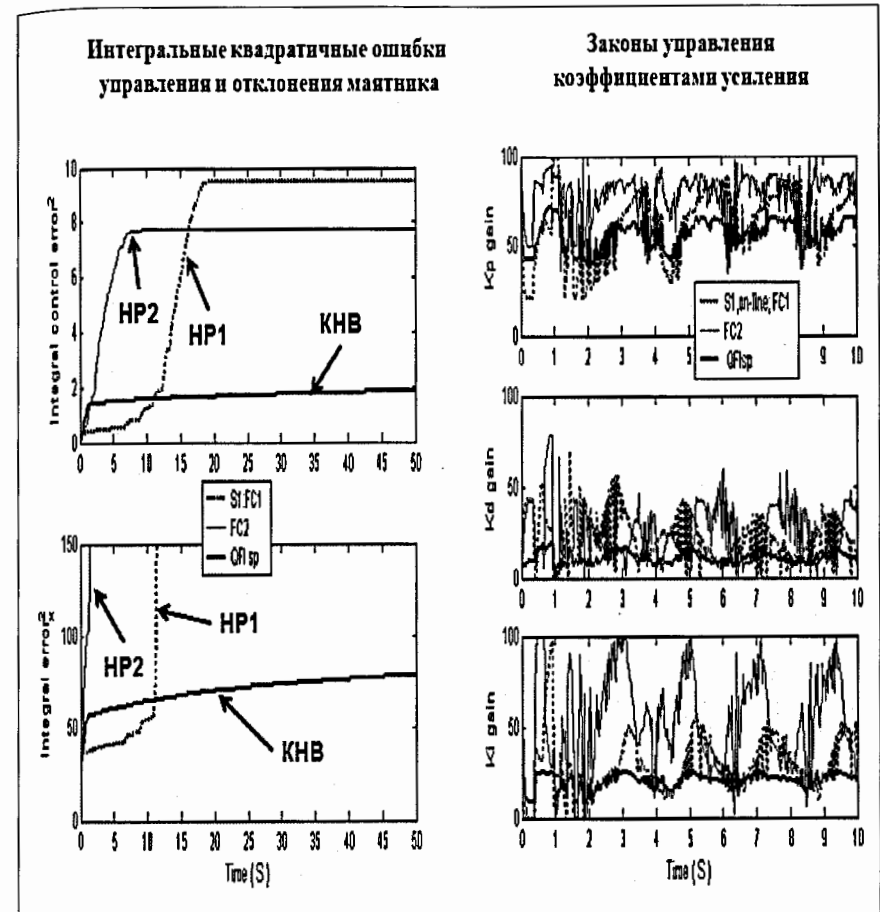
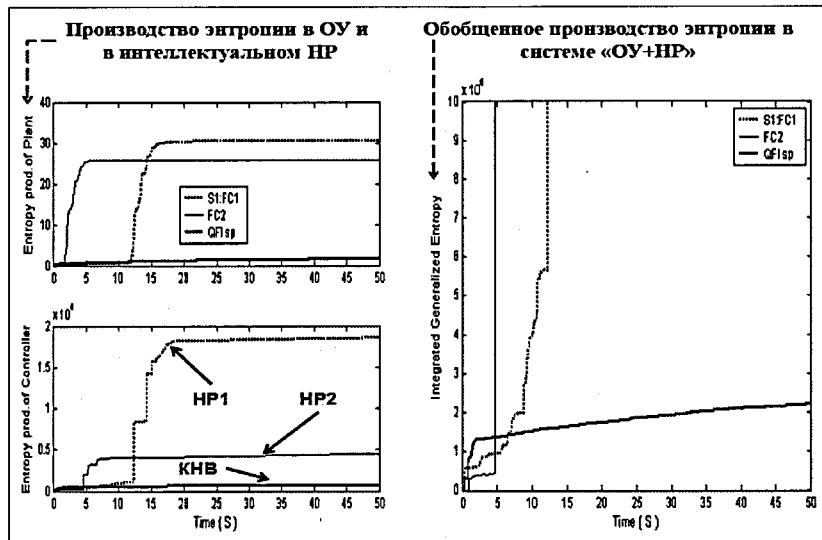
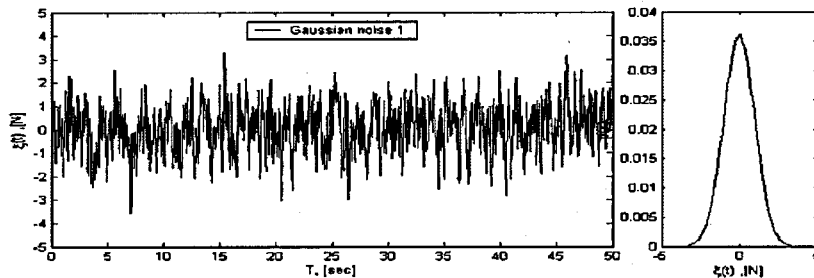


Рис.1.24 б

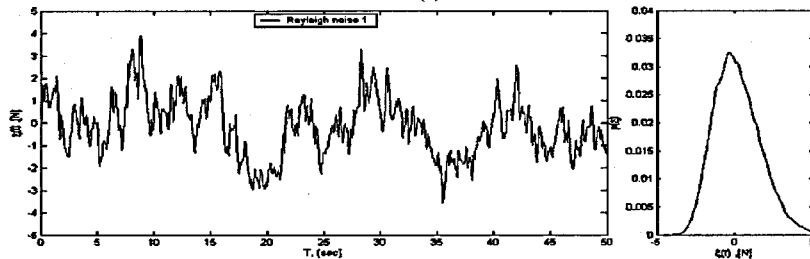
Внешний рэлеевский шум уточнялся на стадии обучения и показан на рис. 1.24(д).
 Примечание 14. На рис. 1.24 и ниже по тексту приняты следующие обозначения: FC(1,2) соответствует НР1, НР2, $x = \theta$ - угол отклонения маятника от заданного положения, QF1sp - квантовый НР с пространственной корреляцией.



(б)



(г)



(д)

Рис.1.24. Результаты моделирования модели ОУ в условиях непредвиденной ситуации а – динамическое поведение ОУ; б – динамическая точность управления и законы изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора; в – производство энтропии в ОУ, в интеллектуальном НР и обобщенная энтропия «ОУ + НР»; г – гауссовский шум; д – рэлеевский шум

На рис. 1.25(а) приведены результаты моделирования ИСУ на более сложную непредвиденную (физически неоднородную) ситуацию управления: в схеме на рис. 1.22(б) новое время задержки сигнала датчика составляет 0.003 с; внутренний гауссовский шум с амплитудой - 0.02; случайные параметры модели k, a_1, a_2 определялись в виде

$$k^{st} = k + gain_k \xi(t) = 0.4 + 1 \cdot \xi(t);$$

$$a_1^{st} = a_1 + gain_{a_1} \xi(t) = 0.1 + 0.5 \cdot \xi(t); a_2^{st} = a_2 + gain_{a_2} \xi(t) = 5 + 2 \cdot \xi(t),$$

где $\xi(t)$ - гауссовский белый шум с единичной амплитудой; новые начальные условия $[\theta_0, \dot{\theta}_0] = [13, 1]$ (в зр.), $[z_0, \dot{z}_0] = [0, 0]$. Внешний шум, моделирующий шероховатость поверхности передвижения каретки с установленным маятником, имел переменную функцию плотности распределения вероятностей (рис. 1.25(б)).

Из результатов моделирования, представленных на рис. 1.24, 1.25, следует неожиданный (для классической логики и методологии проектирования ИСУ) результат: из двух не робастных НР-1,2 с помощью КНВ в реальном времени может быть спроектирован *робастный квантовый НР*². Отметим, что использовалась оптимальная квантовая *пространственная* корреляция (см. Приложение) между двумя сигналами управления из БЗ нечетких ПИД-регуляторов.

Приведенный эффект имеет чисто квантовую природу и у него нет классического аналога. Из результатов моделирования (рис. 1.24(в)) следует также, что обобщенное производство энтропии в системе «ОУ + нечеткий ПИД-регулятор» является минимальным и в процессе квантовой самоорганизации в структуре ИСУ достигается требуемый термодинамический критерий оптимального распределения между устойчивостью, управляемостью и робастностью (рис. 1.14). Модели систем управления на основе скользящих режимов с использованием ГА и других методов технологии мягких вычислений, оптимизации нечетких ПИД-регуляторов на основе эволюционного программирования, дифференциальной эволюции, swarm computational intelligence и т.п. в условиях непредвиденных ситуаций управления не обладают глобальной робастностью и/или имеют дополнительно более сложную структуру регулятора.

Примечание 15. В данном разделе не затронуты такие важные проблемы, как: 1) оценка необходимого числа ситуаций обучения для проектирования индивидуальных БЗ, гарантирующих достижение глобальной робастности НР в непредвиденных ситуациях управления; 2) оценка качества управления по суммарным критериям включающим в себя критерии минимума производства энтропии, минимума среднеквадратичной ошибки управления, простоты законов управления и др.; 3) робастное управление существенно-нелинейными ОУ с локальной и глобальной неустойчивостью по части обобщенных координат; 4) разработка и оценка точности субоптимальных робастных БЗ для НР в ИСУ для слабо структурированных моделей ОУ; 5) ППА интеллектуальных вычислений и робастных ИСУ.

Перечисленные вопросы рассмотрены в отдельной работе авторов и в Приложении П1.

² Описанный синергетический эффект получен также в [33, 34] значительно позже работы [24].

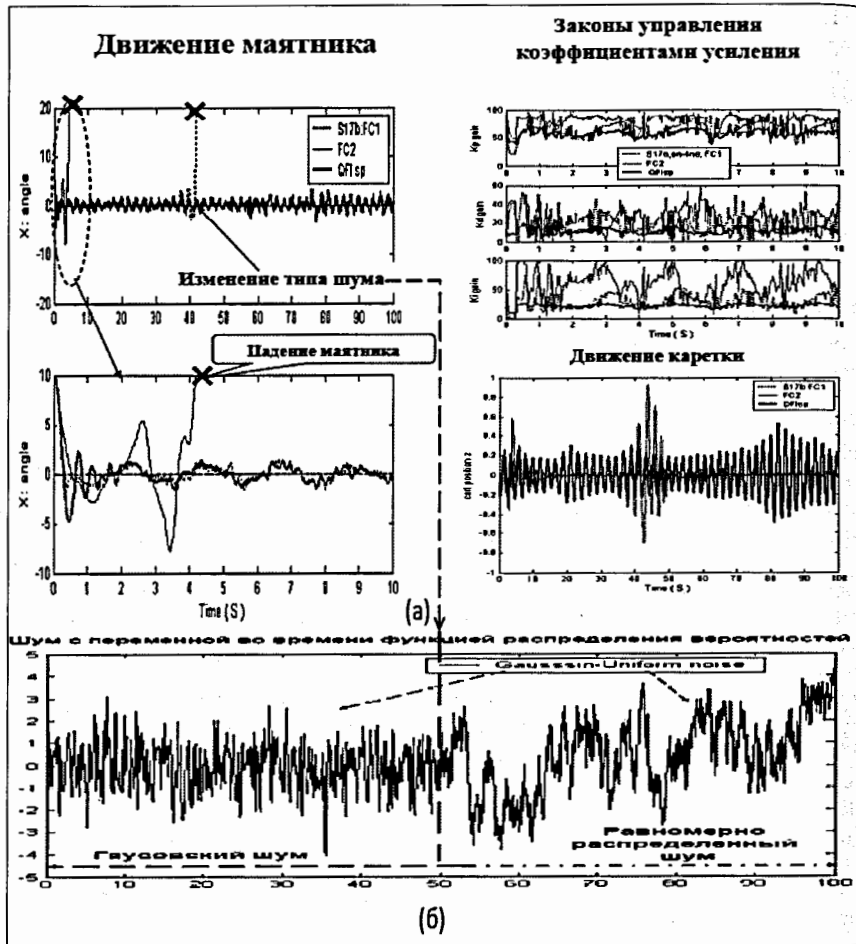


Рис. 1.25. Результаты моделирования модели ОУ в условиях новой непредвиденной ситуации: а – динамическое поведение ОУ и законы изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора; б – внешний шум с переменной во времени функцией распределения вероятностей амплитуд помех (случайные шероховатости поверхности движения каретки)

1.7. Декомпозиция многокритериальных задач оптимального управления

В этом случае БЗ индивидуального НР проектируется с помощью ОБЗ, используя отдельный критерий (например, минимум ошибки управления, минимум абсолютной ошибки управления, время переходного процесса, время и амплитуда перерегулирования, минимум обобщенного произведения энтропии и др.) для

фиксированной ситуации управления. Указанные критерии качества управления отождествляются с функцией пригодности в соответствующем ГА в ОБЗ.

По выше описанной схеме на рис. 1.3(б) определяется реакция индивидуальных НР на непредвиденную ситуацию управления, с помощью КНВ осуществляется агрегирование критериев качества и формируется робастный многокритериальный оптимальный сигнал управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора. В этом случае «интеллектуальное» состояние, выбранное по критерию минимума энтропии, включает все наилучшие для данной ситуации характеристики многокритериального управления; за счет самоорганизации автоматически устанавливает приоритет между критериями управления и определяет доминантную составляющую.

Пример 6. Решение задачи векторной оптимизации на основе декомпозиции БЗ. Рассмотрим динамическую модель системы «Движущаяся каретка – перевернутый маятник» (рис. 1.22(а)), управляемой нечетким ПИД-регулятором по структурной схеме на рис. 1.22(б). Заданы следующие значения параметров: $m_c = 1$; $m = 0.1$; $l = 0.5$; $k = 0.4$; $a_1 = 0.1$; $a_2 = 5$ и начального положения $[\theta_0; \dot{\theta}_0; z_0; \dot{z}_0] = [10; 0; 1; 0; 0]$ (величина угла отклонения маятника задана в градусах); ограничение на силу управления следующие: $-5.0 < u < 5.0$.

Особенностью задачи управления данным ОУ является использование одного нечеткого ПИД-регулятора для управления только перемещением каретки (с одной степенью свободы), в то время как сам ОУ имеет две степени свободы.

Целью управления является достижение углом отклонения маятника (второй обобщенной координаты) заданного положения через косвенное управление другой обобщенной координатой, используя соответствующие существенно нелинейные перекрестные связи с координатой перемещения каретки (эффект перекачки энергии между обобщенными координатами).

При одинаковых начальных условиях обучения с помощью ОБЗ на мягких вычислениях БЗ1 регулятора НР1 спроектирована по обобщенному критерию минимума среднеквадратичной ошибки

$$\left[\int_{t_0}^{t_{end}} \theta^2(t) dt + \int_{t_0}^{t_{end}} \dot{\theta}^2(t) dt \right],$$

а БЗ2 для регулятора НР2 спроектирована по обобщенному критерию минимума абсолютной ошибки положения маятника

$$\left[\int_{t_0}^{t_{end}} |\theta(\tau)| d\tau + \int_{t_0}^{t_{end}} |\dot{\theta}(\tau)| d\tau \right].$$

В качестве случайного сигнала для проектирования БЗ1 был выбран Гауссовский шум, а для формирования БЗ2 был выбран Рэлееский шум, представленные на рис. 1.24(г, д) (ситуации обучения (S1, S2) соответственно). Физически первый критерий эквивалентен полной энергии перевернутого маятника, а второй критерий характеризует точность динамического поведения ОУ.

На рис. 1.26 показаны БЗ1 и БЗ2 с соответствующими активизированными количеством правил 22 и 33 при общем количестве правил 729.

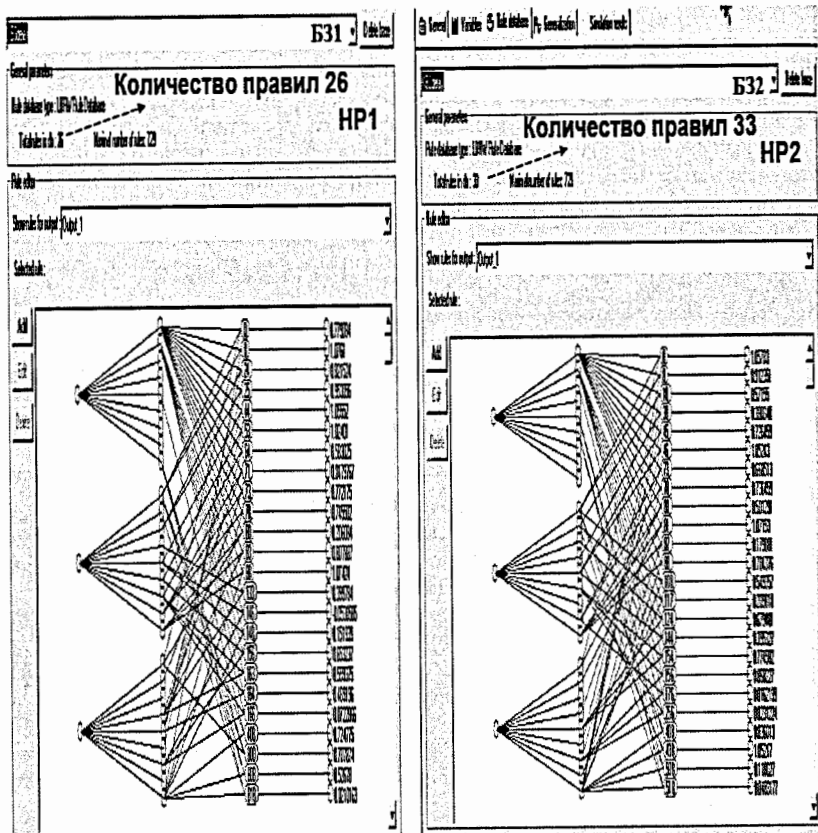


Рис. 1.26. Вид БЗ1 и БЗ2 с соответствующими активизированными производственными правилами

Были смоделированы две непредвиденные ситуации управления (S3, S4), в одной из которых (S3) был введен новый шум $\xi(t)$ – случайный сигнал с равномерным одномерным распределением, задержка сигнала ошибки управления (0.003 сек), и сигнал шума в датчике измерения положения маятника (коэффициент усиления шума 0.015).

В ситуации (S4) был введен новый шум - случайный сигнал с гауссовским одномерным распределением, задержка сигнала ошибки управления (0.005 сек), и сигнал шума в датчике измерения положения маятника (коэффициент усиления шума 0.01).

На рис. 1.27 показан пример работы КНВ по формированию робастного сигнала управления пропорциональным коэффициентом усиления k_p в непредвиденной ситуации управления S3.

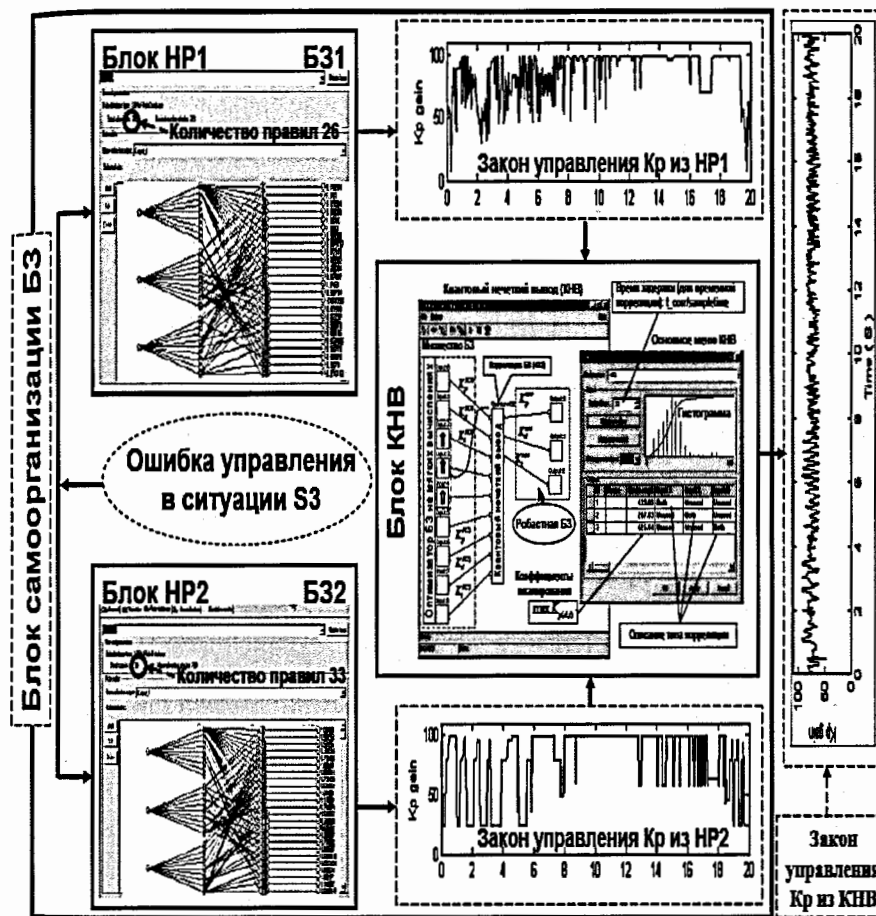


Рис. 1.27. Пример работы блока самоорганизации БЗ на основе КНВ

В этом случае выходные сигналы из БЗ1 и БЗ2 в виде реакции на новую ошибку управления в ситуации S3 поступают в блок КНВ. Выходом блока КНВ является новый сигнал управления коэффициентом k_p в реальном времени. Таким образом, блоки БЗ1, БЗ2 и КНВ на рис. 1.27 образуют блок самоорганизации БЗ в непредвиденной ситуации управления.

На рис. 1.28 показаны динамическое поведение исследуемой системы «Картка – маятник», а также законы управления самоорганизующегося квантового регулятора (QFI) и нечетких регуляторов НР1 и НР2.

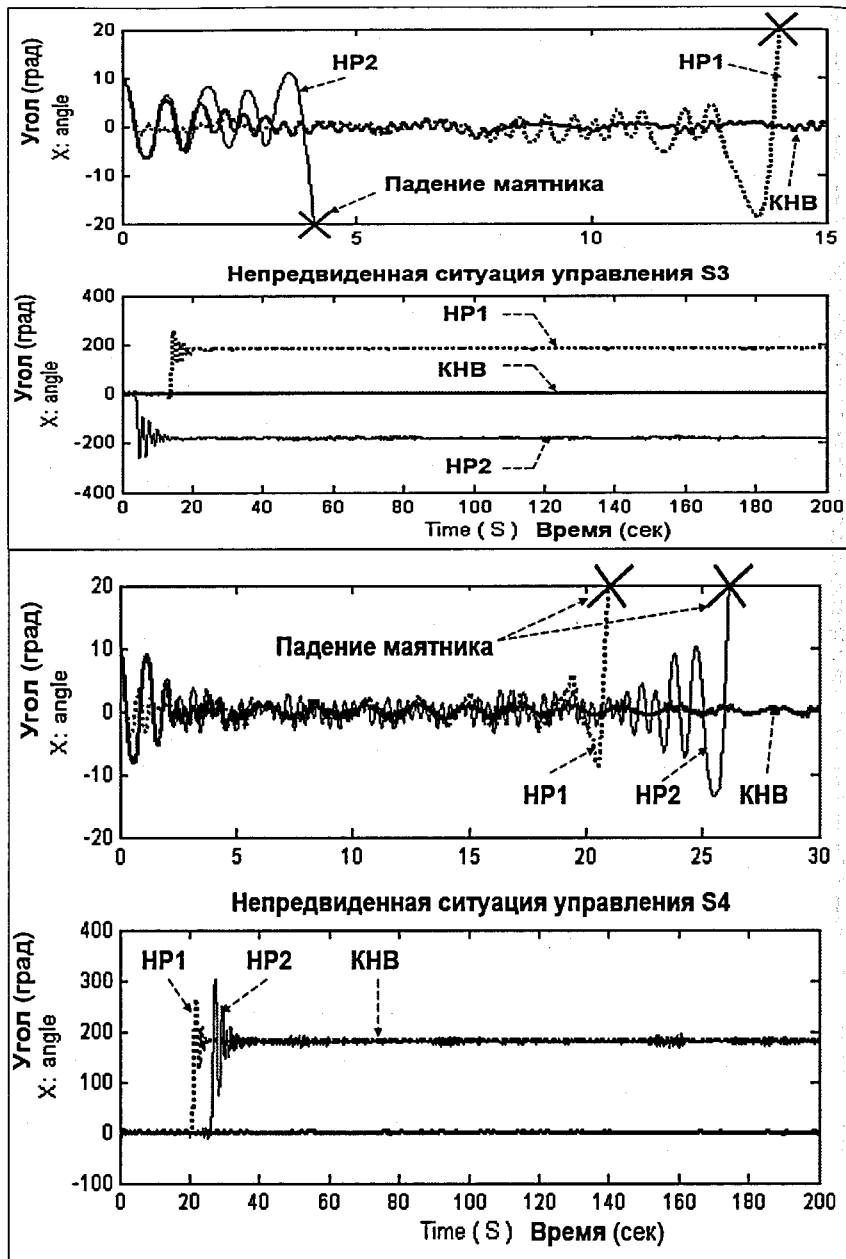


Рис. 1.28 (а)

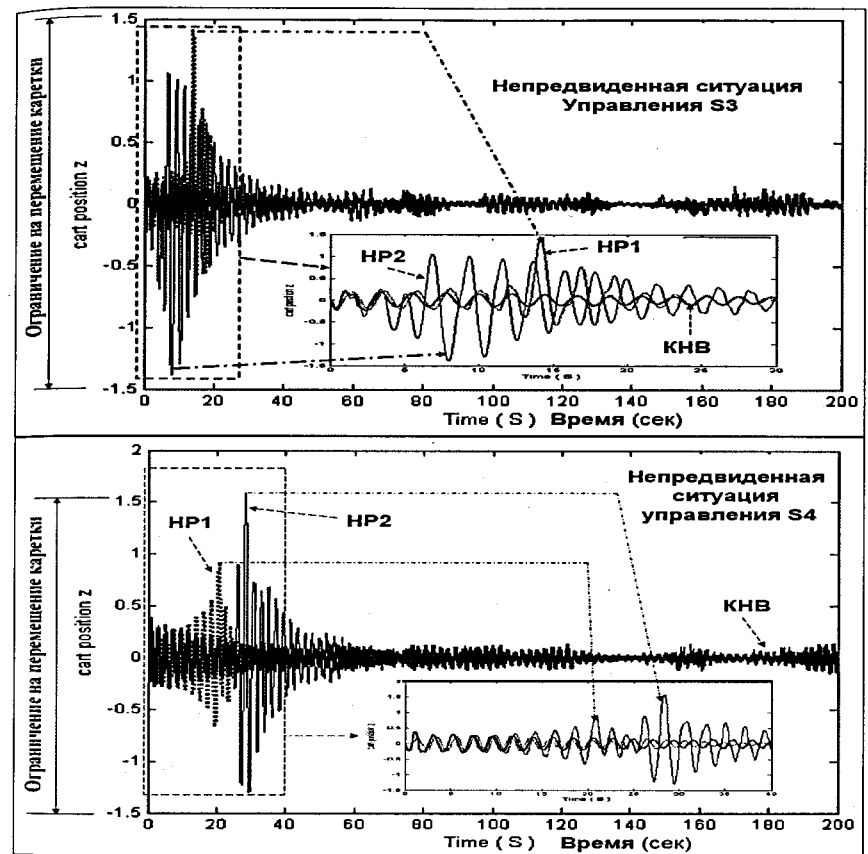
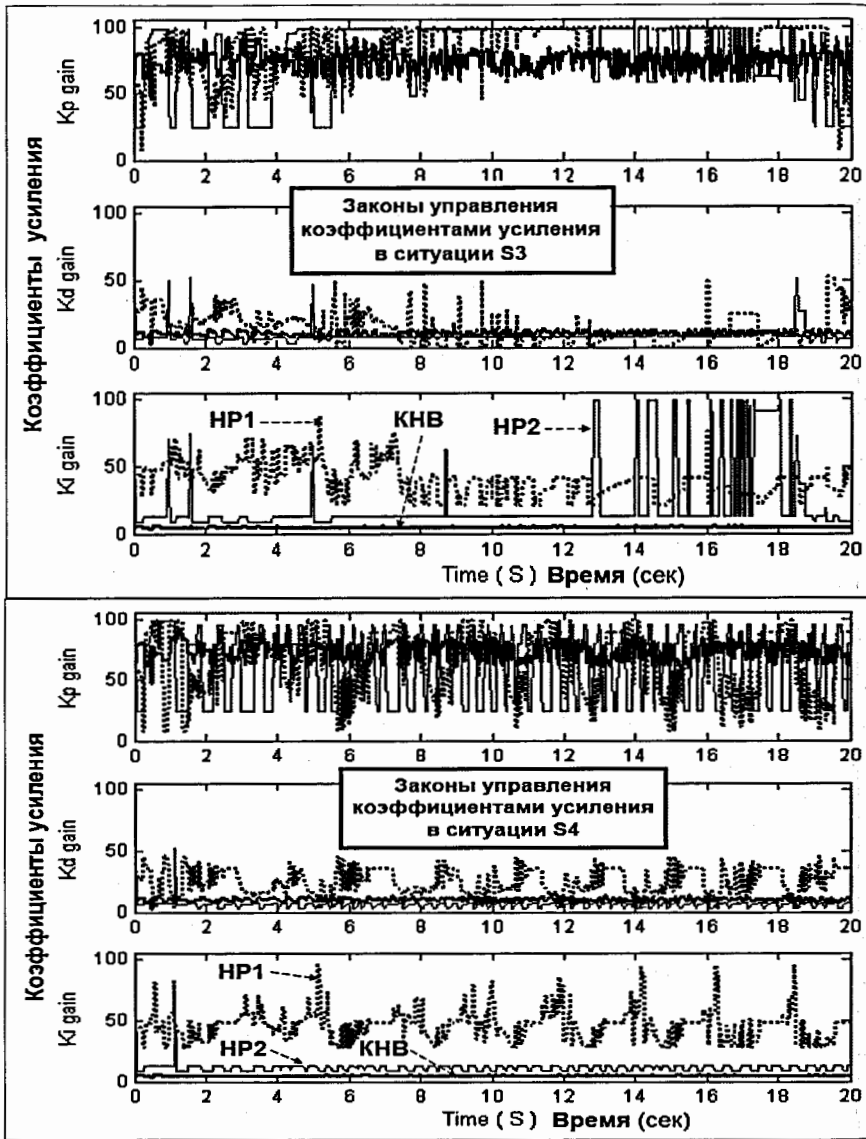


Рис. 1.28 (б)

Примечание 16. На рис. 1.28 и ниже приняты следующие обозначения: $x = \theta$ - угол отклонения маятника от заданного положения, z - положение каретки, КНВ - квантовый НР с пространственной корреляцией на основе КНВ.

Для ряда непредвиденных ситуаций управления (например, при задержке сигнала ошибки управления (0.001 сек), и сигнале шума в датчике измерения положения маятника (коэффициент усиления шума 0.01) в непредвиденной ситуации управления S3) алгоритмы управления от ОБЗ на мягких вычислениях хорошо работают и держат маятник в заданном положении. На рис. 1.28 приведена более сложная непредвиденная ситуация управления, когда другие законы управления не работают, но из них можно спроектировать робастный закон управления.

Результаты моделирования, представленные на рис. 1.28, показывают, что динамический ОУ в непредвиденных ситуациях управления (S3, S4) при управлении НР1 (НР2) теряет устойчивость, а при управлении квантовым НР (КНВ) система управления обладает свойством робастности и гарантированно достигается цель управления.



(в)

Рис. 1.28. Динамическое поведение ОУ и законы управления самоорганизующегося квантового регулятора (КНВ), нечетких регуляторов НР1 и НР2:
 а – угол отклонения маятника в ситуациях (S3, S4); б – перемещение каретки в ситуациях (S3, S4); в – законы управления коэффициентами усиления в ситуациях (S3, S4)

На рис. 1.29 показаны интегральные динамические характеристики ОУ и точности управления.

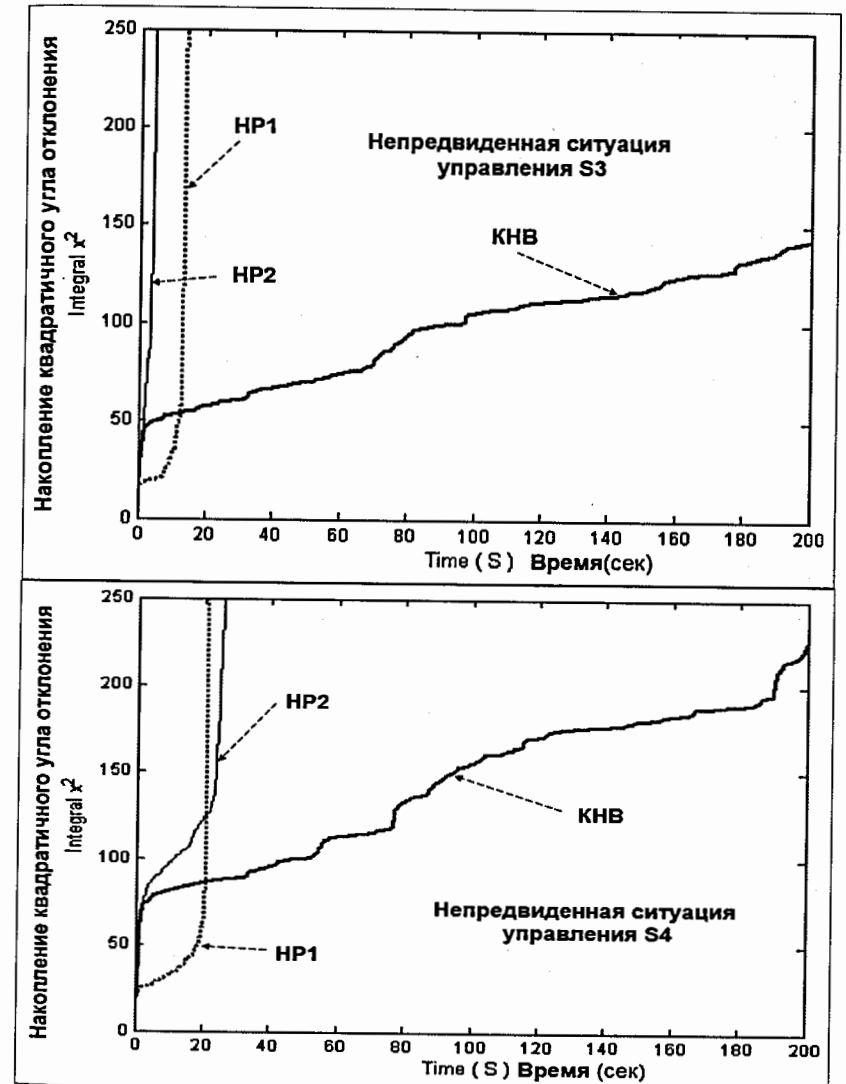


Рис. 1.29 (а)

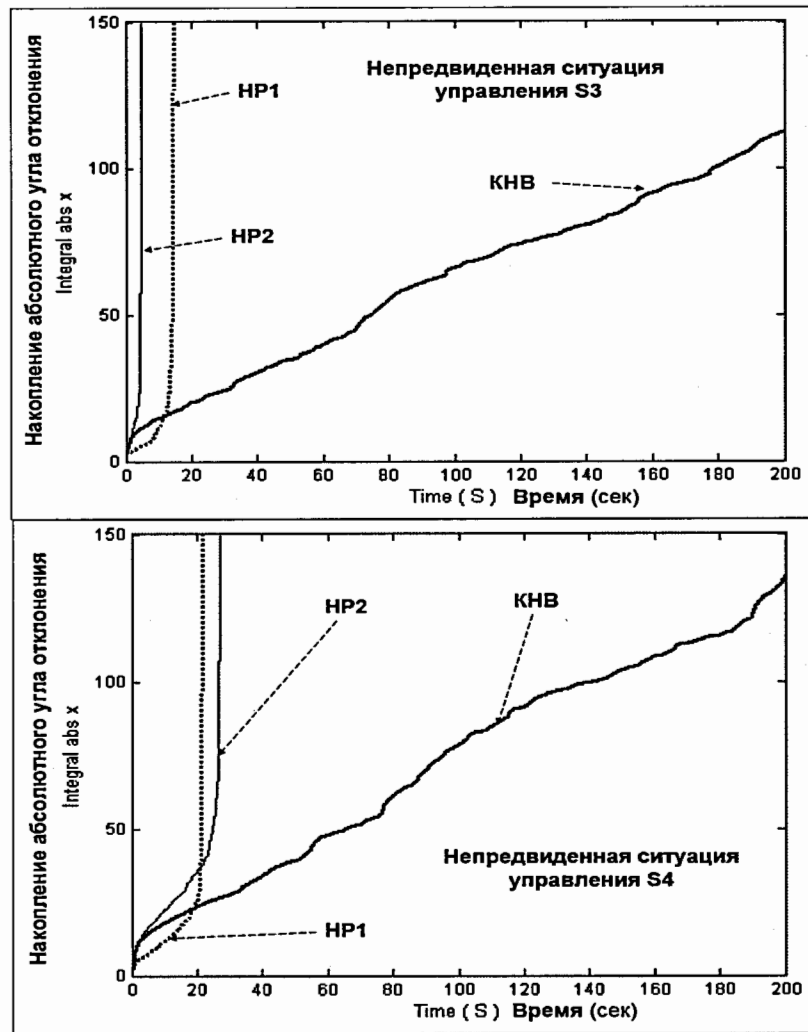
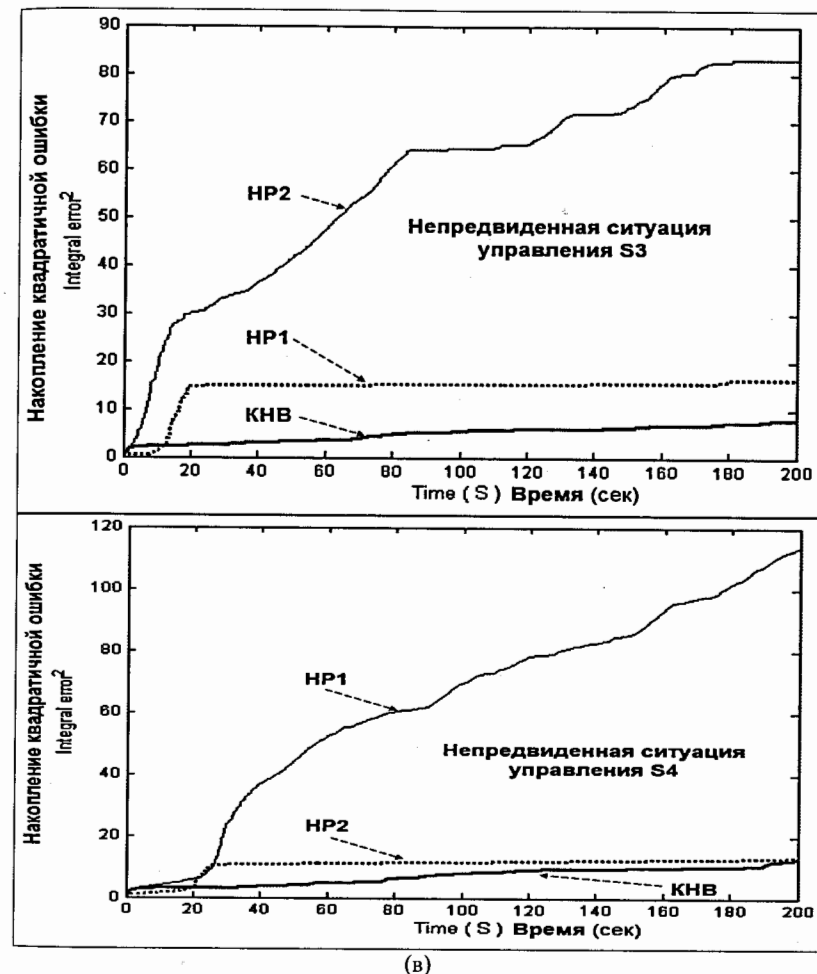


Рис. 1.29 (б)

Результаты моделирования, представленные на рис. 1.29 показывают, что требуемое качество управления по приведенным критериям в непредвиденных ситуациях управления (S3, S4) при управлении HP1 и HP2 также не достигается, в то время как при управлении квантовым HP (КНВ) система управления обладает требуемым качеством управления.

Отсюда следует, что из двух не робастных HP с помощью квантовой самоорганизации знаний можно спроектировать в реальном времени робастный HP, БЗ которого удовлетворяет обоим критериям качества.



(в)

Рис. 1.29. Интегральные характеристики динамического поведения ОУ и точности управления: а) – накопление квадратичной величины угла отклонения маятника в ситуациях (S3, S4); б) – накопление абсолютной величины угла отклонения маятника в ситуациях (S3, S4); в) – накопление величины квадратичной ошибки управления в ситуациях (S3, S4)

Следовательно, декомпозиция решения отмеченной выше задачи многокритериальной оптимизации робастной БЗ в непредвиденной ситуации управления на частные решения подзадач оптимизации физически может быть осуществлена в реальном времени в виде отдельных реакций соответствующих индивидуальных БЗ, оптимизированных с различными фиксированными критериями качества и ситуации управления. Агрегирование полученных частных решений в виде новой робастной БЗ осуществляется на основе КНВ, содержащего механизм

формирования квантовой корреляции между полученными частными решениями. В результате используются только реакции конечного числа индивидуальных БЗ, содержащие предельно достижимые законы управления в данной непредвиденной ситуации.

Формируемые новой робастной БЗ законы управления изменением коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора имеют более простую физическую реализацию и в результате содержат для непредвиденной ситуации управления лучшие характеристики индивидуальных критериев качества управления.

Таким образом, выходной сигнал КНВ представляет собой в режиме реального времени оптимальный сигнал управления изменением коэффициентов усиления нечеткого ПИД-регулятора, который включает в себя необходимые (наилучшие) качественные характеристики выходных сигналов управления каждого из НР с приоритетом и доминантной составляющей среди критериев качества управления, реализуя тем самым обобщенный принцип самоорганизации.

Такой подход открывает новые перспективы использования модели КНВ как частного варианта КА самоорганизации (см., рис. 1.3(б)) в задачах многокритериального управления ОУ со слабо формализованной структурой и большой размерностью фазового пространства управляемых параметров, использовать экспериментальные данные в виде обучающего сигнала без построения математической модели ОУ. Приведенные факты дают большое преимущество, которое выражается в виде возможности проектирования в реальном времени процессов управления с требуемой робастностью.

1.8. Заключение

Приведенные результаты позволяют более полно и глубже понять решение следующей трудной и принципиально важной для теории и систем управления проблемы: определение роли и влияния аналогов квантовых эффектов на повышение робастности проектируемых интеллектуальных процессов управления. Разработанная модель квантового алгоритма управления реализует принцип самоорганизации (знаний) в соответствии с разработанным термодинамическим критерием качества управления (минимум обобщенного производства энтропии). Технологии интеллектуальных вычислений (типа мягких и квантовых) составляют базис для проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления. Квантовая самоорганизация знаний открывает новые перспективы использования модели КНВ как частного варианта КА 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.

Полученные результаты позволили продемонстрировать эффективность КА управления самоорганизацией робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления как нового направления в теории управления. Разработанная программная поддержка реализации квантовых вычислений на классических персональных компьютерах открывает новые возможности для инженерной практики в части эффективного применения технологии квантовых и мягких вычислений при проектировании ИСУ. За счет внедрения квантовых эффектов проявляется редукция избыточной информации в классических законах управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора. Данный эффект достигается в результате

использования новой ценной квантовой информации, которая извлекается из реакций классических НР на непредвиденную ситуацию управления в реальном времени с помощью новых видов и типов квантовой корреляции. Созданные в реальном времени квантовым процессом проектирования законы управления имеют минимальную алгоритмическую сложность и при физической реализации обладают минимальными потерями полезного ресурса (минимум производства обобщенной энтропии в системе «ОУ + самоорганизующийся 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 БЗ

Список литературы к Главе 1

1. *Litvintseva L.V., Ulyanov S.S., Takahashi K.* et al. Intelligent robust control design based on new types of computation. Pt 1. New soft computing technology of KB-design of smart control simulation for nonlinear dynamic systems. – Milan: Note del Polo (Ricerca), Universita degli Studi di Milano. – 2004. – V. 60.
2. *Litvintseva L.V., Ulyanov S.V.* et al. Soft computing optimizer for intelligent control systems design: the structure and applications // *J. Systemics, Cybernetics and Informatics (USA)*. – 2003. – V.1. – № 5.
3. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V.* Design of self-organized intelligent control systems based on quantum fuzzy inference: Intelligent system of systems engineering approach // *Proc. of IEEE Internat. Conf. on Systems, Man and Cybernetics (SMC'2005)*. – Hawaii, USA. – 2005. – V.4.
4. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S.* et al. Self-organization principle and robust wise control design based on quantum fuzzy inference // *Proc. of Internat. Conf. ICSCCW'2005*. – Antalya, Turkey. – 2005.
5. *Litvintseva L.V., Ulyanov S.V., Takahashi K.* et al. Design of self-organized robust wise control systems based on quantum fuzzy inference // *Proc. of World Automation Congress (WAC'2006): Soft computing with Industrial Applications (ISSCI'2006)*. – Budapest, Hungary. – 2006. – V.5.
6. *Кураваки И., Литвинцева Л.В., Ульянов С.В.* и др. Построение робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно нелинейными динамическими системами. I // *Изв. РАН. ТиСУ*. – 2004. – № 4.
7. *Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С.* Построение робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно нелинейными динамическими системами. II // *Изв. РАН. ТиСУ*. – 2006. – № 5.
8. *Nielsen M.A., Chuang I.L.* Quantum Computation and Quantum Information. – Cambridge Univ. Press, UK. – 2000.
9. *Marinescu D.C., Marinescu G.M.* Approaching quantum computing. – Pearson Prentice Hall, USA. – 2005.
10. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S.* 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. – V. 78 – 86.
11. *Dalla Chiara M.L., Guintini R., Greechie R.* Reasoning in quantum theory: Sharp and unsharp quantum logic. – Holland, Kluwer Acad. Publ. – 2004.

12. *Pati A.K.* General impossible operations in quantum information // *Phys. Review.* – 2002. – V. A66. – № 6.
13. *Zhou D., Zeng B., You L.* Quantum information cannot be split into complementary parts // *Physics Letters.* – 2006. – V. A352. – № 1/2.
14. *Kashefi E., Kent A., Vedral V.* et al. Comparison of quantum oracles // *Phys. Review.* – 2002. – V. A65. – № 5.
15. *Bessen A.J.* The power of various re al-valued quantum queries // *J. of Complexity.* – 2004. – V. 20. – № 5.
16. *Atici A.* Comparative computational strength of quantum oracles // arXiv: quant-ph/0312107v1. – 2003.
17. *Azuma H.* A quantum algorithm for examining oracles // arXiv: quant-ph/0408013v1. – 2004.
18. *Iwama K., Kawachi A., Raymond R.* et al. Robust quantum algorithms for oracle identification // arXiv: quant-ph/0411204 v1. – 2004.
19. *Wojcik A., Chhajlany R.W.* Quantum-classical correspondence in the oracle model of computation // arXiv: quant-ph/0506248v1. – 2005.
20. *Баргатын И.В., Гришанин Б.А., Задков В.Н.* Запутанные квантовые состояния атомных систем // УФН. – 2001. – Т. 171. – № 6.
21. *Jozsa R., Linden N.* On the role of entanglement in quantum computational speed-up // *Proceedings R. Soc. Lond.* – 2003. – V. 459. – № 2036.
22. *Vidal G.* Efficient classical simulation of slightly entangled quantum computation // *Phys. Review Letters.* – 2003. – V. 91. – № 14.
23. *Ulyanov S.V.* System and method for control using quantum soft computing // US patent No 6,578,018B1. – 2003.
24. *Клышко Д.Н.* Основные понятия квантовой физики с операциональной точки зрения // УФН. – 1998. – Т. 168. – № 9.
25. *Khrennikov A.* Representation of the Kolmogorov model having all distinguishing features of quantum probabilistic model // *Physics Letters.* – 2003. – V. A3 16. – № 3.
26. *Ghisi F., Ulyanov S.V.* The information role of entanglement and interference in Shor quantum algorithm gate dynamics // *J. Modern Optics.* – 2000. – V. 47. – № 12.
27. *Литвинцева Л.В., Ульянов С.В.* Интеллектуальные системы управления. I. Квантовые вычисления и алгоритм самоорганизации // Изв. РАН. ТиСУ. – 2009. – № 6. – С. 69 – 97.
28. *Ulyanov S.V.* Self-organized control system // US patent No 6, 411, 944 B1. – 2002.
29. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Kurawaki I.* 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.
30. *Sieniutycz S.* Hamilton-Jacobi-Bellman framework for optimal control in multistage energy systems // *Physics Reports.* – 2000. – V. 326. – № 2.
31. *Ulyanov S.V., Yamafuji K., Hagiwara T.* et al. Computational intelligence for robust control algorithms of complex dynamic systems with minimum entropy production. Pt 1: Simulation of entropy-like dynamic behavior and Lyapunov stability // *J. Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics.* – 1999. – V.3. – № 2. – P. 82 – 98.
32. *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. – С. 71 – 126.
33. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S.* Quantum information and quantum computational intelligence: Applied quantum soft computing in AI, quantum language and programming in computer science, quantum knowledge self-organization and intelligent wise

- robust control (4th edit.). Milan: Note del Polo (Ricerca), Universita degli Studia di Milano, 2010. – V. 86.
34. *Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С.* Проектирование робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. II // Изв. РАН. ТиСУ. – 2006. – № 5. – С. 102 – 141.
35. *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. – № 4. – С. 49 – 73.
36. *Ulyanov S.V., Hagiwara T., Litvintseva L.V.* et al. Intelligent mechatronic control suspension system based on quantum soft computing // US Patent No 0024750 A1. – 2004.
37. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V.* Soft computing optimizer of intelligent control system structures // US Patent No 7,219,087 B2. – 2007.
38. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S.* Quantum swarm model of self-organization process based on quantum fuzzy inference and robust wise control design // *Proc. 7th ICAFS.* Siegen, 2006. – P. 10 – 19.
39. *Ivancevic V. G., Ivancevic T.T.* Quantum neural computation. –Tokyo: Springer – Verlag, 2009.
40. *Караткевич С.К., Литвинцева Л.В., Ульянов С.В.* и др. Оптимизатор баз знаний на основе технологии мягких вычислений // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ. № 2010612152. – 2010.
41. *Ulyanov S.V.* Method and device for performing a quantum algorithm for simulate a genetic algorithm // US Patent № 20080140749 A1. – 2008.
42. *Ulyanov S.V.* System and method for control using quantum soft computing // US Patent No 6,578,018 B1. – 2003.
43. *Ульянов С.С.* Информационные технологии проектирования баз знаний: проблемы создания и защиты интеллектуальной собственности // Программные продукты и системы. – 2005. – № 2. – С. 2 – 8.
44. *Ulyanov S.V.* Self-organization of robust intelligent controller using quantum fuzzy inference // *Proc. IEEE 2nd Intern. Conf. ISKE'2008.* Xiamen, 2008. – V.1. – P. 726 – 732.
45. *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 // *Proc. 4th Internat. Conf. ICSCCW'2007.* Antalya, Turkey, 2007. – P. 219 – 237.
46. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Hagiwara T.* 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, 2005. – V. 4. – P. 3835 – 3840.
47. *Strekalov D.V., Kim Y.-Ho, Shih Y.* Experimental study of a subsystem in an entangled two-photon state // *Physical Review A.* – 1999. – V. 60, № 4. – P. 2685 – 2688.
48. *Shih Y.* The physics of $2 \neq 1+1$ // LANL E-print arxiv: quant-ph / 0706.2097v2. – 2007.
- 44p. (доступно <http://xxx.lanl.gov>)
49. *Smith G., Yard J.* Quantum communication with zero-capacity channels // *Science.* – 2008. – V. 321. № 5897. – P. 1812 – 1815.
50. *Oppenheim J.* For quantum information, two wrongs can make a right // *Science.* – 2008. – V. 321. – № 5897. – P. 1783 – 1784.
51. *Клиин С.Я.* Квантовая информация // УФН. – 1999. – Т. 169. – № 5.
52. *Холеев А.С.* Введение в квантовую теорию информации. – М.: Наука. – 2002.
53. *Keyl M.* Fundamentals of quantum information theory // *Physical Reports.* – 2002. – V. 369. – № 5.

54. *Cerf N.J., Adami C.* Negative entropy and information in quantum mechanics // *Phys. Review Letters.* – 1997. – V. 79. – № 26.
55. *Horodecki M., Oppenheim J., Winter A.* Partial quantum information // *Nature.* 2005. V. 436. № 7051.
56. *Henderson L., Vedral V.* Classical, quantum and total correlation // *J. Phys. A: Math. Gen.* – 2001. – V. 34. – № 35.
57. *Sanctuary B.C.* Correlations in entangled states // arXiv: quant-ph/0508238v1. – 2005.
58. *Hamieh S., Kobes R., Zaraket H.* Positive-operator-valued measure optimization of classical correlations // *Phys. Review.* – 2004. – V. A70. – № 5.
59. *Hamieh S., Qi J., Siminovitch D.* et al. Extraction of classical correlations from a bipartite quantum system // *Phys. Review.* – 2003. – V. A67. – № 1.
60. *Groisman B., Popescu S., Winter A.* Quantum, classical, and total amount of correlations in quantum state // *Phys. Review.* – 2005. – V. A72. – № 3.
61. *DiVincenzo D.P., Horodecki M., Leung D.W.* et al. Locking classical correlation in quantum states // *Phys. Review Letters.* – 2004. – V. 92. – № 6.
62. *Horodecki M., Horodecki P., Horodecki R.* et al. Local versus nonlocal information in quantum-information theory: Formalism and phenomena // *Phys. Review.* – 2005. – V. A71. – № 6.
63. *Maruyama K., Brukner C., Vedral V.* Thermodynamical cost of accessing quantum information // *J. Phys. A: Math. Gen.* – 2005. – V. 38. – № 32.
64. *Christandl M., Winter A.* Uncertainty, monogamy, and locking of quantum correlations. // *IEEE Transactions on Information Theory.* – 2005. – V. 51. – № 9.
65. *Levitin L.B.* Conditional entropy and information in quantum systems // *Chaos, Solitons and Fractals.* 1999. V. 10. № 10.
66. *Olivier H., Zurek W.H.* Quantum discord: A measure of the quantumness of correlations // *Phys. Review Letters.* – 2002. – V. 88. – № 1.
67. *Zurek W.H.* Quantum discord and Maxwell's demon // *Phys. Review.* – 2003. – V. A67. – № 1.
68. *Giraldi G.A., Portugal R., Thess R.N.* Genetic algorithms and quantum computation // arXiv: cs. NE/0403003v1. – 2004.
69. *Ulyanov S.V., Rizzotto G.G., Kurawaki I.* et al. Method and hardware architecture for controlling a process or for processing data based on quantum soft computing // *PCT Patent. WO № 01/67186 A1.* – 2000.
70. *Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В.* и др. Проблемы управления релятивистскими и квантовыми динамическими системами. – М.: Наука. – 1982.
71. *Гольденблат И.И., Ульянов С.В.* Введение в теорию относительности и ее приложения к новой технике. – М.: Физматгиз. – 1979.
72. *Ulyanov S.V., Kurawaki I., Panfilov S.A.* et al. Information analysis of quantum gates for simulation of quantum algorithms on classical computers // *Proceedings of Intern. Conf. on Quantum Communication, Measurements and Computing (QCM&C'2000).* – Capri, Italy, 2000. Kluwer Acad./Plenum Publ. – 2001. – Pp. 207 – 214.
73. *Zurek W.H.* Probabilities from entanglement, Born's rule $p_i = |\psi_i|^2$ from invariance // *Phys. Review.* – 2005. – V. A71. – № 5.
74. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S.* 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. – Pp. 172 – 187.

75. *Ulyanov S.V., Takahashi K., Litvintseva L.V.* et al. Quantum soft computing via robust control: Classical efficient simulation of wise quantum control in non-linear dynamic systems based on quantum game gates // *Proceedings of 2-nd Internat. Conf. on Soft Computing, and Computing with Words in System Analysis, Decision and Control (ICSCW'2003).* – Antalya, Turkey. – 2003. – Pp. 11 – 41.
76. *Ulyanov S.V., Degli Antoni G., Yamafuji K.* 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. – Pp. 217 – 224.
77. *Ulyanov S.V., Kurawaki I., Litvintseva L.V.* et al. Applied quantum soft computing for optimization of KB structures in fuzzy controllers: Introduction // *Proceedings World Cong. on Intelligent Systems on Industrial Automation (WCIS'2000).* – Tashkent, Uzbekistan. – 2000. – Pp. 34 – 57.
78. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Kurawaki I.* 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. – Pp. 190 – 213.
79. *Ulyanov S.V., Takahashi K., Kurawaki I.* et al. Quantum soft computing: Quantum global optimization and quantum learning processes – Application in AI, informatics and intelligent control processes // *Proc. of the 7-th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics (SCI'2003).* – Florida, Orlando, USA. – 2003. – V.7. – Pp. 422 – 427.
80. *Ulyanov S.V.* Quantum soft computing in control process design: genetic algorithms and quantum neural network approaches // *Proceedings of World Automation Congress (WAC'2004): Soft computing with Industrial Applications (ISSCI'2004).* – Seville, Spain. – 2004. – V. 17. – Pp. 99 – 104.

Контрольные вопросы к Главе 1

1. Структура квантового алгоритма самоорганизации
2. Основные квантовые операторы алгоритма самоорганизации
3. Структура квантового нечеткого вывода
4. Виды квантовой корреляции
5. Моделирование робастных баз знаний в условиях непредвиденных ситуаций управления
6. Структура квантового оптимизатора баз знаний
7. Структура ИСУ с оптимизатором баз знаний на квантовых вычислениях

Глава 2. Проектирование робастного интеллектуального управления динамически неустойчивым объектом на основе квантового нечеткого вывода

2.1. Математическая модель и макет объекта 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. 2.1) с перевернутым маятником, закрепленным на оси.

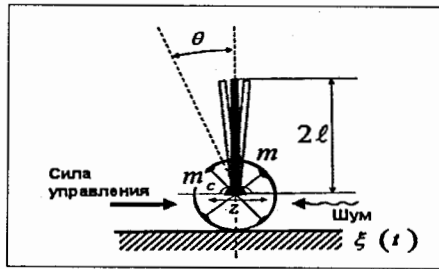


Рис. 2.1. Модель системы «Каретка – маятник»

Динамика этого ОУ описывается системой дифференциальных уравнений второго порядка (2.1), выводимых, с учетом сил трения и упругости конструкции, из баланса моментов вращения и проекций сил на горизонтальную ось Z:

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

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{u + \xi(t) + a_1 \dot{z} + a_2 z - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m} \right) - k\dot{\theta}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)} \quad (2.1)$$

Уравнения для скорости производства энтропии, следующие:

$$\dot{S}_o = \frac{k\dot{\theta}^2 + 1/2ml\dot{\theta}^3 \sin 2\theta}{l(m_c + m) \left[\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right]}; \quad \dot{S}_z = \frac{a_1}{m_c + m} \cdot \dot{z}^2; \quad \dot{S}_\xi = k_\xi \xi^2. \quad (2.1a)$$

В уравнениях (2.1) и (2.1a) z и θ – обобщенные координаты; g – ускорение свободного падения (9.8 m/sec^2), m_c – масса оси и колес, m – масса перевернутого маятника (называемого «шесть»), l – половина длины маятник, k и a_1 коэффициенты трения движения и вращения, соответственно, a_2 – коэффициент упругости конструкции, $\xi(t)$ – 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 (шесть) падает.

Задача управления системой состоит в том, чтобы, воздействуя с помощью силы управления на тележку, удерживать (стабилизировать) шесть в вертикальном положении (поддерживать угол отклонения оси шеста от вертикали вблизи 0) в условиях изменения среды функционирования.

В качестве модели управления данной системой, будем использовать следующее выражение для подсчета величины управляющего воздействия:

$$u(t) = k_p(t)e(t) + k_i(t) \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d(t)\dot{e}(t) \quad (2.2)$$

В соответствии с (2.2) будем использовать ПИД-регулятор в контуре глобальной отрицательной обратной связи.

Данный тип ОУ является типовым (Benchmark) для тестирования программного инструментария робастного интеллектуального управления и был рассмотрен ранее на основе технологии мягких вычислений.

Опишем подробнее устройство подобного макета ОУ. На рис. 2.2 и 2.3 представлен макет, используемый для тестирования технологий проектирования ИСАУ с использованием оптимизатора базы знаний (ОБЗ) и квантового оптимизатора (КО).

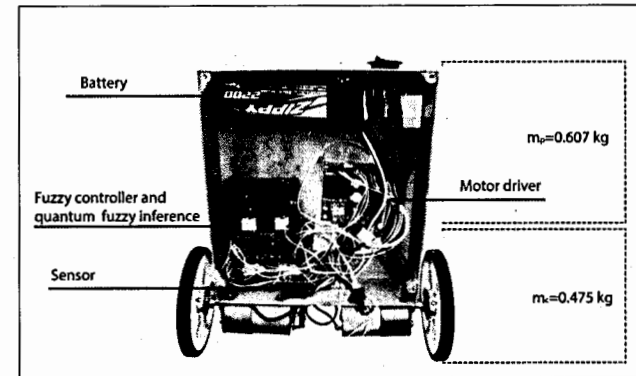


Рис. 2.2. Макет системы «Каретка - маятник»

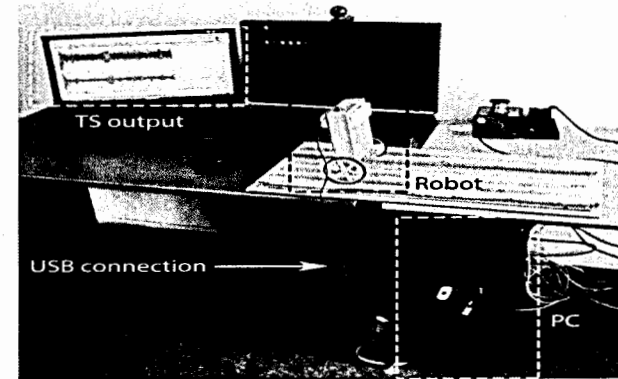


Рис. 2.3. Стенд для проведения экспериментов. TS output – представление обучающего сигнала с модели; Robot – физический макет ОУ; USB connection – кабельное удаленное соединения компьютера и макета; PC – персональный компьютер

Стенд оборудован различными покрытиями для проведения экспериментов с макетом, в том числе в непредвиденных ситуациях управления. Также на стенде имеется возможность устанавливать определенный начальный угол для запуска макета.

В качестве измерительной системы (рис. 2.2, Sensor) в макете используется плата с комбинацией датчиков – гироскопа и акселерометра – 5 DoF (пять степеней свободы) IDG200/ADXL332.

Ядром и центральным элементом системы является микроконтроллер компании Microchip® Chirkit основанный на процессоре PIC32MX320F128. Плата оборудована USB разъемом, для передачи данных с процессора на компьютер. Интерфейс USB используется при проведении экспериментов для передачи и приема данных (угла отклонения и величины управляющего воздействия), а также для удаленной настройки, речь о которой пойдет ниже. Подключение датчиков осуществляется с использованием аналоговых входов микроконтроллера.

Базовые функции программ макета представлены на рис. 2.4, обобщенно их можно записать в псевдокод:

- измерение;
- фильтрация;
- управление;
- подсчет времени (задержка).

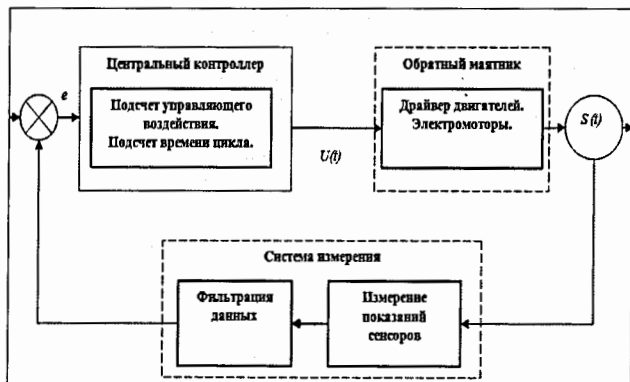


Рис. 2.4. Алгоритм программы микроконтроллера

Алгоритм работы макета системы, представленный на рис. 2.4, является частным примером САУ с обратной связью.

2.2. Проектирование КНВ на основе программного инструментария «Квантовый оптимизатор»

Создания системы управления на основе КНВ осуществляется с использованием разработанного программного инструментария «Квантовый оптимизатор».

Рабочее окно этого продукта представлено на рис. 2.5.

Примечание 17. Снизу на рис. 2.5 изображена матрица временной корреляции для формирования запутанного состояния; сверху изображена гистограмма входящего сигнала пропорционального коэффициента.

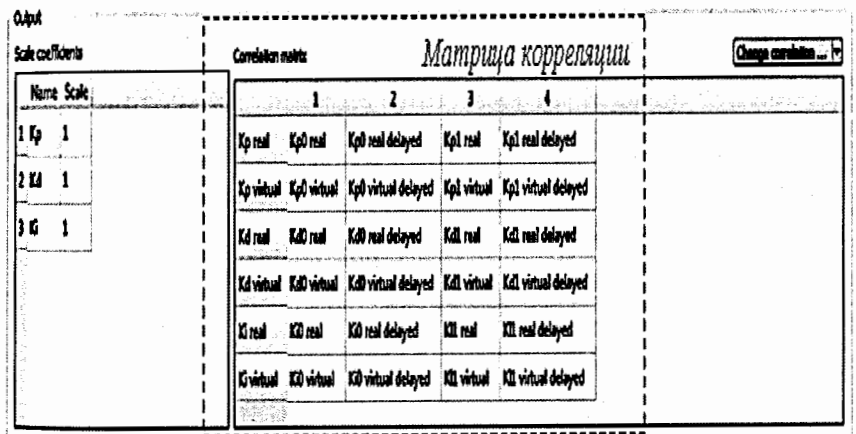
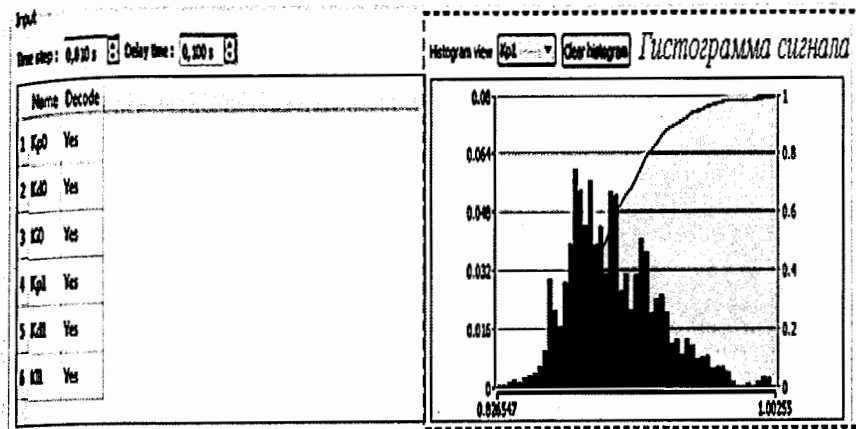


Рис. 2.5. Рабочее окно квантового оптимизатора

Технология применения КНВ позволяет объединять в единую систему управления несколько БЗ, и, таким образом, позволяя нечетким нейронным сетям работать параллельно. Рассмотрим возможность применения КНВ для объединения Баз Знаний, полученных на основе обучающего сигнала с физического объекта (ГА-ПИД регулятор) и верифицированной математической модели [2].

В таком контексте возможно сформировать три типа квантового НР на основе:

- двух БЗ с модели (FC1 и FC2 [2]);
- БЗ с модели и БЗ с макета (FC1 и FC3 [2]);
- двух БЗ с макета (FC3 и FC4 [2]).

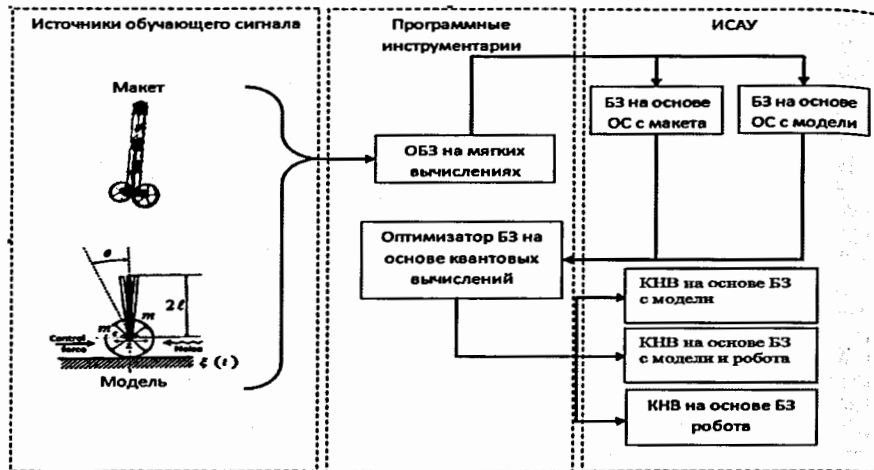


Рис. 2.6. Технология применения КНВ для проектирования робастных БЗ

Проведенные исследования показали, что наилучшим качеством управления обладают КР на основе различных информационных ресурсов [3]. В дальнейшем, для проектирования КНВ мы будем использовать БЗ 1 и БЗ 2 (рис. 2.7). Сравнение используемых БЗ приведено в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Сравнение БЗ

База №	Количество правил	Кол-во функций принадлежности	Способ оптимизации
БЗ 1			
Модель (FC1)	245	8x6x6	Моделирование
БЗ 2			
Макет Q-S	FC1 x FC4	-	Аппроксимация ОС (ГА2)
Q-T	FC1 x FC4	-	Моделирование
Q-ST	FC1 x FC4	-	Моделирование

Перед тем как приступить к созданию квантового нечеткого регулятора (КНВ), необходимо получить гистограммы распределения выходных сигналов (коэффициентов усиления) нечетких регуляторов (рис. 2.5). Для этого проводится серия экспериментов и моделирование, в типовой ситуации управления. Снимаются выходные сигналы нечетких регуляторов. Используя полученные значения коэффициентов усиления при работе модели и макета, формируется массив данных для построения гистограмм коэффициентов усиления ПИД регуляторов (рис. 2.8). Построение гистограмм происходит автоматически при загрузке данных в квантовый оптимизатор. В дальнейшем эти гистограммы используются в алгоритме КНВ для формирования виртуальных и смешанных состояний.

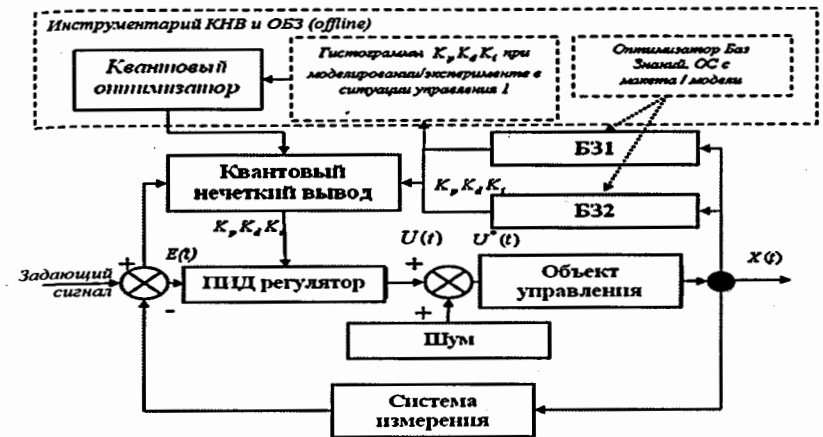


Рис. 2.7. Структура квантового нечеткого регулятора

Гистограммы коэффициентов усиления, полученные экспериментально используются в формировании КНВ для робота (в физическом эксперименте), гистограмм коэффициентов усиления, полученных с использованием математической модели, применяются в формировании КНВ для моделирования робастного интеллектуального управления роботом.

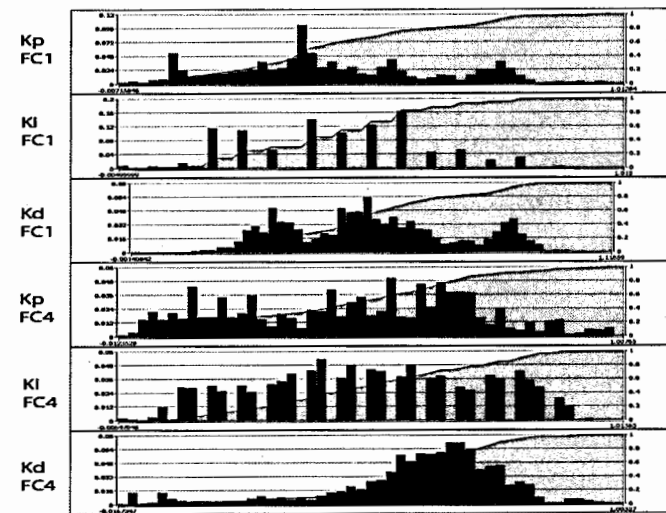


Рис. 2.8. Гистограммы выходных сигналов нечетких регуляторов

После загрузки данных, выбирается вид квантовой корреляции между коэффициентами усиления. Формирование запутанных состояний осуществляется на основе выбранной корреляционной матрицы, которая устанавливается в рабочем окне оптимизатора (рис. 2.5). В квантовом оптимизаторе используются корреляции трех

видов: пространственная, пространственно – временная и временная. На следующем шаге, устанавливаются соответствующие максимальные и минимальные значения для входных и выходных сигналов КНВ в специальном окне программы (рис. 2.9).

Заключительный шаг создания КНВ заключается в настройке коэффициентов нормировки.

В дальнейшем рассмотрим три возможных варианта настройки этих коэффициентов, используя:

- математическую модель;
- удаленные соединения;
- дистанционное соединение с объектом управления в экстремальной ситуации.

Далее рассмотрим серию экспериментов с роботом, представленным на рис. 2.3 и математической моделью.

В результате проектирования выходной сигнал из блока КНВ применяется для управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора в случае моделирования математической модели, а для робота в физическом эксперименте применяется экспортируемый файл с расширением «*.h».

Connection Setup		Normalization		Generalization		Signal	
Input Normalization							
Name	Scale	Offset	Signal Max.	Signal Min.	Force clipping		
1 Kp0	0.591716	8.79	10.48	8.79	No		
2 Kd0	0.467289	14.4	16.54	14.4	No		
3 Ki0	33.3333	0.33	0.36	0.33	No		
4 Kp1	0.421941	11.36	13.73	11.36	No		
5 Kd1	0.302115	14.36	17.67	14.36	No		
6 KI	16.6667	0.31	0.37	0.31	No		
<i>Normalization equation is Internal=(External-Offset)*Scale</i>							
Output Denormalization							
Name	Scale	Offset	Signal Max.	Signal Min.	Force clipping		
1 Kp	0.199601	8.79	13.8	8.79	No		
2 Kd	0.232558	14.4	18.7	14.4	No		
3 Ki	4.99999	0.3	0.5	0.3	No		

Рис. 2.9. Окно программы КНВ. Нормализация и денормализация сигнала с макета

2.3. Моделирование и эксперимент (КНВ)

Перейдем к практическому применению разработанной модели КНВ для формирования процессов управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора. Для этого рассмотрим применение разработанной модели КНВ для формирования процессов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора и 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 2.2 представлены параметры математической модели для С1 и С2.

Таблица 2.2
Ситуации управления и параметры математических моделей

	Типовая ситуация (С1)	Непредвиденная (С2)
Начальный угол	0 град.	0 град.
Начальная скорость	1 град./с	1 град./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 + гауссовский шум 12%	3.63 + гауссовский шум 12%
Сила упругости	5.54 Н/м	5.54 Н/м
Шум в системе управления	Равномерный [-2.12÷ 2.12], интенсивность 0.48	Равномерный [-2.12÷ 2.12], интенсивность 0.48
Шум в системе измерения	Амплитуда 0.22, гауссовский шум, интенсивность 0.01	Амплитуда 0.32, гауссовский шум, интенсивность 0.01
Задержка управляющего воздействия	0.01 с	0.04 с

На рис. 2.10 представлена блок-схема структуры системы моделирования.

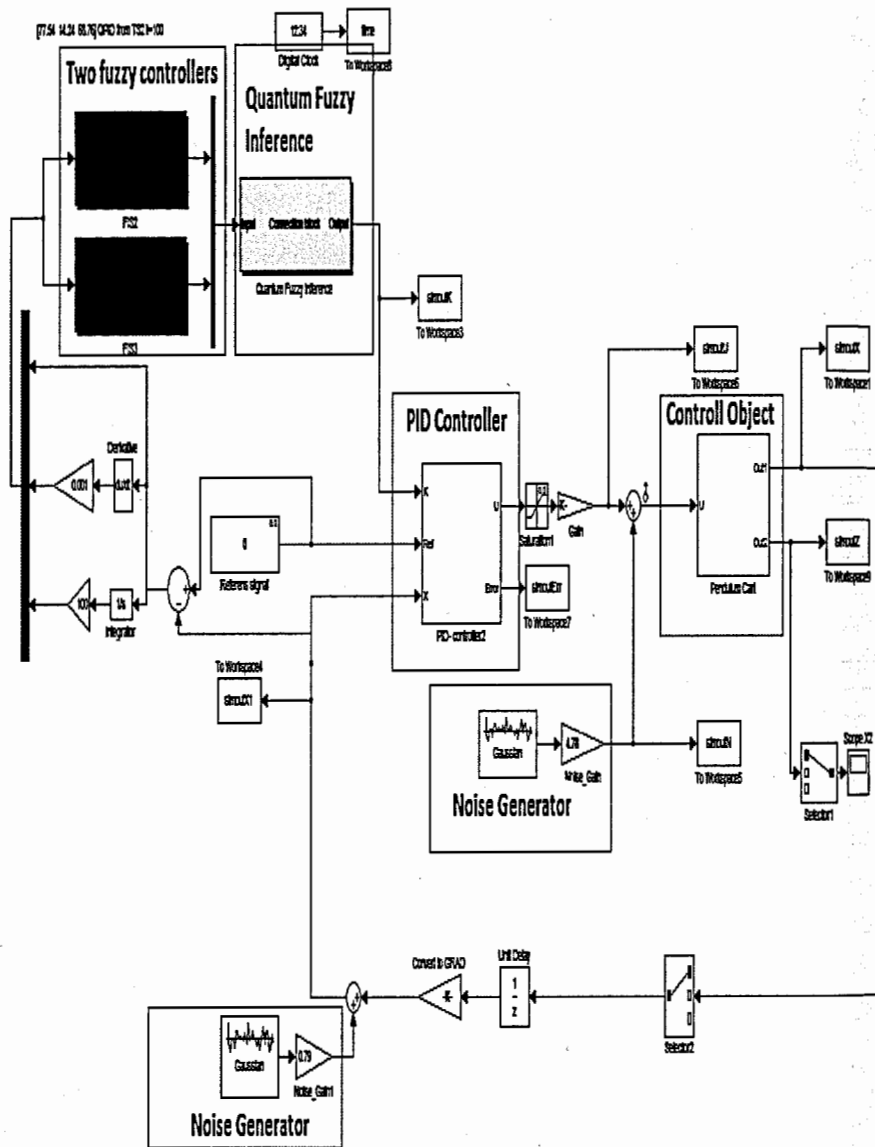


Рис. 2.10. Структура системы моделирования в среде MatLab/Simulink.

На блок-схеме обозначены: два нечетких регулятора, блок КНВ, ПИД – регулятор, объект управления, генераторы шумов.

Результаты моделирования регуляторов в типовой ситуации управления проиллюстрированы на рис. 2.11 – 2.12.

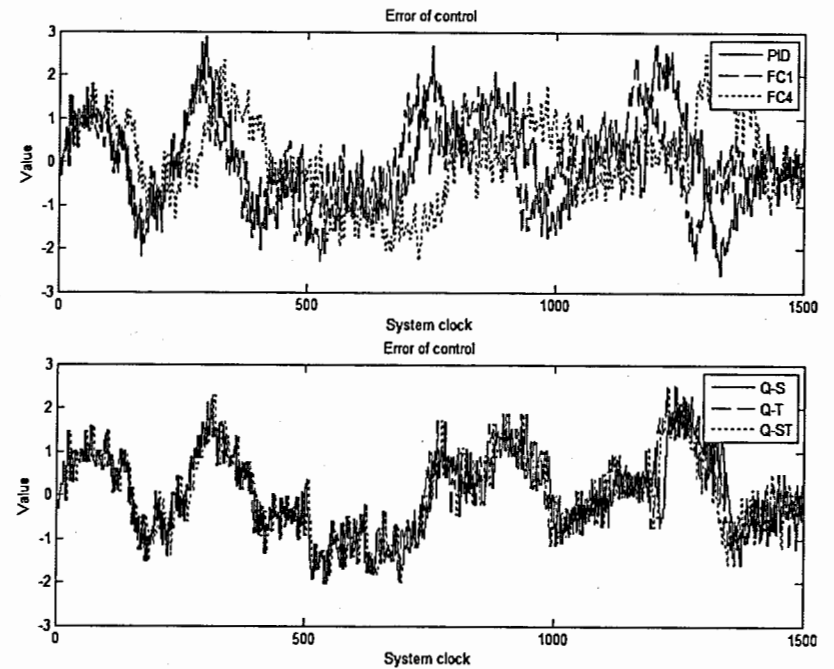


Рис. 2.11. Угол отклонения у математической модели. Моделирование типовой ситуации (C1)

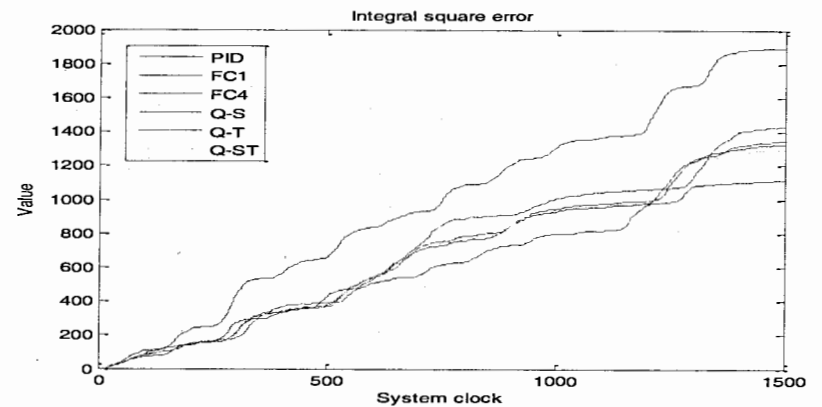


Рис. 2.12. Интеграл квадратичной ошибки. Моделирование типовой ситуации управления (C1)

Рассмотрим связь между входными и выходными значениями КНВ на примере пропорционального коэффициента усиления. На рис. 2.13 представлены входные значения КНВ (коэффициенты усиления FC1 и FC4) и выходное значение пропорционального коэффициента КНВ с пространственной корреляцией.

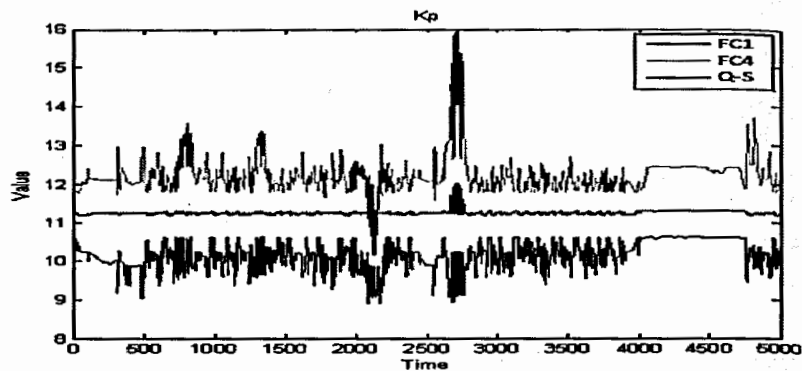


Рис. 2.13. Коэффициент усиления Кп. Входные и выходные значения КНВ. Моделирование типовой ситуации управления

На рисунках 2.14 и 2.15 представлены фазовые портреты динамики моделируемых систем.

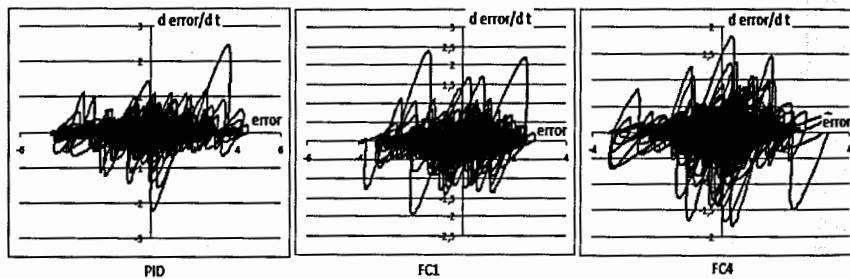


Рис. 2.14. Фазовые портреты динамики моделируемой системы в типовой ситуации управления с регулятором PID и нечеткими регуляторами FC1 и FC4

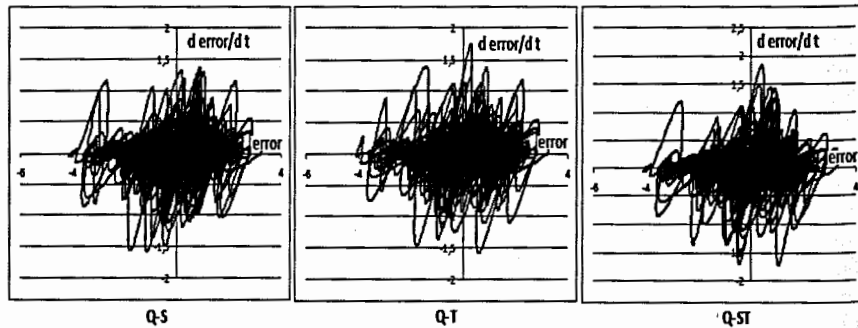


Рис. 2.15. Фазовые портреты динамики системы в той же ситуации с контроллерами Q-S, Q-T и Q-ST

Далее на рис. 2.16 представлены результаты моделирования в непредвиденной ситуации управления, на рис. 2.17 представлена сравнительная диаграмма интеграла квадратичной ошибки моделирования для типовых ситуаций.

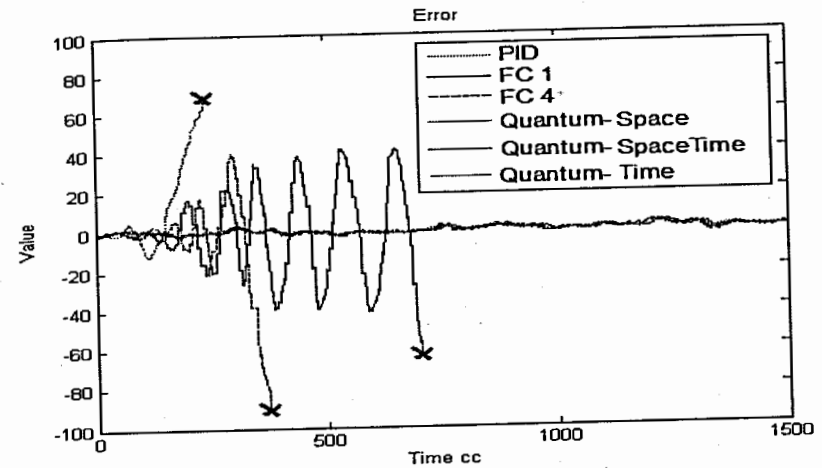


Рис. 2.16 Угол отклонения математической модели. Моделирование непредвиденной ситуации управления.

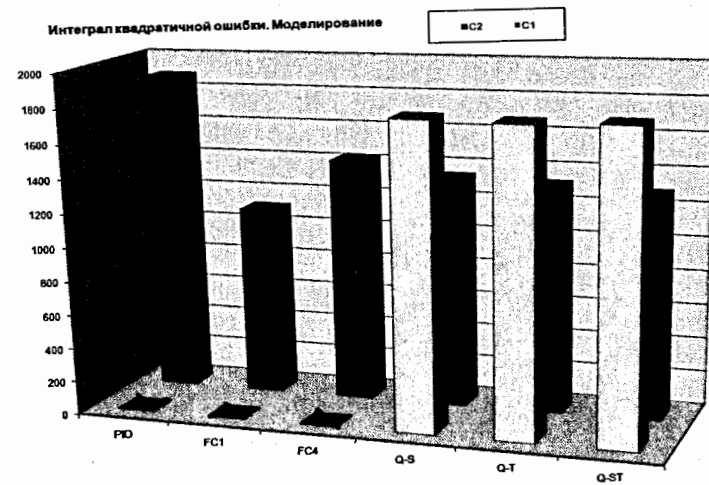
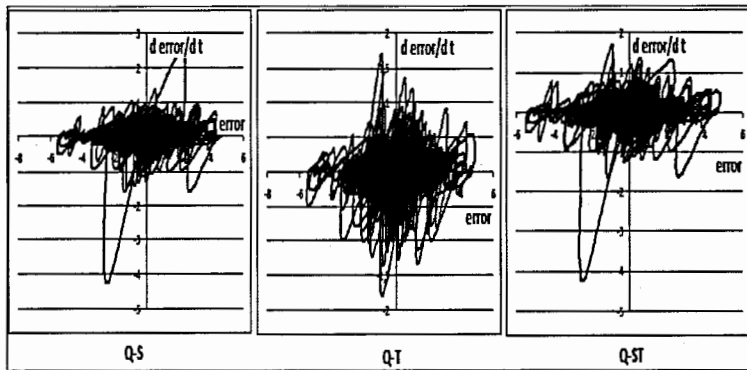


Рис. 2.17. Интеграл квадратичной ошибки. Непредвиденная и типовая ситуации управления. Моделирование. FC1-FC4 – нечеткие регуляторы, сокращения Q-quantum, S(Space) – пространственная, T(Time) – временная, ST(SpaceTime) – пространственно временная корреляция



2.18. Фазовые портреты модели с КР в непредвиженной ситуации

На рис. 2.17 можно заметить, что значение интегральной ошибки КНР располагается между контроллерами, образовавшими КНВ. Фазовые портреты результатов моделирования систем с КР в непредвиженной ситуации представлены на рис 2.18.

Рассмотрим результаты эксперимента в типичной ситуации управления. На рис. 2.19 – 2.22 представлены результаты экспериментов в типичной ситуации управления для различных регуляторов.

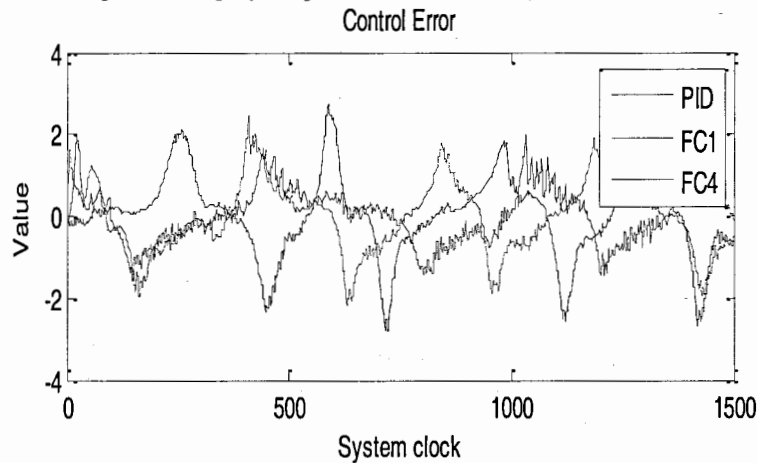


Рис. 2.19. Угол отклонения макета. Эксперимент в типовой ситуации управления (PID, FC1, FC4)

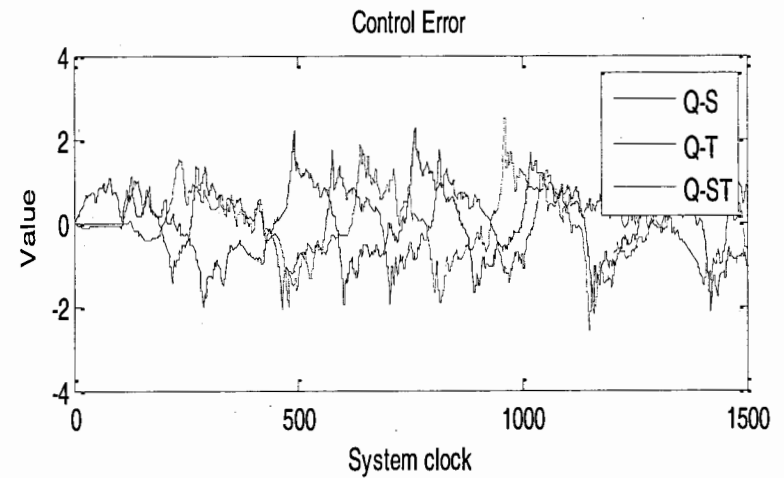


Рис. 2.20. Угол отклонения макета. Типовая ситуация управления. Эксперимент (Q-S, Q-T, Q-ST)

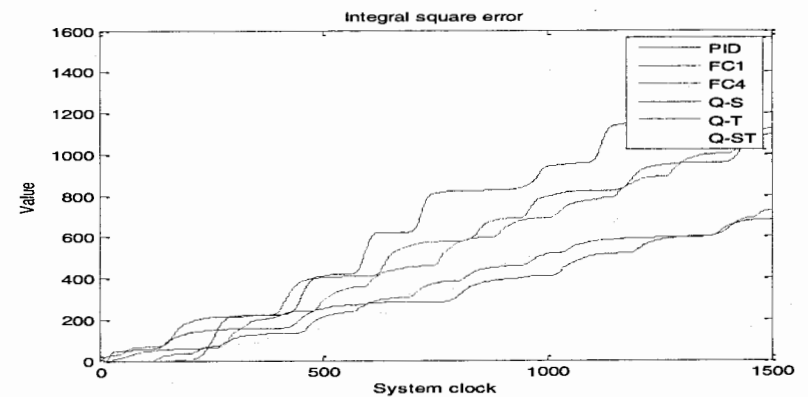


Рис. 2.21. Интеграл квадратичной ошибки. Эксперимент в типовой ситуации управления

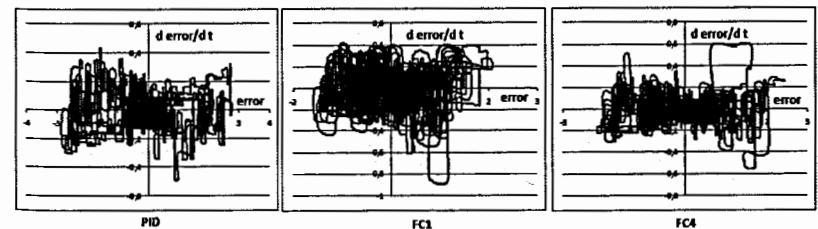


Рис. 2.22(a)

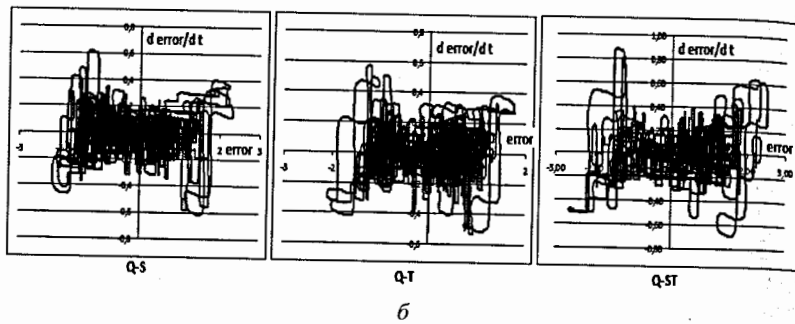


Рис. 2.22(а,б). Фазовые портреты динамики физической системы в типовой ситуации управления

Рассмотрим результаты эксперимента в непредвиденной ситуации управления (С2). На рис. 2.23 – 2.26 представлены результаты экспериментов в непредвиденной ситуации управления.

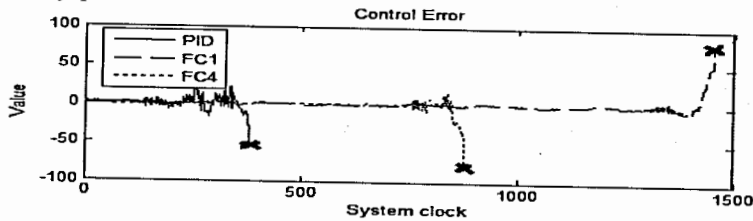


Рис. 2.23. Угол отклонения макета в непредвиденной ситуации управления. Экспериментально показано, что система не справилась с управлением

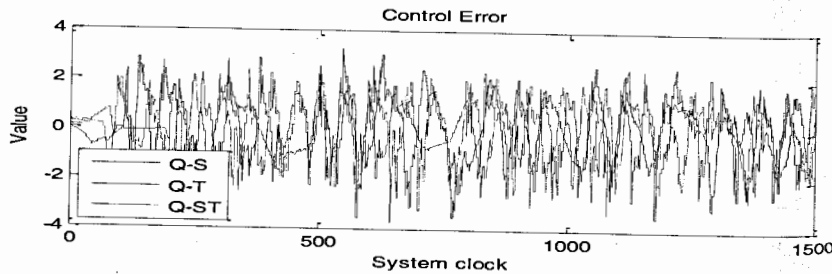


Рис. 2.24. Угол устойчивого отклонения макета в тех же условиях управления. Эксперимент

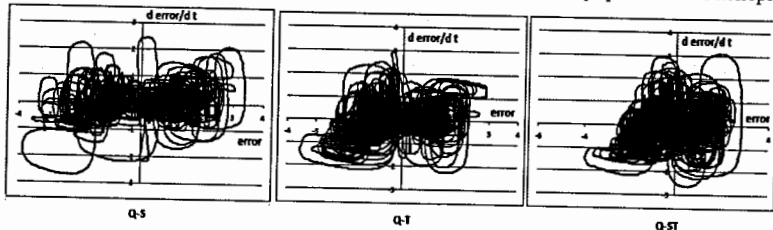


Рис. 2.25. Фазовые портреты систем с КР в непредвиденной ситуации управления

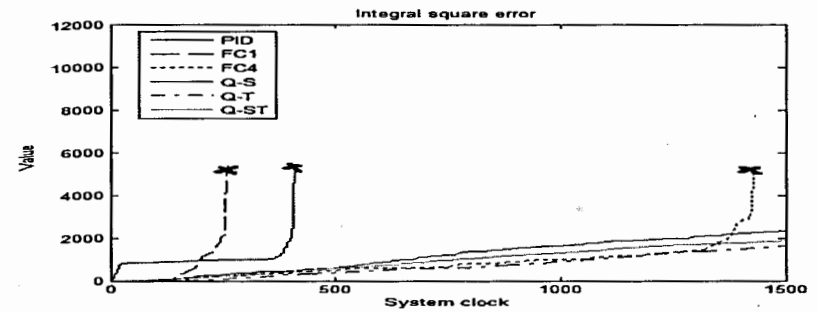


Рис. 2.26. Интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления. Эксперимент

Оценка 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 энергопотребление [6-16]. Разработанная методология объединения стратегий управления позволяет эффективно справляться с задачами управления даже в экстремальных условиях, в которых с задачей управления не справляются НР лежащие в основе КНВ. Важно отметить, что система управления на основе КНВ наследует лучшие характеристики качества управления от БЗ нечетких регуляторов, добавляя способность к самоорганизации.

2.4. Дистанционная настройка квантового нечеткого вывода

Возможность дистанционного подключения ОУ к стационарной вычислительной системы открывает возможность удаленной настройки, формированию и самоорганизации БЗ НР. Возможность подключения и удаленной настройки БЗ НР рассматривалась в работе [3]. Рассмотрим аналогичную возможность дистанционной настройки регулятора на основе КНВ.

В качестве настраиваемых параметров выступают шкалирующие коэффициенты, используемые на заключительном шаге формирования коэффициентов усиления ПИД-регулятора (рис 2.27).

Для настройки коэффициентов используется ГА, функция пригодности которого основана на оценки ошибки управления и в нашем случае имеет следующий вид:

$$f(x_r) = \frac{1}{1 + \int_0^t e^2 dt}, \quad (2.3)$$

где e – величина отклонения от задающего сигнала, t – диапазон интегрирования равен времени проверки одного решения. В Таблице 2.3 представлены параметры генетического алгоритма.

Параметры ГА для дистанционной настройки

Таблица 2.3

Параметры	Значения
Количество поколений	10
Размер популяции	20
Коэффициент скрещивания	0,64
Коэффициент мутации	0,2
Время проверки одного решения	3 с

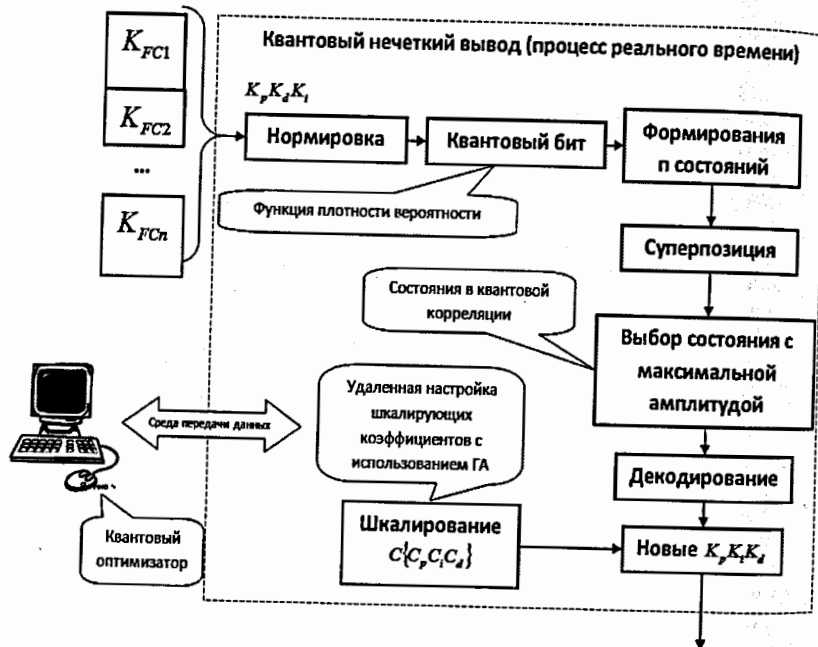


Рис. 2.27. Алгоритм дистанционной настройки квантового нечеткого вывода

Реализация физической среды соединения предполагает использовать дополнительное оборудование для приема-передачи данных, например, радиоканал Bluetooth, WF или подключение по кабелю, например, USB. Предполагается обмен информацией между ОУ и квантовым оптимизатором, для формирования квантового регулятора. Профиль соединения использует последовательный порт. Скорость передачи в нашем случае составлял 112200 бит/с.

К примеру, в процессе функционирования по COM-порту передаются числа с плавающей точкой в символьном виде. Система управления считывает показания датчиков и отправляет их на компьютер для последующей обработки. Приняв входные значения, ГА оценивает предыдущее решение ($C\{C_p, C_i, C_d\}$) на рис. 2.27) и осуществляет

квантовый нечеткий вывод для проверки следующего решения. Результат нечеткого вывода отправляется на удаленное устройство. После этого, система управления, обработав входные значения, вырабатывает управляющее воздействие.

Подключение к КО осуществляется через разработанный для этой цели плагин. Перед установкой соединения в окне КО следует выбрать номер COM-порта, скорости соединения, время проверки одного решения (количество тактов системы для проверки решения) и соответствующие БЗ НР.

Прежде чем приступить к установке соединения между оптимизатором и системой управления необходимо установить физические ограничения взаимодействующих устройств, т. е. определить максимальные и минимальные временные границы одного такта системы управления с учетом приема, передачи и обработки сообщений.

Рассмотрим подробнее процесс настройки системы (см. рис. 2.28).



Рис. 2.28. Алгоритм работы удаленной настройки

Синхронизация КО и системы управления осуществляется для удаленного устройства (макета). С этой целью разработана специальная программа (прошивка), реализующая алгоритм, представленный на рис. 2.28.

В результате проектирования выходной сигнал из блока КНВ применяется для изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора, а для макета системы, на выходе мы получаем файл с расширением «*.с».

2.5. Эксперимент с дистанционно настроенными ИСАУ

Сравним ПИД-регулятор, нечетких регуляторов FC1 и FC4, и КНВ на основе разных корреляций. Отметим, что регуляторы ПИД, FC1 и FC4 были дополнительно настроены на реальном объекте управления (макете) с использованием плагина подключения ОУ к ОБЗ. В таблице 2.4 приведены варианты для сравнения БЗ используемых для формирования КНВ.

Таблица 2.4

Описание регуляторов

Регулятор	Описание
PID	Классический ПИД-регулятор
FC1	Контроллер, разработанный на основе ОС с модели и оптимизированный с помощью модели
FC4	Контроллер, разработанный на основе ОС с робота и оптимизированный при помощи удаленного соединения
Q-S	Квантовый нечеткий регулятор, основанный на базах FC1 и FC4 с пространственной корреляцией и оптимизированный при помощи удаленного соединения
Q-T	Квантовый нечеткий регулятор, основанный на базах FC1 и FC4 с временной корреляцией и оптимизированный при помощи удаленного соединения
Q-ST	Квантовый нечеткий регулятор, основанный на базах FC1 и FC4 с пространственно-временной корреляцией и оптимизированный при помощи удаленного соединения

Рассмотрим результаты эксперимента, проведенного с использованием регуляторов, дополнительно настроенных с использованием дистанционного подключения (рис. 2.29 – 2.32):

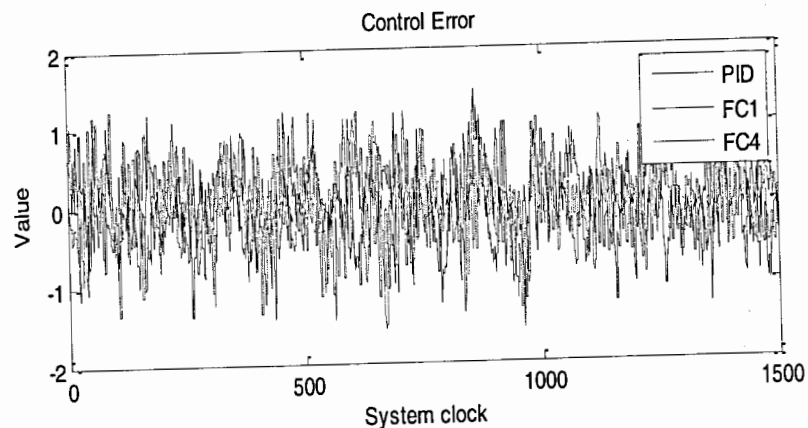


Рис. 2.29. Угол отклонения макета. Типовая ситуация управления. Эксперимент

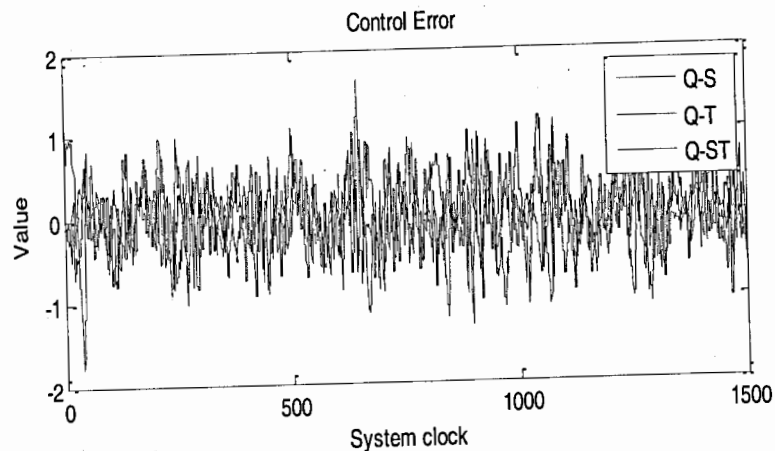


Рис. 2.30. Угол отклонения макета. Типовая ситуация управления. Эксперимент

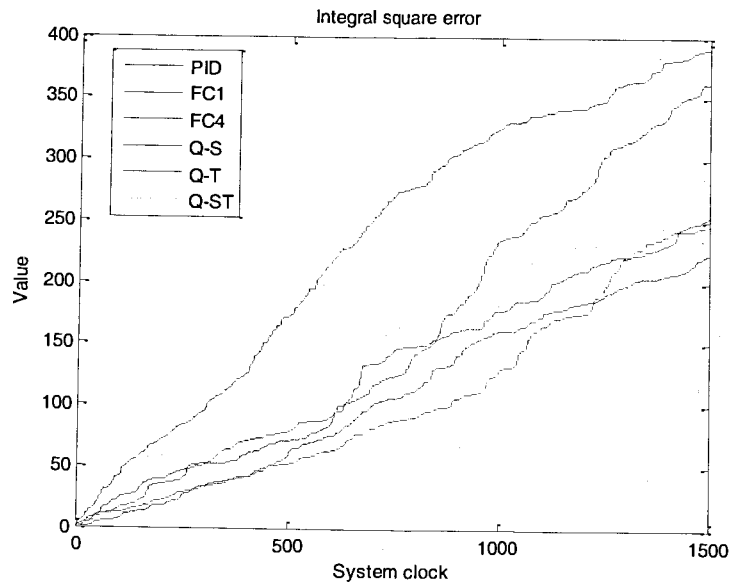


Рис. 2.31. Интеграл квадратичной ошибки. Типовая ситуация управления Эксперимент

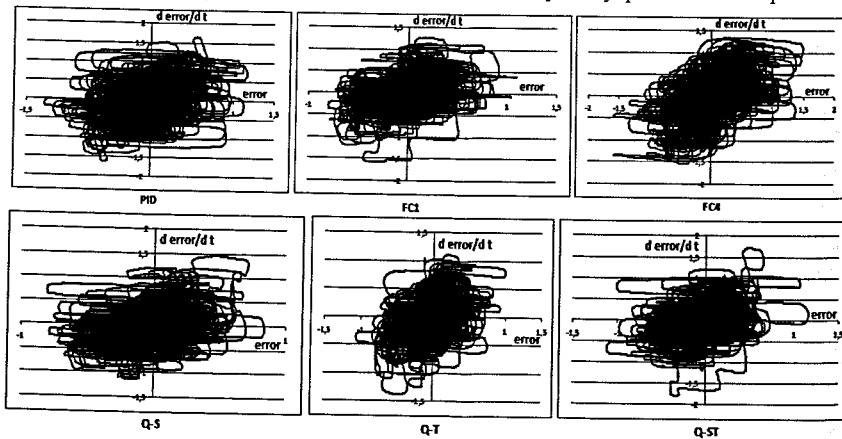


Рис. 2.32. Фазовые портреты физических систем в типовой ситуации управления

Из рисунков 2.29 и 2.32 можно заметить, что дополнительная настройка БЗ с использованием удаленного соединения ОУ с ОБЗ, позволяет повысить качество управления регуляторов в типовой ситуации управления.

Рассмотрим результаты эксперимента в непредвиденной ситуации управления:

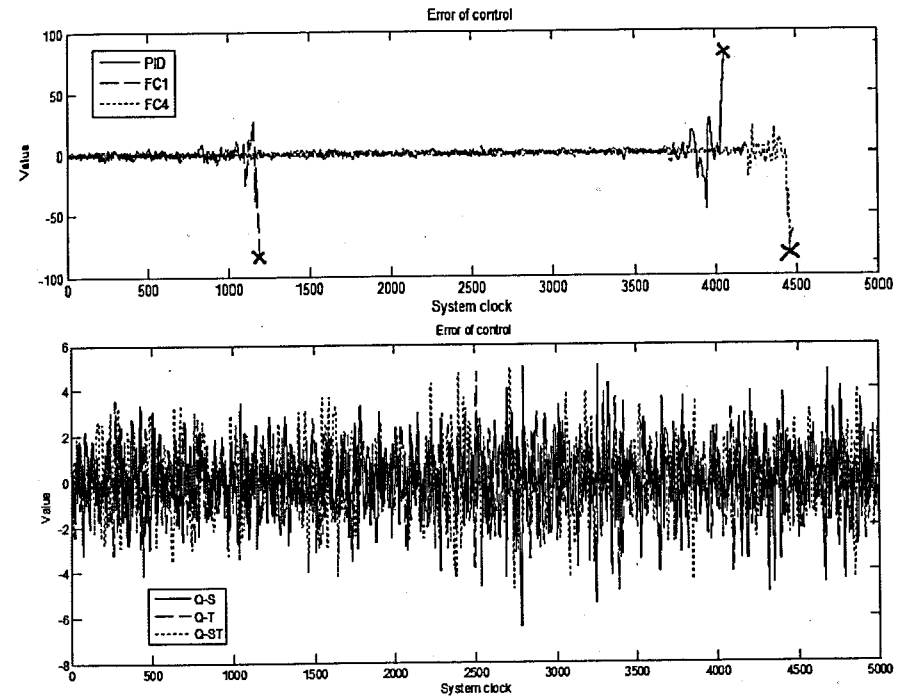


Рис. 2.33. Угол отклонения макета. Непредвиденная ситуация управления. Эксперимент

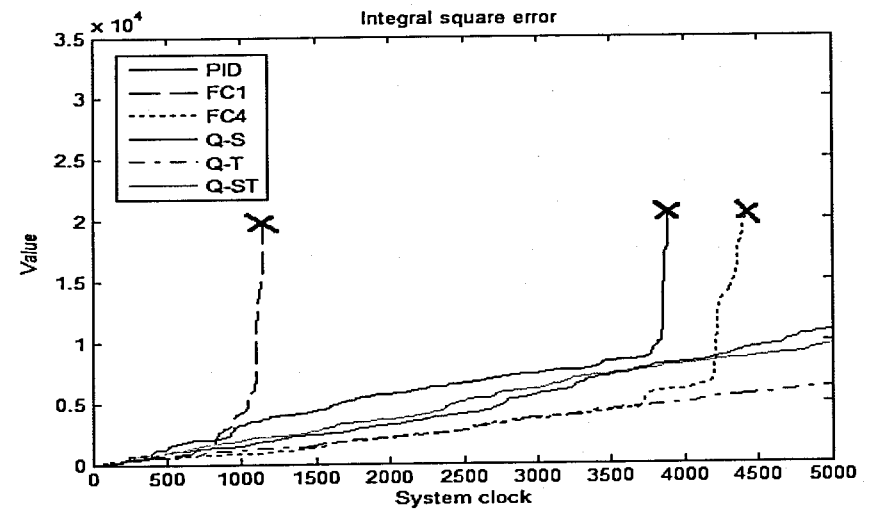


Рис. 2.34. Интеграл квадратичной ошибки. Непредвиденная ситуации управления. Эксперимент

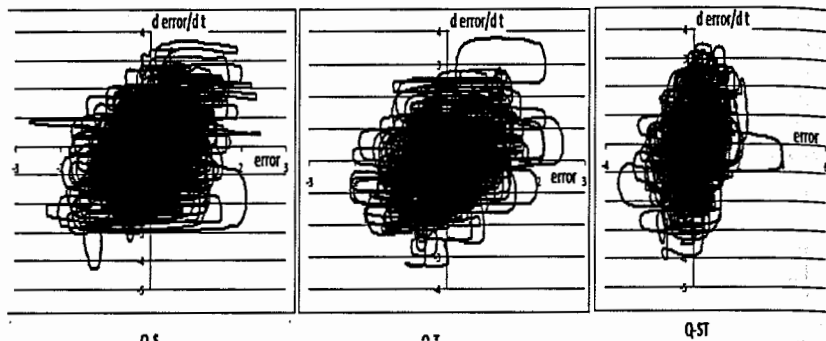


Рис. 2.35. Фазовые портреты физических систем с КР в непредвиденной ситуации управления

Меньший уровень интеграла квадратичной ошибки свидетельствует о лучшей работе регулятора. Из результатов на рис. 2.33 – 2.34 видно, что в типовой и непредвиденной ситуации управления лучше всех справился КНР основанный на временной корреляции и оптимизированный на основе удаленного соединения. ПИД-регулятор, FC1 и FC4 не справились с непредвиденной ситуацией управления.

2.6. Анализ результатов эксперимента

Для оценки качества процесса управления используются показатели переходного процесса (рис. 2.36). К таким показателям относятся: сложность управления, устойчивость, величина перерегулирования.

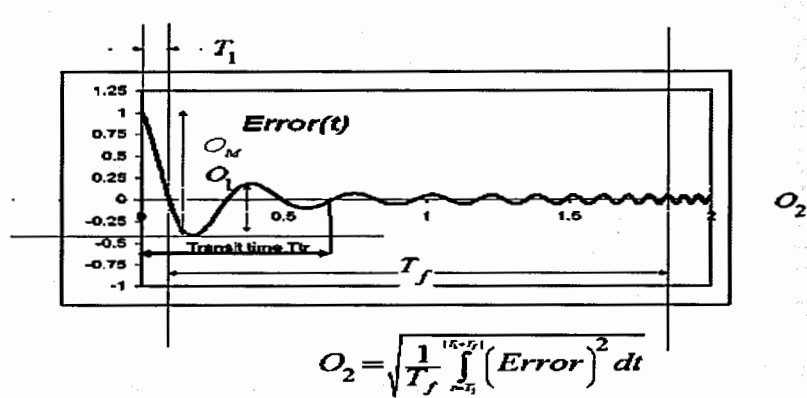


Рис. 2.36. Показатели качества управления

Перерегулирование характеризует колебательное свойство переходного процесса и рассчитывается согласно (2.4).

$$a_1 = 1 - \frac{O_1}{O_m}; O_m(const) \geq O_1; \quad (2.4)$$

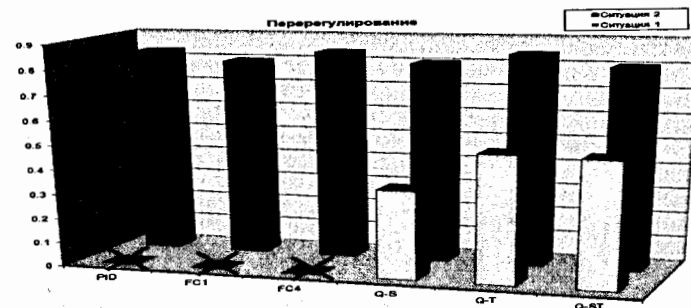


Рис. 2.37. Перерегулирование систем управления в типовой и непредвиденной ситуации. Эксперимент

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.

Устойчивость переходного процесса регуляторов (рис. 2.36) рассчитывается как:

$$o_2 = 1 - \frac{O_2}{O_m}; O_m(const) \geq O_2; \quad (2.5)$$

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.

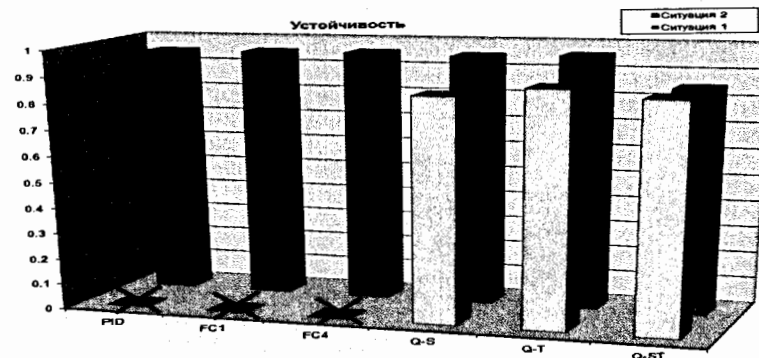


Рис. 2.38. Устойчивость систем управления в типовой ситуации. Эксперимент

Более высокий уровень устойчивости свидетельствует о более лучшем уровне 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 случаи реализации сложного управления, износ оборудования и затраты энергии будут велики.

Сложность управления САУ (рис. 2.36) рассчитывается в виде:

$$P \equiv 1 - \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \left(\frac{dK}{dt}\right)^2 dt}}{A}; \quad A = \text{const} \quad (2.6)$$

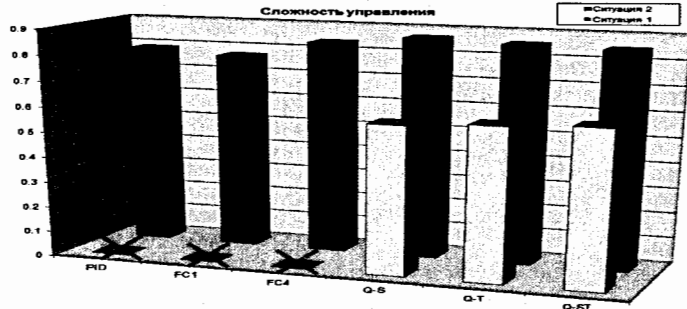


Рис. 2.39. Сложность управления в типовой и непредвиденной ситуации. Эксперимент

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

2.7. Беспроводная настройка КНВ

Для осуществления беспроводной настройки КНВ данного динамически неустойчивого объекта использован модуль дистанционной связи (приема/передачи данных), внешний вид которого показан на рис. 2.40.

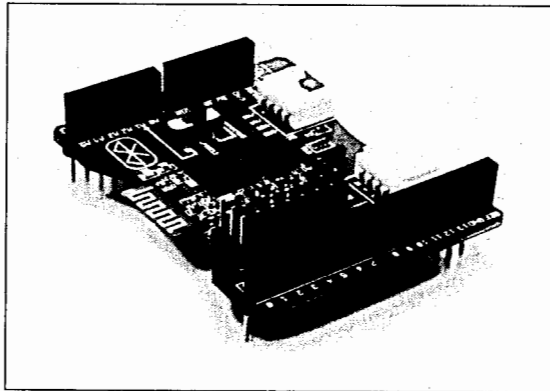


Рис. 2.40. Модуль радиосвязи Bluetooth

Временная задержка приема/передачи данных при проведении рассматриваемых экспериментальных исследований составляла 40 мс, что для типовых систем

управления, рассмотренных ранее, является критичным параметром. Исходя из этого, ситуацию управления с такой величиной задержки можно считать экстремальной. Для решения задачи управления был изменен закон формирования управляющего воздействия (2.2) на закон вида (2.7).

Задающий сигнал системы стабилизации в этом случае зависит от интегральной ошибки, это позволит системе функционировать в ситуации с критической временной задержкой в системе:

$$\text{ref} = -a \cdot \int \text{edt}, \quad (2.7)$$

где, a – экспериментально подобранный параметр равный 0.25.

Важно отметить, что дополнительно на величину задающего сигнала было наложено ограничение, и ее значение не должно выходить за пределы диапазона $[-16 \div 16]$, а введение закона управления и новой ситуации управления требует создания новых БЗ на основе информационных технологий проектирования, рассмотренных ранее.

2.8. Моделирование и эксперимент

Сравним результаты, полученные с использованием классического ПИД-регулятора, ИР с использованием дистанционной настройки и квантовых регуляторов с различными вариантами корреляций. Угол отклонения макета, и рост интегральной квадратичной ошибки представлены на рис. 2.41 – 2.42.

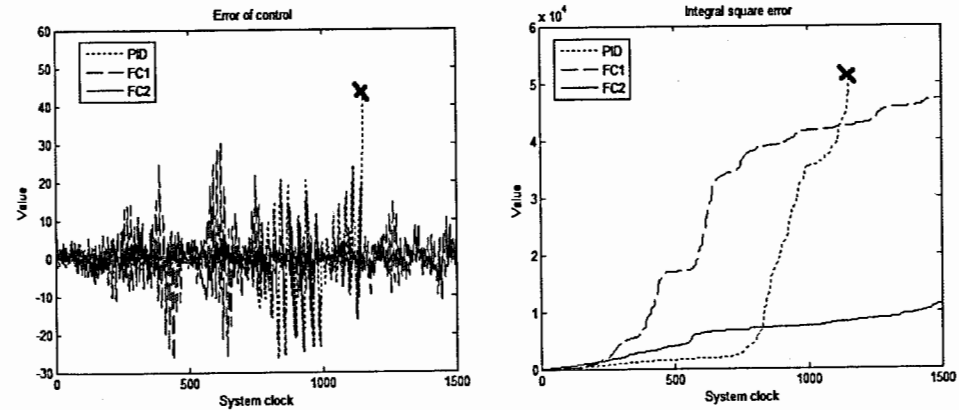


Рис. 2.41. Угол отклонения и интеграл квадратичной ошибки

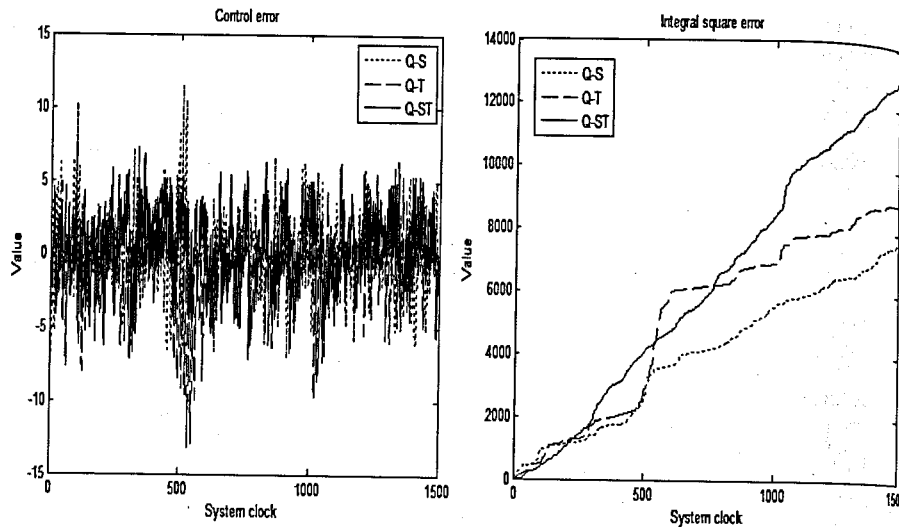


Рис. 2.42. Угол отклонения и интеграл квадратичной ошибки

Из представленных рисунков видно, что НР на основе ОС с макета справился с задачей управления в экстремальной ситуации с использованием дистанционной настройки лучше остальных регуляторов. Отметим также что ПИД – регулятор с постоянными коэффициентами не справился с задачей управления (см. рис.2.41). Подбор коэффициентов ПИД – регулятора для данной ситуации оказался крайне трудоемким процессом и, как демонстрируют результаты эксперимента, цель управления не достигается.

Квантовый регулятор на основе пространственной корреляции (Q-S рис. 2.42), настроенный с использованием дистанционного соединения, справился с задачей управления эффективнее остальных регуляторов.

2.9. Общие выводы

Современные методы теории управления обладают методами для создания систем управления для хорошо описанных и хорошо формализованных ситуаций управления. Однако, как показывает практика, системы управления часто сталкиваются с непредвиденными ситуациями управления. Представленная технология квантового нечеткого вывода, не разрушая нижний исполнительский уровень управления, обеспечивает систему дополнительным свойством робастности, только за счет использования программно - алгоритмического обеспечения.

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.

Продемонстрировано существование непредвиденных ситуации управления, в которых НР не обладают требуемым качеством робастности, а квантовый нечеткий

регулятор (на основе этих же НР) справляется с задачей управления на требуемом уровне качества управления, что подтверждает реализацию принципа самоорганизации БЗ за счет использования алгоритма КНВ.

В работе продемонстрировано применение квантовых вычислений на классическом процессоре в режиме реального времени. Результаты моделирования и экспериментов подтверждают полезность использования скрытой квантовой информации, извлекаемой из нелокальных корреляций классических состояний коэффициентов усиления, в процессах управления.

Таким образом, показана эффективность и необходимость применения квантовых вычислений и алгоритмов управления не только для квантовых систем, но и для классических ОУ.

Список литературы к Главе 2

1. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений, М.: ВНИИгеосистем, 2011.
2. 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: электрон. науч. журнал. – Дубна, 2013 – № 1 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive>. – Идентификационный номер: 0421100111\0022.
3. Ульянов С.В., Решетников А.Г., Керимов Т.А., Дистанционная настройка базы знаний для интеллектуального управления автономным роботом на основе оптимизатора баз знаний Ч 1: технологии мягких вычислений, Эл № ФС77-21141 от 12.09.2012г. <http://www.sanse.ru/archive/27> Выпуск №1, 2013
4. Ульянов С.В., Решетников А.Г., Шоланов К.С., Робастное интеллектуальное управление физическим динамически неустойчивым объектом «каретка - перевернутый маятник». Ч.2: Технологии квантовых вычислений, Эл № ФС77-21141 от 12.09.2012г. <http://www.sanse.ru/archive/27> Выпуск №1, 2013
5. Ульянов С.В., Николаева А.В., Проектирование интеллектуальной системы управления роботом манипулятором. Ч.3: Моделирование и физический эксперимент на основе технологии квантовых вычислений, Эл № ФС77-21141 от 12.09.2012г. <http://www.sanse.ru/archive/27> Выпуск №1, 2013
6. Litvintseva L. V., Ulyanov S.S., Takahashi K. et al. Intelligent robust control design based on new types of computation. Pt 1. New soft computing technology of KB-design of smart control simulation for non-linear dynamic system. – Milan: Note del Polo (Ricerca), Universita degli Studi di Milano. – 2002. – Vol.60.
7. Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений, М.: ВНИИгеосистем, 2011.
8. Ulyanov S.V. System for intelligent control based on soft computing. – US Patent US 6,412,272 B1. Filed – Oct. 1998. – Date of patent. – Jul. 2, 2002.
9. Litvintseva L.V., Ulyanov S.V. et al. Soft computing optimizer for intelligent control system design: the structure and applications // J. Systemics, Cybernetics and Informatics (USA). – 2003. – Vol. 1. – №2.
10. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V. Design of self-organized intelligent control system based on quantum fuzzy inference: Intelligent system of systems engineering approach // Proc/ of IEEE Internat. Conf. on System, Man and Cybernetics (SMC'2002). – Hawaii, USA. – Vol.2.

11. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S. et al.* Self – organization principle and robust wise control design based on quantum fuzzy inference // Proc. Of Internat. Conf. ICSCCW'2002. – Antalya Turkey. – 2002
12. *Litvintseva L. V., Ulyanov S.S., Takahashi K. et al.* Design of self-organized robust wise control system based on quantum fuzzy inference // Proc. Of World Automation Congress (WAC'2006): Soft computing with Industrial Application (ISSCI'2006).-Budapest, Hungary. – 2006. – Vol. 2.
13. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S. 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. – 2002. – Vol. 78-86.
14. *Ulyanov S.V.* Self-organization of robust intelligent controller using quantum fuzzy inference // Proc. of IEEE Intern. Conference ISKE'2008 (3-rd Intern. Conf. on Intelligent System and Knowledge Engineering), Xiamen, China, vol. 1, pp. 726 – 732, 2008.
15. *Ulyanov S.V.* Self-organized intelligent robust control based on quantum fuzzy inference. – Recent Advances in Robust Control – Novel Approaches and Design Methods / A. Mueller (Ed.), Ch. 9, In Tech, 2011. pp. 187 – 220.
16. *Ульянов С.В., Сорокин С.В., Литвинцева Л.В.* Оптимизатор баз знаний на основе квантовых вычислений для проектирования самоорганизующихся нечетких регуляторов: программный инструментарий // Системный анализ в науке и образовании. – 2012. – № 1.

Контрольные вопросы к Главе 2

1. Структура математической и компьютерной модели ОУ.
2. Этапы проектирования БЗ для нечеткого регулятора.
3. Верификация и тестирование модели ОУ.
4. Методика проведения эксперимента в автономном и удаленном режимах функционирования ОУ.
5. Интерпретация результатов моделирования и натурального эксперимента.
6. Структура нейронной сети проектирования БЗ.

Глава 3. Проектирование робастной ИСУ роботом-манипулятором: применение ОБЗ на квантовых вычислениях

Принципиальной особенностью в построении многозвенных манипуляционных устройств является модульность, которая обеспечивает адаптивность и реконфигурируемость динамической структуры в соответствии с решаемой задачей.

Задачей управления в применении к избыточному роботу-манипулятору является:

1. обеспечение заданной точности позиционирования устройства захвата манипулятора;
2. определение пространственной конфигурации звеньев манипулятора (инвариантность обеспечивается избыточностью числа степеней свободы) с учетом непредвиденных факторов среды.

Исходя из задач управления, к конструируемой ИСУ предъявляются требования, с одной стороны, общего качества управления (в первую очередь, обеспечения достаточной точности позиционирования), а с другой, к эффективности алгоритмов решения обратной задачи динамики. Увеличение сложности структур объектов управления и трудности прогнозирования непредвиденных ситуаций управления усиливают внимание к поиску решения задачи гарантированного управления в условиях риска возникновения нештатных ситуаций.

Построение ИСУ роботом манипулятором возможно с применением технологий мягких вычислений. В [1] рассмотрены возможности проектирования ИСУ роботом манипулятором с тремя степенями свободы с единой БЗ, а также метод декомпозиции управления. Было продемонстрировано, что использование единой БЗ приводит к увеличению сложности создания БЗ, увеличению времени создания БЗ, повышению требований к вычислительным ресурсам процессора, на котором создаются БЗ и объему памяти системы, в которой размещается БЗ. Декомпозиция управления – разделение единой БЗ на несколько независимых БЗ – значительно упрощает процесс проектирования ИСУ и снижает требования к вычислительным ресурсам. Однако в результате рассогласования работы разделенных независимых БЗ несколько снижается качество управления.

В данной главе для устранения отмеченного недостатка рассмотрен метод организации координационного управления с применением технологий квантовых вычислений [2].

3.1. Постановка задачи управления

Система управления с разделенным управлением на основе технологий мягких вычислений, спроектированная с помощью интеллектуального инструментария – Оптимизатор Баз Знаний на основе мягких вычислений, представлена на рис. 3.1. Здесь используется способ декомпозиции управления, когда каждый НР с заложенной БЗ отвечает за управление одним звеном (способы декомпозиции управления рассмотрены в [3]).

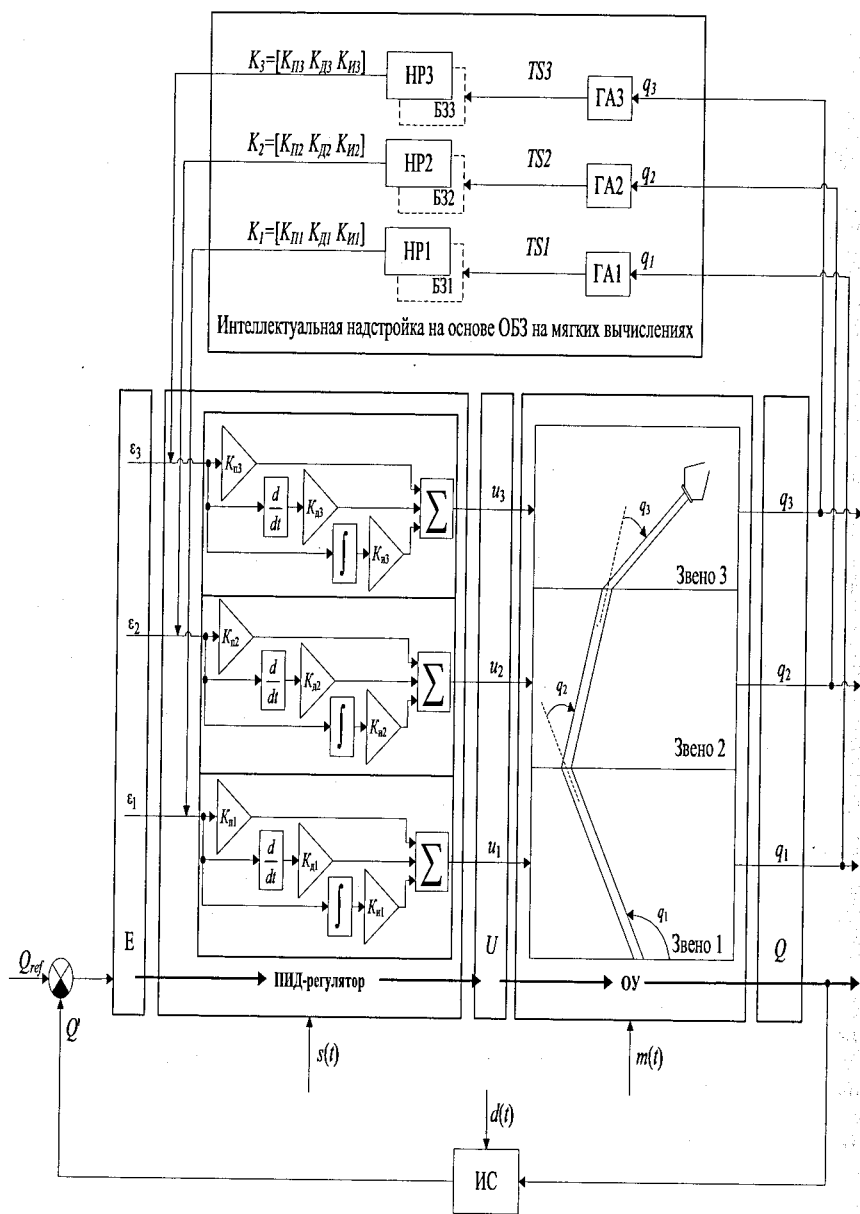


Рис. 3.1. ИСУ на основе ОБЗ на мягких вычислениях

На рис. 3.1 обозначено: Q_{ref} – воздействующий (задающий) сигнал, Q' – измеренная регулируемая величина, $E = [\epsilon_1 \ \epsilon_2 \ \epsilon_3]$ – ошибка управления (позиционирования трех звеньев), $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,3}$ – пропорциональные, дифференциальные и интегральные коэффициенты ПИД-регулятора, i – номер соответствующего звена робота манипулятора, $s(t)$ – ограничение управляющего воздействия, $U = [u_1 \ u_2 \ u_3]$ – управляющее воздействие, $d(t)$ – задержка в ИС, $TS_i, i = \overline{1,3}$ – обучающий сигнал соответствующего НР, $Q = [q_1 \ q_2 \ q_3]$ – регулируемая величина (положение соответствующего звена), $m(t)$ – внешнее воздействие среды.

Из рис. 3.1 видно, что задачей интеллектуальной надстройки сводится к нахождению коэффициентов ПИД-регулятора $K_{Pi}, K_{Di}, K_{Ii}, i = \overline{1,3}$, при которых обеспечивается желаемый характер движения.

Однако в представленной структуре коэффициенты ПИД-регулятора для каждого звена определяются независимо друг от друга, вследствие чего возникает рассогласование управления.

Для организации координационного управления в ИСУ на основе мягких вычислений с разделенным управлением, можно использовать извлечение скрытой информации о взаимосвязях, существующих НР для трех звеньев манипулятора с БЗ, полученными для штатных ситуаций управления. Для этого в блок интеллектуальной надстройки необходимо включить обобщающее звено.

Мы используем для этого модель КНВ, основанную на физических законах теории квантовых вычислений [4+7] и использующую четыре оператора: суперпозицию, квантовую корреляцию, интерференцию и измерение. Первые три являются унитарными, обратимыми квантовыми операторами, а четвертый (оператор измерения) – классическим (необратимым).

Рассмотрим механизмы подключения КНВ к системе НР для проектирования обобщенных сигналов управления.

3.2. Проектирование интеллектуальной системы управления с применением квантового нечеткого вывода (КНВ)

Схема извлечения скрытой информации о взаимосвязях, существующих НР для трех звеньев манипулятора с БЗ, полученных для штатных ситуаций управления с использованием блока КНВ, приведена на рис. 3.2.

Для проектирования блока КНВ использовался интеллектуальный инструментальный - Оптимизатор баз знаний на квантовых вычислениях.

Схема подключения блока КНВ в ИСУ представлена на рис. 3.3, на котором выделены блоки, спроектированные с использованием технологий мягких и квантовых вычислений. Далее ИСУ с использованием данной интеллектуальной надстройки будем называть ИСУ на основе ОБЗ на квантовых вычислениях.

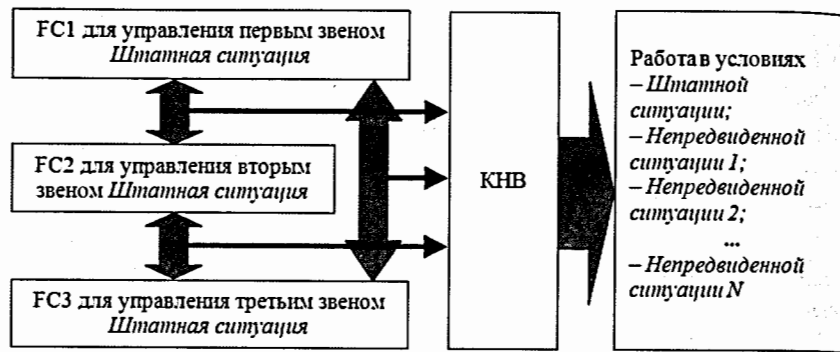


Рис. 3.2. Методология извлечение скрытой информации взаимосвязей БЗ НР, сконструированных для штатных ситуаций управления

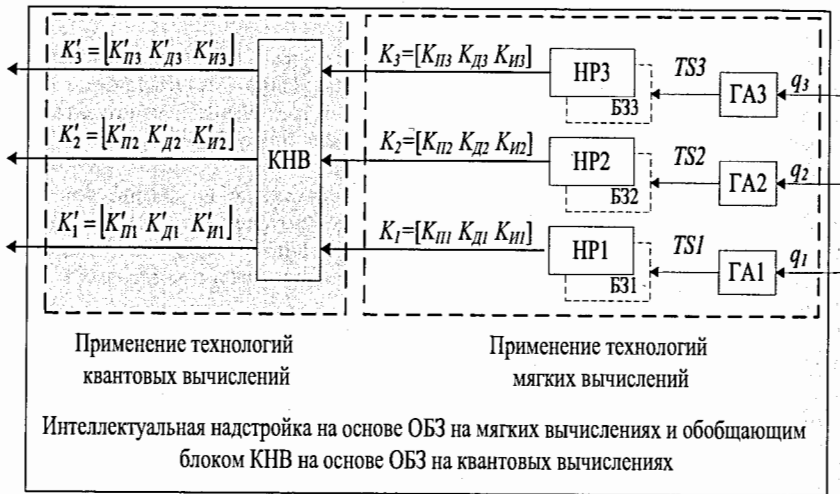


Рис. 3.3. Интеллектуальная надстройка структуры ИСУ на основе ОБЗ на квантовых и мягких вычислениях

3.3. Проектирование модели Квантового нечеткого вывода с помощью Оптимизатора баз знаний на квантовых вычислениях

Проектирование КНВ включает описанную ниже последовательность действий.
Шаг 1. Создание новой модели КНВ.

Для создания новой модели КНВ во вкладке «File» выбрать «New». Для создания новой модели необходимо определить количество входных и выходных переменных (поля «Input count» и «Output count» на рис. 3.4), формат матрицы корреляции (поле «Correlation size»).

Количество входных и выходных переменных равно количеству коэффициентов ПИД-регулятора $K_{пi}, K_{дi}, K_{иi}, i = \overline{1,3}$, т.е. девяти.

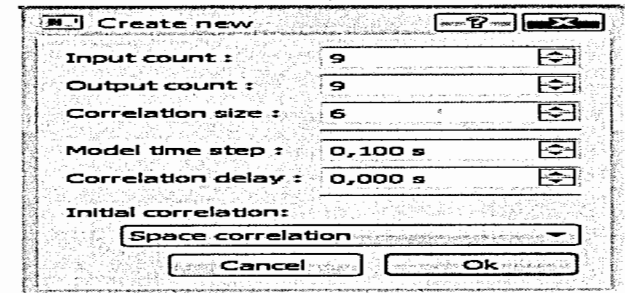


Рис. 3.4. Определение количества входных и выходных переменных, формата матрицы корреляции

Шаг 2. Создание гистограмм распределения амплитуд вероятностей.

Для дальнейшего удобства работы предварительно переименуем входные и выходные переменные. Для этого во вкладке «General» соответствующие поля «Input1», «Input2», «Output1», «Output2» и т.д. изменить, например, как показано на рис. 3.3.

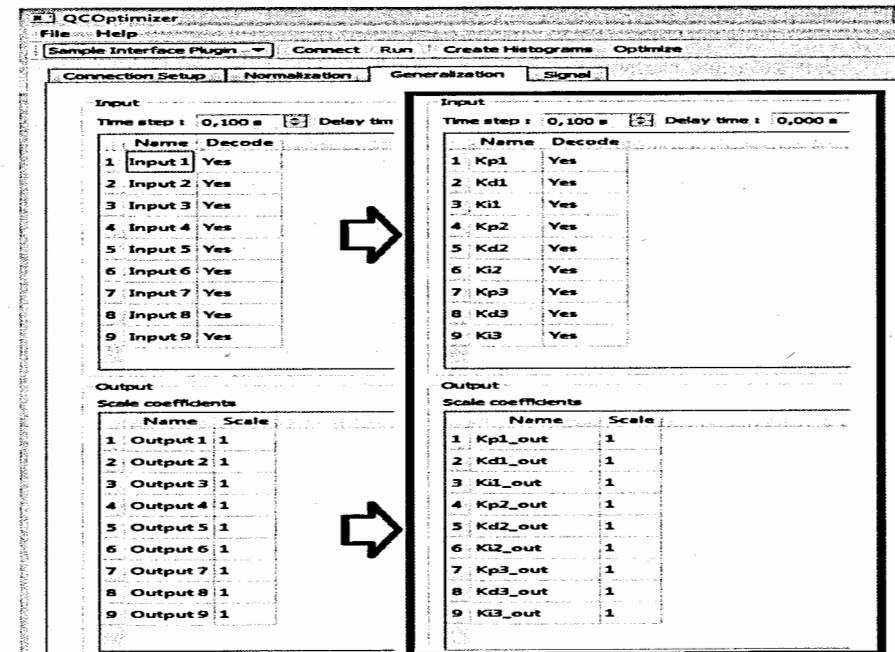


Рис. 3.5. Обозначение входных и выходных переменных

Для создания гистограмм распределения амплитуд вероятностей необходимо использовать сигналы на выходах НР, полученные (сохраненные как *.pat или *.mat файлы).

Например, имеем три сигнала с трех НР в виде таблиц (Таблица 3.1), где $\epsilon_{\Pi}, \epsilon_{Д}, \epsilon_{И}, i = \overline{1,3}$ – пропорциональные, дифференциальные и интегральные ошибки, $K_{\Pi}, K_{Д}, K_{И}, i = \overline{1,3}$ – пропорциональные, дифференциальные и интегральные коэффициенты ПИД-регулятора, i – номер соответствующего звена робота манипулятора.

Таблица 3.1.

Сигнал на выходе НР

ϵ_{Π}	$\epsilon_{Д}$	$\epsilon_{И}$	K_{Π}	$K_{Д}$	$K_{И}$
-95	-4750	-1.9	210.758	273.137	874.418
-91	-4550	-3.72	346.685	586.245	126.574
-88	-4400	-6.48	18.387	323.941	628.321
-87	-4350	-1.74	574.762	501.076	987.793
-85	-4250	-7.18	272.038	66.453	851.560
-83	-4150	-3.4	451.011	74.449	443.122
-82	-4100	-8.82	74.128	326.635	653.59
-80	-4000	-5	961.074	700.008	339.223

Для создания гистограмм необходимо выбрать меню «Create Histograms». В окне «Populate from file» выбрать файл с данными («Select data file»). После нажатия кнопки «Load» появится информация о количестве строк и столбцов в загруженном файле. В данном примере (рис. 3.5) подгружен файл, содержащий из 168 строк и 6 столбцов (соответственно Таблице 3.1).

Далее необходимо выбрать входную переменную, для которой создается гистограмма (поле «Update histogram for channel») и выбрать столбец или строку с данными (поле «Use Column/Row»). В нашем примере выбираем входную переменную K_{Π} и соответствующий ей четвертый столбец.

Следует обратить внимание, что входные сигналы должны быть нормализованными, что можно сделать, задав масштабный коэффициент (поле «use scale») и смещение (поле «offset»). Для рассматриваемого примера, коэффициенты ПИД-регулятора изменяются в диапазоне от 0 до 1000, следовательно, используем масштабный коэффициент, равный 0,001.

После нажатия кнопки «Make histogram» получаем гистограмму распределения для первой входной переменной КНВ - K_{Π} .

Аналогичным образом создаются гистограммы распределения амплитуд вероятностей для других входных переменных.

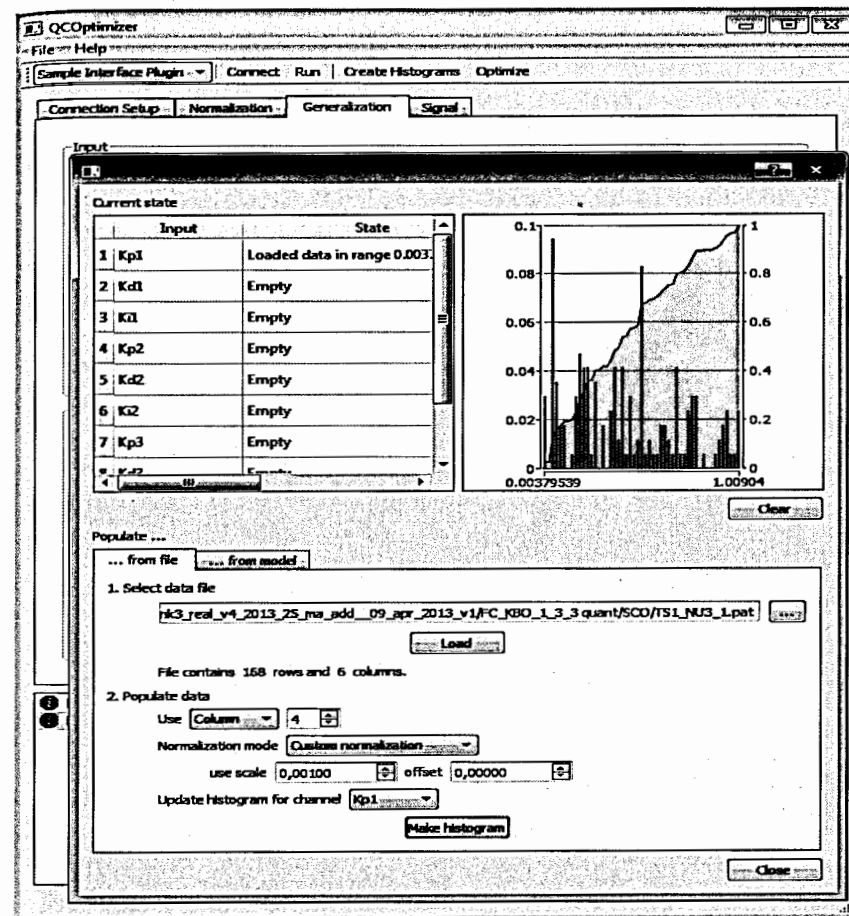


Рис. 3.6. Создание гистограмм распределения для входных переменных

Шаг 3. Определение матрицы корреляции.

Во вкладке «Generalization» в поле «Correlation matrix» (рис. 3.7) приведен первоначально предложенный вид матрицы корреляции. Количество строк матрицы корреляции равно удвоенному количеству входных переменных (т.к. матрица корреляции содержит реальные и виртуальные состояния), количество столбцов определяется пользователем при создании новой модели КНВ корреляции (поле «Correlation size» на рис. 3.4).

Выбор типа квантовой корреляции (пространственной, пространственно-временной или временной) осуществляется в поле «Change correlation»

Кроме того, существует возможность задать матрицу корреляции поэлементно, как показано на рис. 3.7.

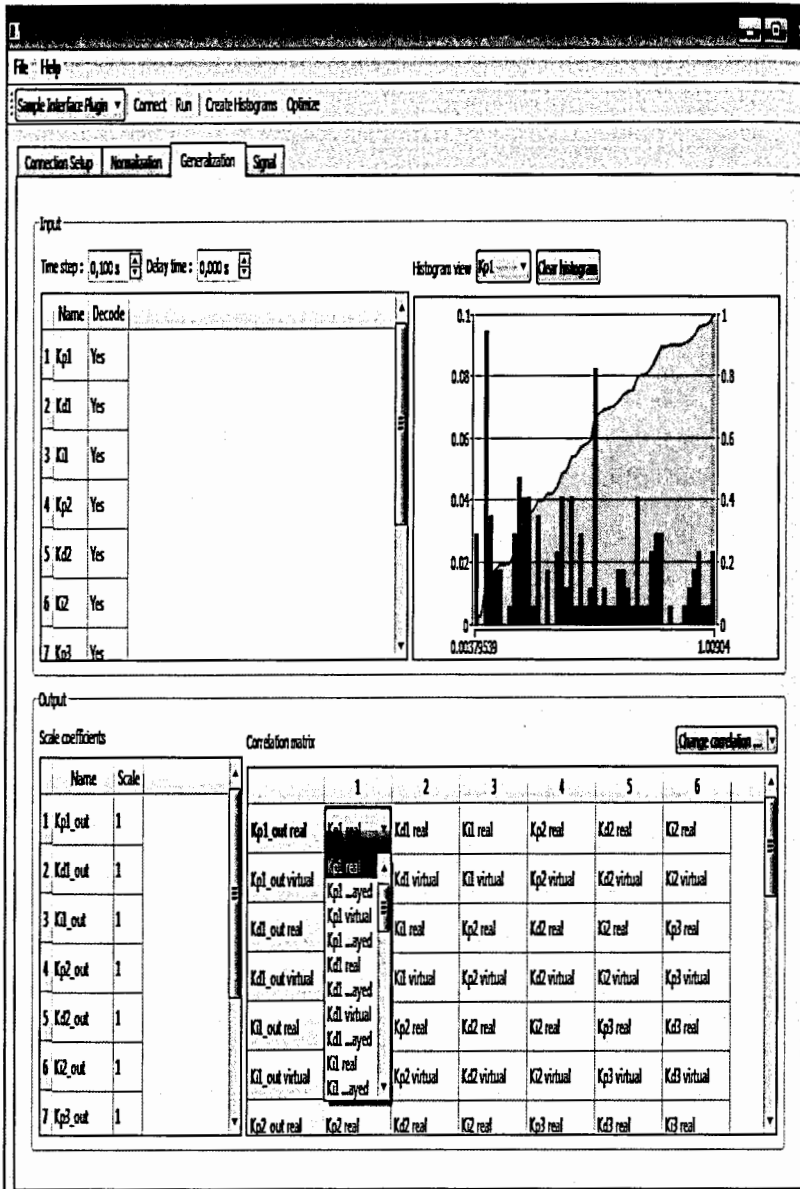


Рис. 3.7. Определение матрицы корреляции

В нашем примере будем рассматривать три типа смешанных матриц корреляции.

Пространственная. Зависимость выходных сигналов $K_{II}^{i_new}(t), K_{D}^{i_new}(t), K_{II}^{i_new}(t)$ определяется корреляцией следующих наборов входных коэффициентов:

$$\begin{cases} \{K_{II}(t), K_{DI}(t), K_{PI2}(t), K_{D2}(t), K_{PI3}(t), K_{DI3}(t)\} \rightarrow K_{PI1}^{new}(t) \\ \{K_{DI}(t), K_{HI}(t), K_{D2}(t), K_{HI2}(t), K_{DI3}(t), K_{HI3}(t)\} \rightarrow K_{DI1}^{new}(t) \\ \{K_{HI}(t), K_{PI1}(t), K_{HI2}(t), K_{PI2}(t), K_{HI3}(t), K_{PI3}(t)\} \rightarrow K_{HI1}^{new}(t) \\ \\ \{K_{PI2}(t), K_{D2}(t), K_{PI3}(t), K_{D3}(t), K_{PI1}(t), K_{DI1}(t)\} \rightarrow K_{PI2}^{new}(t) \\ \{K_{D2}(t), K_{HI2}(t), K_{DI3}(t), K_{HI3}(t), K_{DI1}(t), K_{HI1}(t)\} \rightarrow K_{DI2}^{new}(t), \\ \{K_{HI2}(t), K_{PI2}(t), K_{HI3}(t), K_{PI3}(t), K_{HI1}(t), K_{PI1}(t)\} \rightarrow K_{HI2}^{new}(t) \\ \\ \{K_{PI3}(t), K_{DI3}(t), K_{PI1}(t), K_{DI1}(t), K_{PI2}(t), K_{D2}(t)\} \rightarrow K_{PI3}^{new}(t) \\ \{K_{DI3}(t), K_{HI3}(t), K_{DI1}(t), K_{HI1}(t), K_{D2}(t), K_{HI2}(t)\} \rightarrow K_{DI3}^{new}(t) \\ \{K_{HI3}(t), K_{PI3}(t), K_{HI1}(t), K_{PI1}(t), K_{HI2}(t), K_{PI2}(t)\} \rightarrow K_{HI3}^{new}(t) \end{cases}$$

где каждый набор является запутанным состоянием:

$$|a_1 a_2 a_3 a_4 a_5 a_6\rangle = |K_{PI1}(t), K_{PI2}(t), K_{PI3}(t), K_{DI1}(t), K_{DI2}(t), K_{DI3}(t)\rangle.$$

Пространственно-временная:

$$\begin{cases} \{K_{PI1}(t), K_{DI1}(t - \Delta t), K_{PI2}(t), K_{D2}(t - \Delta t), K_{PI3}(t), K_{DI3}(t - \Delta t)\} \rightarrow K_{PI1}^{new}(t) \\ \{K_{DI1}(t), K_{HI1}(t - \Delta t), K_{D2}(t), K_{HI2}(t - \Delta t), K_{DI3}(t), K_{HI3}(t - \Delta t)\} \rightarrow K_{DI1}^{new}(t) \\ \{K_{HI1}(t), K_{PI1}(t - \Delta t), K_{HI2}(t), K_{PI2}(t - \Delta t), K_{HI3}(t), K_{PI3}(t - \Delta t)\} \rightarrow K_{HI1}^{new}(t) \\ \\ \{K_{PI2}(t), K_{D2}(t - \Delta t), K_{PI3}(t), K_{D3}(t - \Delta t), K_{PI1}(t), K_{DI1}(t - \Delta t)\} \rightarrow K_{PI2}^{new}(t) \\ \{K_{D2}(t), K_{HI2}(t - \Delta t), K_{DI3}(t), K_{HI3}(t - \Delta t), K_{DI1}(t), K_{HI1}(t - \Delta t)\} \rightarrow K_{DI2}^{new}(t) \\ \{K_{HI2}(t), K_{PI2}(t - \Delta t), K_{HI3}(t), K_{PI3}(t - \Delta t), K_{HI1}(t), K_{PI1}(t - \Delta t)\} \rightarrow K_{HI2}^{new}(t) \\ \\ \{K_{PI3}(t), K_{DI3}(t - \Delta t), K_{PI1}(t), K_{DI1}(t - \Delta t), K_{PI2}(t), K_{D2}(t - \Delta t)\} \rightarrow K_{PI3}^{new}(t) \\ \{K_{DI3}(t), K_{HI3}(t - \Delta t), K_{DI1}(t), K_{HI1}(t - \Delta t), K_{D2}(t), K_{HI2}(t - \Delta t)\} \rightarrow K_{DI3}^{new}(t) \\ \{K_{HI3}(t), K_{PI3}(t - \Delta t), K_{HI1}(t), K_{PI1}(t - \Delta t), K_{HI2}(t), K_{PI2}(t - \Delta t)\} \rightarrow K_{HI3}^{new}(t) \end{cases}$$

Временная:

$$\begin{cases} \{K_{П1}(t), K_{П2}(t), K_{П3}(t), K_{П1}(t-\Delta t), K_{П2}(t-\Delta t), K_{П3}(t-\Delta t)\} \rightarrow K_{П1}^{new}(t) \\ \{K_{Д1}(t), K_{Д2}(t), K_{Д3}(t), K_{Д1}(t-\Delta t), K_{Д2}(t-\Delta t), K_{Д3}(t-\Delta t)\} \rightarrow K_{Д1}^{new}(t) \\ \{K_{И1}(t), K_{И2}(t), K_{И3}(t), K_{И1}(t-\Delta t), K_{И2}(t-\Delta t), K_{И3}(t-\Delta t)\} \rightarrow K_{И1}^{new}(t) \\ \\ \{K_{П2}(t), K_{П3}(t), K_{П1}(t), K_{П2}(t-\Delta t), K_{П3}(t-\Delta t), K_{П1}(t-\Delta t)\} \rightarrow K_{П2}^{new}(t) \\ \{K_{Д2}(t), K_{Д3}(t), K_{Д1}(t), K_{Д2}(t-\Delta t), K_{Д3}(t-\Delta t), K_{Д1}(t-\Delta t)\} \rightarrow K_{Д2}^{new}(t) \\ \{K_{И2}(t), K_{И3}(t), K_{И1}(t), K_{И2}(t-\Delta t), K_{И3}(t-\Delta t), K_{И1}(t-\Delta t)\} \rightarrow K_{И2}^{new}(t) \\ \\ \{K_{П3}(t), K_{П1}(t), K_{П2}(t), K_{П3}(t-\Delta t), K_{П1}(t-\Delta t), K_{П2}(t-\Delta t)\} \rightarrow K_{П3}^{new}(t) \\ \{K_{Д3}(t), K_{Д1}(t), K_{Д2}(t), K_{Д3}(t-\Delta t), K_{Д1}(t-\Delta t), K_{Д2}(t-\Delta t)\} \rightarrow K_{Д3}^{new}(t) \\ \{K_{И3}(t), K_{И1}(t), K_{И2}(t), K_{И3}(t-\Delta t), K_{И1}(t-\Delta t), K_{И2}(t-\Delta t)\} \rightarrow K_{И3}^{new}(t) \end{cases}$$

Шаг 4. Установка параметров нормализации входных переменных и денормализации выходных переменных.

Блок КНВ оперирует нормализованными значениями, для чего во вкладке «Normalization» (рис 3.8) можно задать масштабные коэффициенты («Scale»), смещение («Offset») или максимальные и минимальные значения (соответственно «Signal Max.» и «Signal Min.») входных переменных.

В нашем примере коэффициенты ПИД регулятора изменяются от 0 до 1000. Для установки параметров нормализации и денормализации достаточно для всех входных и выходных переменных в полях «Signal Max.» задать значения, равные 1000. Обратите внимание, что значения полей «Scale» автоматически установились равными 0,001.

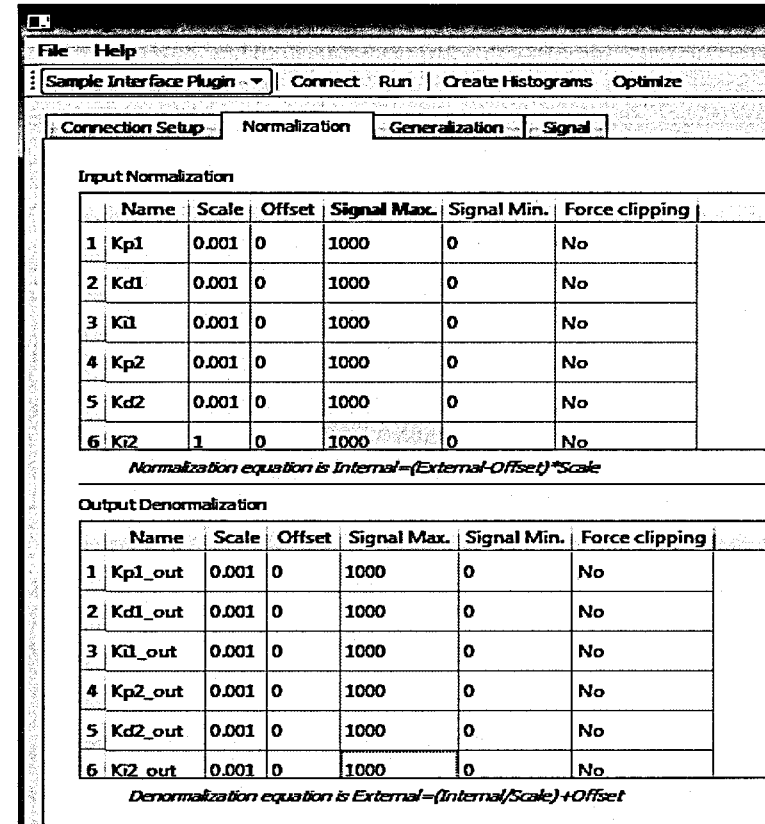


Рис. 3.8. Установка параметров нормализации входных переменных и денормализации выходных переменных

3.4. Сравнение работы интеллектуальных систем управления с применением технологий квантовых и мягких вычислений

Сравним результаты моделирования работы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением. Также рассмотрим результаты физического эксперимента.

Оценка работы систем управления производится по серии экспериментов с использованием введенной системы критериев качества (описание экспериментального макета, методики проведения экспериментов и критериев качества приведено в [1, 8]).

Результаты проведения серии экспериментов, для ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной, пространственно-временной и временной корреляций, приведены соответственно в Таблицах 3.2 и 3.3 для *MatLab/Simulink* моделей и для физического макета робота манипулятора, а также на рис. 3.9 и 3.10 соответственно для *MatLab/Simulink* моделей и для физического макета робота манипулятора.

Таблица 3.2.
Сравнение критериев качества для *MatLab/Simulink* моделей

Вид решения	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях		
		Использование пространственной корреляции	Использование пространственно-временной корреляции	Использование временной корреляции
1 Решение штатных ситуаций	1	1	1	1
2 Решение непредвиденных ситуаций	0,833333	1	1	1
3 Быстродействие	0,516917	0,807667	0,8135	0,743833
4 Относительное значение перегулирования	0,996353	1	1	0,999155
5 Относительная ошибка позиционирования	0,888263	0,99815	0,99815	0,996413
6 Время одной итерации	0,96783	0,922353	0,923098	0,93069
7 Сложность реализации управления	0,948788	0,98847	0,985205	0,986955
8 Общая оценка управления	0,819583	0,953007	0,954085	0,941382

Таблица 3.3.
Сравнение критериев качества для физического макета робота манипулятора

Вид решения	ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением	ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях		
		Использование пространственной корреляции	Использование пространственно-временной корреляции	Использование временной корреляции
1 Решение штатных ситуаций	1	1	1	1
2 Решение непредвиденных ситуаций	0,9	1	1	1
3 Быстродействие	0,569137	0,779917	0,602137	0,716833
4 Относительное значение перегулирования	0,9955	0,998225	0,998075	0,997425
5 Относительная ошибка позиционирования	0,989375	0,998225	0,99475	0,996533
6 Время одной итерации	0,75755	0,72541	0,748325	0,73105
7 Сложность реализации управления	0,935675	0,97315	0,976525	0,998
8 Общая оценка управления	0,845085	0,926916	0,893471	0,915896

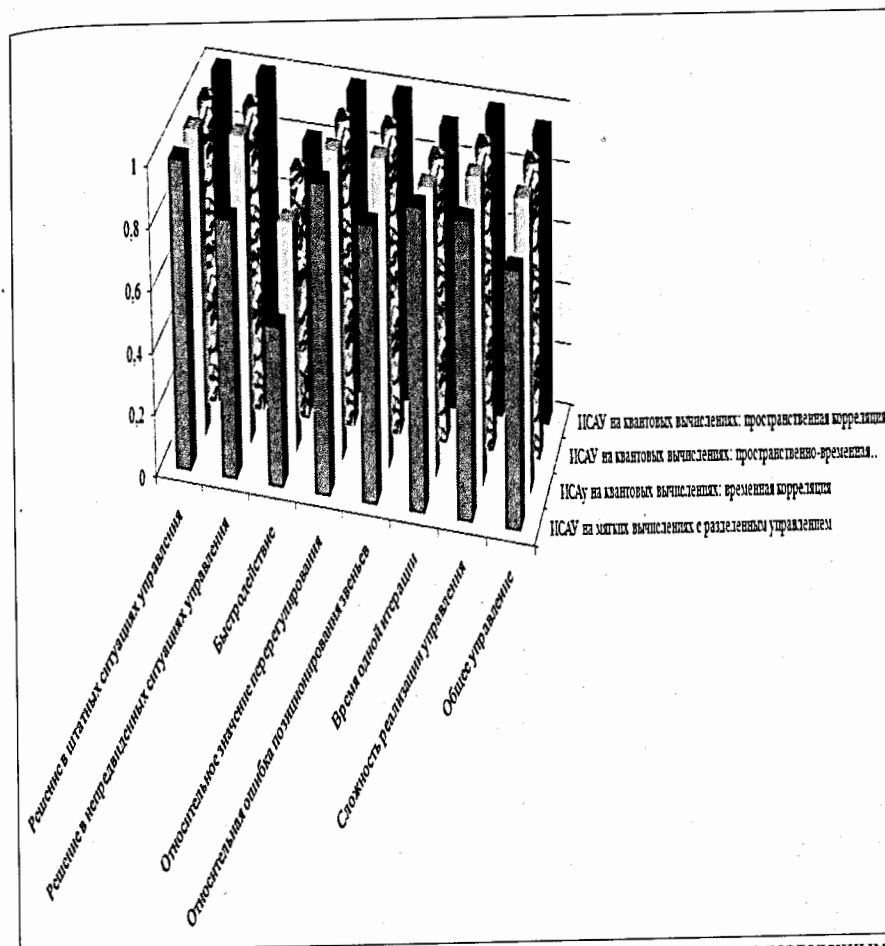


Рис. 3.9. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной, пространственно-временной и временной корреляций при тестировании *MatLab/Simulink* моделей

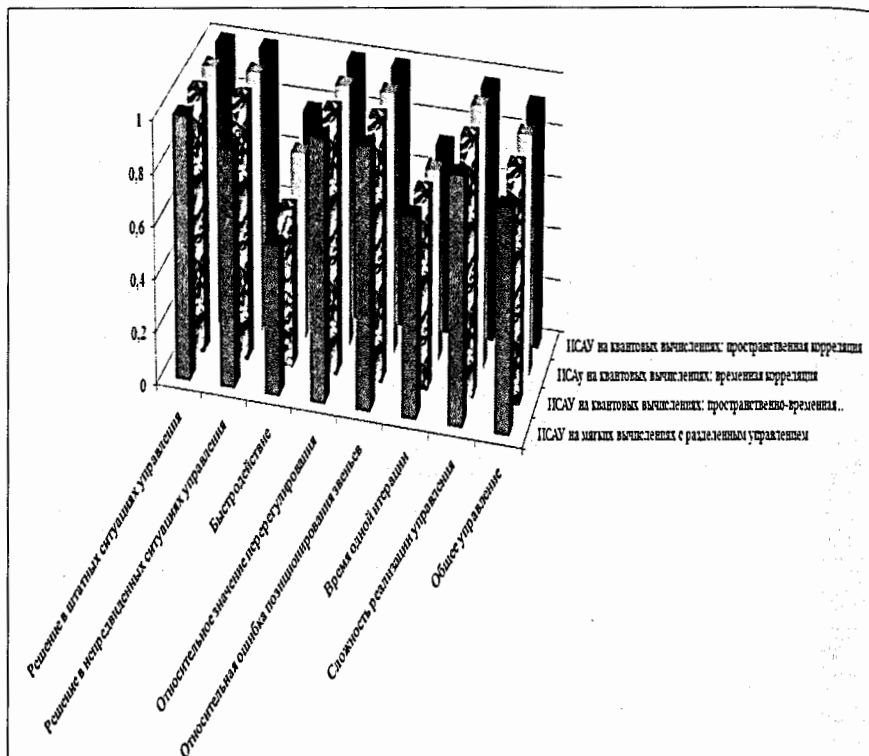


Рис. 3.10. Сравнение результатов работы ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях при тестировании физического макета робота-манипулятора

Из Таблиц 3.2 и 3.3, а также из рис. 3.9 и 3.10 видно, что при включении в структуру ИСУ с разделенным управлением блока КНВ, критерий «Решение задачи позиционирования в непредвиденных ситуациях управления» достигает максимального значения, улучшается показатель критерия «Сложность реализации управления» при использовании любого из трех рассмотренных типов корреляций как для *MatLab/Simulink* моделей, так и для физического макета робота манипулятора.

В связи с появлением в системе управления дополнительного звена КНВ, в ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по сравнению с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, ухудшается критерий «Время одной итерации».

Значительно улучшаются показатели критерия «Быстродействие».

В целом, «Общая оценка управления» улучшается во всех случаях при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях по сравнению с использованием ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением.

Если для *MatLab/Simulink* моделей наилучший показатель обеспечивается при использовании ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственно-временной корреляции, то физическое тестирование Модуля Манипулятора определяет оптимальным выбор пространственной корреляции.

Для наглядности, рассмотрим результаты сравнения работы *MatLab/Simulink* моделей в условиях непредвиденной ситуации управления: на 11-й итерации положение второго звена принудительно изменяется (рис. 3.11 – изменение положения второго звена манипулятора под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением).



Рис. 3.11. Моделирование внешнего воздействия на второе звено манипулятора

Построим траектории движения манипулятора с тремя степенями свободы под управлением ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции в условиях обозначенной непредвиденной ситуации (рис. 3.12).

Из рис. 3.12 видно, что в отличие от ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях справляется с задачей позиционирования с заданной точностью в рассмотренной непредвиденной ситуации управления.

Неспособность ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях решить задачу точного позиционного управления иллюстрируется также на рис. 3.11 – НР, отвечающий за управления вторым звеном за отведенное время работы так и не смог «реабилитироваться» после мощного внешнего воздействия, в результате ошибка позиционирования второго звена составила более 50 град.

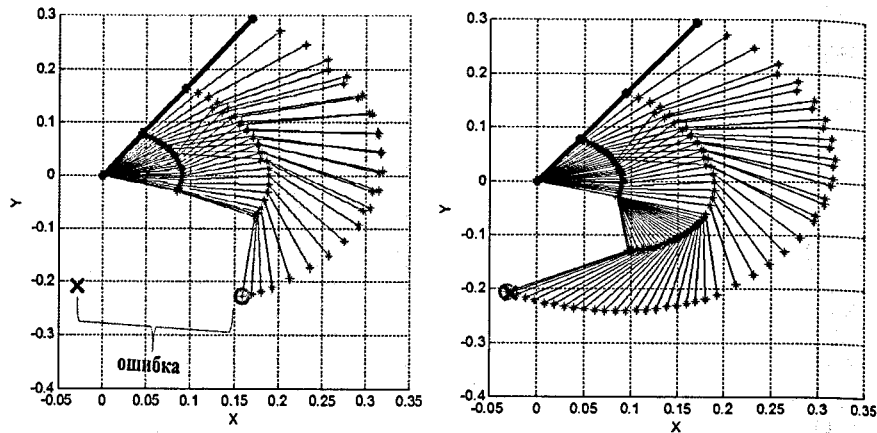


Рис. 3.12. Поведение манипулятора с тремя степенями свободы в непредвиденной ситуации: под управлением ИСУ с ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (слева); под управлением ИСУ с ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции (справа)

На рис. 3.13 приведена динамика изменения коэффициентов ПИД-регулятора на входе и выходе КНВ (соответственно левый и правый столбцы) для рассматриваемой нештатной ситуации на примере K_{III} .

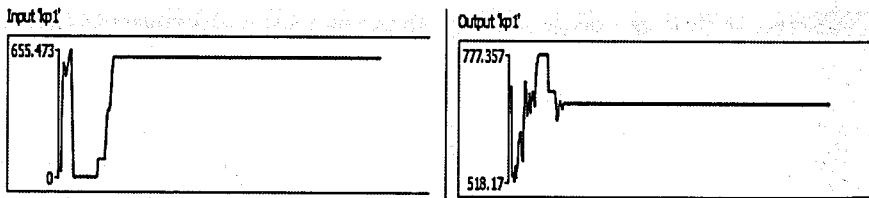


Рис. 3.13. Динамика изменения коэффициентов ПИД-регулятора на входе и выходе КНВ

На рис. 3.14 представлено сравнение законов управления для трех звеньев манипулятора: сгенерированных с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением (толстые линии) и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях (тонкие линии).

Из рис. 3.14 видно, что включение в ИСУ блока КНВ дает возможность получать адекватные к возмущениям сигналы управления с меньшими плавными колебаниями, чем на выходе ИР.

Рассмотренные ранее случаи непредвиденных ситуаций управления ([1, 8]) – изменение начальных условий, принудительное смещение звеньев – относятся к внешним непредвиденным ситуациям управления.

Однако помимо внешних возмущений, возможны и изменения во внутренней конфигурации объекта и системы управления, связанные с неполнотой начального описания, помехами в управляющих каналах, неточностью и инерционностью измерительной системы и т.д.

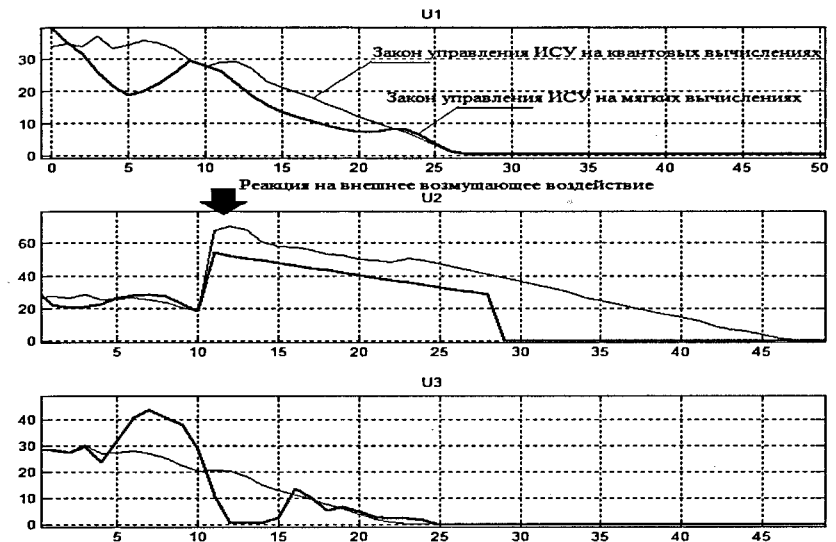


Рис. 3.14. Сравнение законов управления ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением и ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях

Внесем в модели систем управления дополнительные случаи непредвиденных ситуаций управления, связанных с изменениями параметров ОУ во времени.

3.5. Моделирование непредвиденных ситуаций управления в условиях изменений параметров ОУ

Введем 2 случая непредвиденных ситуаций управления (начальные условия соответствуют штатным ситуациям управления):

- 1) на одиннадцатой итерации изменяется ограничение выходного воздействия в терминах изменений положений звеньев: увеличивается с 3 до 5 град.
- 2) на одиннадцатой итерации изменяется ограничение выходного воздействия в терминах изменений положений звеньев: уменьшается с 3 до 1 град.

Сравним законы управления, сформированные ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях при использовании пространственной, пространственно-временной и временной корреляций (рис. 3.15) для непредвиденных ситуаций управления в условиях изменения параметров ОУ.

На рис. 3.15 законы управления, сформированные ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением определенного типа корреляции обозначены следующим образом: Spatial – пространственная корреляция, Spatial Temporal – пространственно-временная корреляция, Temporal – временная корреляция.

Из рис. 3.15 видно, что при формировании управляющего воздействия минимальный расход полезного ресурса достигается при использовании пространственной корреляции.

Для рассмотренных экспериментов (непредвиденные ситуации управления в условиях изменения параметров ОУ) сравним законы управления, формируемые с помощью ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной

корреляции, а также ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и разделенным управлением (рис. 3.16).

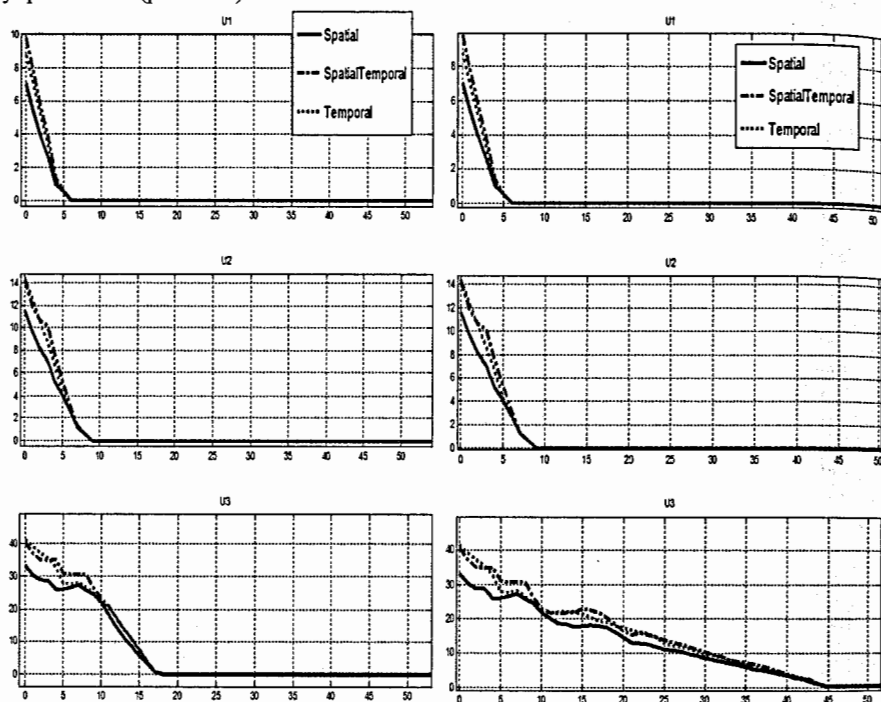


Рис. 3.15. Сравнение сформированных ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях законов управления с применением пространственной пространственно-временной и временной корреляций в непредвиденных ситуациях управления в условиях изменения параметров ОУ: первый случай (слева); второй случай (справа)

На рис. 3.16 законы управления обозначены следующим образом: QFC – сформированные с помощью ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции, FC Decomposition – с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, FC – с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР.

Для рассмотренных экспериментов (рис. 3.13) с точки зрения минимизации расхода полезного ресурса, наилучшие законы управления формируются с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР, незначительное ухудшение наблюдается при формировании с помощью ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции.

Законы управления, сформированные ИСУ на ОБЗ с разделенным управлением в условиях изменения параметров ОУ, приобрели колебательный характер.

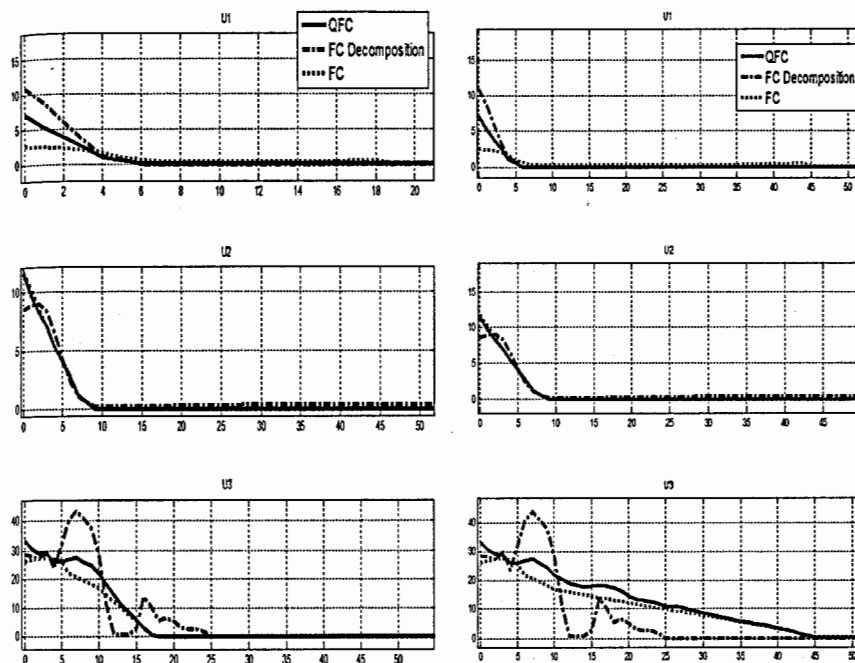


Рис. 3.16. Сравнение сформированных законов управления: ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением в непредвиденных ситуациях управления в условиях изменения параметров ОУ: первый случай (слева); второй случай (справа)

Рассмотрим другую пару экспериментов, также соответствующую двум рассматриваемым случаям непредвиденных ситуаций управления в условиях изменения параметров ОУ (рис. 3.17).

При рассмотрении экспериментов (рис. 3.17), стабильные законы управления были сформированы ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, тогда как в законах управления, сформированных ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР присутствуют участки локально неустойчивых состояний.

В рассмотренных примерах с точки зрения качества формирования законов управления (рис. 3.13 – 3.17), наилучшими свойствами обладает ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с использованием пространственной корреляции, в то время как с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением был сформирован вектор управляющих воздействий с колебательным характером, а с помощью ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях – управляющие воздействия с локально неустойчивыми состояниями.

Заключение

В результате сравнения работы рассмотренных типов систем управления роботом манипулятором с тремя степенями свободы, можно сделать следующие выводы:

- общая оценка качества управления выше в случае применения ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях (для пространственной, пространственно-временной и временной корреляций) по сравнению с ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением, что является следствием введения в структуру ИСУ дополнительного звена КНВ, организующего координационное управление;

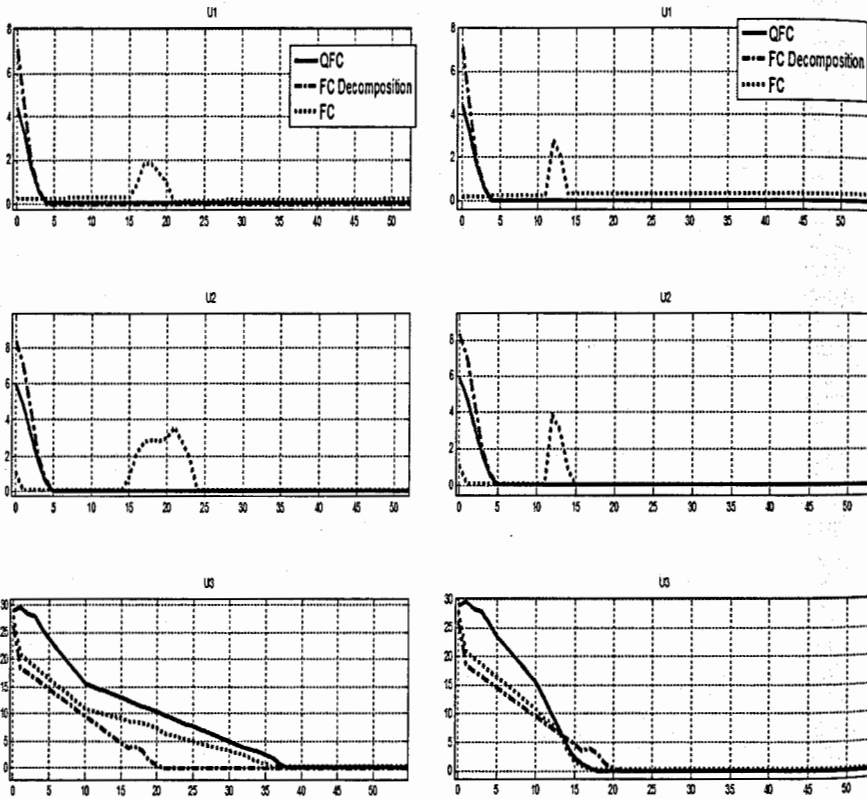


Рис. 3.17. Сравнение сформированных законов управления: ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях с применением пространственной корреляции, ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с одним НР и ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением в непредвиденных ситуациях управления в условиях изменения параметров ОУ: первый случай (слева); второй случай (справа)

- в результате тестирования *MatLab/Simulink* моделей лучшими показателями обладала ИСУ, использующая пространственно-временную корреляцию; однако тестирование физического макета робота манипулятора определило наиболее оптимальным использование пространственной корреляции;

- минимальный расход полезного ресурса достигается при использовании в ИСУ на ОБЗ на квантовых вычислениях пространственной корреляции по сравнению с пространственно-временной и временной корреляциями;
- законы управления, сформированные ИСУ на ОБЗ на мягких вычислениях с разделенным управлением в условиях изменения параметров ОУ или внешних возмущающих воздействий, приобрели колебательный характер, а в законах управления, сформированных ИСУ на ОБЗ с одним НР появились участки локально неустойчивых состояний.

Возможность декомпозиции управления (разделения одной БЗ на несколько однотипных независимых БЗ) и организация координационного управления с помощью введения звена КНВ, существенно увеличивает возможное число входных переменных и тем самым расширяет возможности учета параметров системы и объекта управления.

Список литературы к Главе 3

1. Николаева А.В., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом манипулятором. Ч. 2: Декомпозиция управления и физического эксперимент на основе технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2013. – №1.
2. Ulyanov S.V. Self-organized intelligent robust control based on quantum fuzzy inference – Recent Advances in Robust Control – Novel Approaches and Design Methods / A. Mueller (Ed.), Ch. 9. – In Tech, 2011.
3. Николаева А.В., Петров С.П., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором. Ч. 1: Технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: электрон. науч. журнал. – 2012.
4. Nielsen M.A., Chang I.L. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge Univ. Press. UK. – 2000.
5. Marinescu D.C., Marinescu G.M. Approaching quantum computing. Pearson Prentice Hall. USA. – 2006.
6. Ульянов С.В., Сорокин С.В., Литвинцева Л.В. Оптимизатор баз знаний на основе квантовых вычислений для проектирования самоорганизующихся нечетких регуляторов: программный инструментарий // Системный анализ в науке и образовании. – 2012. – № 1.
7. Ghisi F., Ulyanov S. The information role of entanglement and interference operators in Shor's quantum algorithm gate dynamics // Journal of Modern Optics. – 2000. – Vol.47, No 12.
8. Николаева А.В., Ульянов С.В. Проектирование интеллектуальной системы управления роботом манипулятором. Ч. 3: Моделирование и физический эксперимент на основе технологии мягких вычислений // Системный анализ в науке и образовании: сетевое научное издание. – 2013. – №1.

Контрольные вопросы к Главе 3

1. Принципы построения модели избыточного робототехнического манипулятора как ОУ.
2. Структура математической и компьютерной модели ОУ.
3. Этапы проектирования БЗ для нечеткого регулятора.

4. Верификация и тестирование одели ОУ.
5. Методика проведения эксперимента режимов функционирования ОУ.
6. Интерпретация результатов моделирования и натурального эксперимента.
7. Структура проектирования БЗ на основе программного инструментария ОБЗ на квантовых вычислениях.

Условные обозначения

САУ	система автоматического управления
БЗ	база знаний
ГА	генетический алгоритм
ИС	измерительная система
ИСУ	интеллектуальная система управления
НР	нечеткий регулятор
ОБЗ	оптимизатор баз знаний
ОУ	объект управления
ПИД...	пропорционально-интегрально-дифференциальные ...
КНВ	квантовый нечеткий вывод

Лабораторный практикум: Моделирование самоорганизующегося НР с применением КНВ в непредвиденных ситуациях управления

Рассмотрим практическое применение разработанной модели КНВ для формирования процессов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора в зависимости от типа и вида квантовой корреляции. Данный подход используется для моделирования робастных БЗ для НР в структурах ИСУ существенно-нелинейными ОУ. Модели ОУ обладают различными видами динамической неустойчивости и функционируют в различных непредвиденных ситуациях управления.

На рис. 1 показана блок-схема моделирования самоорганизующегося НР в системе Simulink.

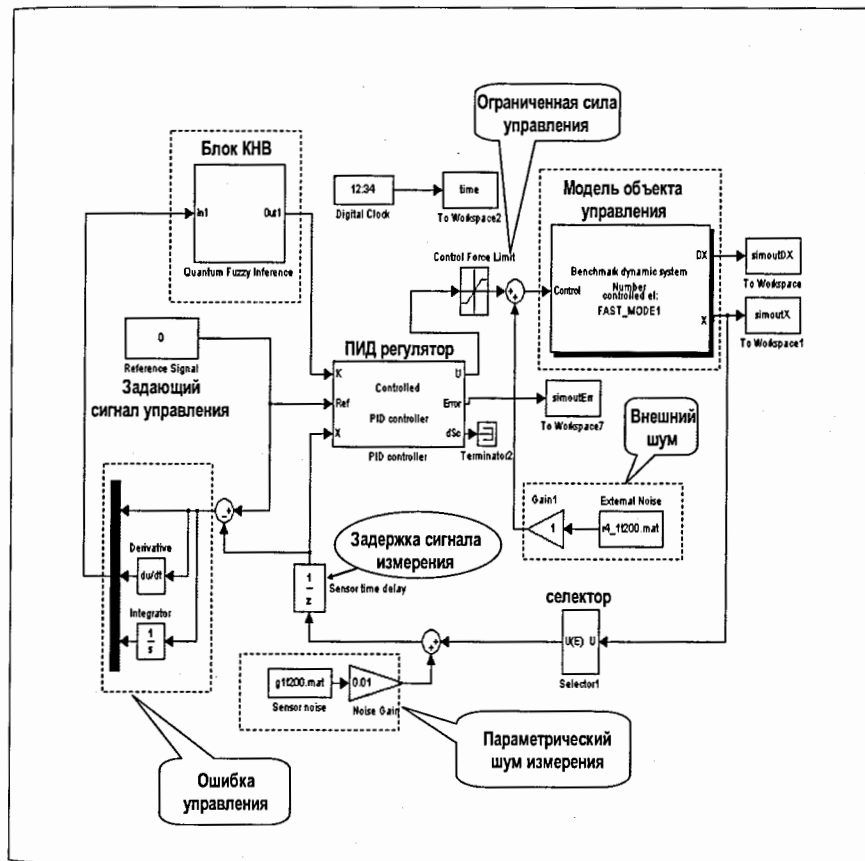


Рис. 1. Блок-схема моделирования самоорганизующегося НР в Simulink

В соответствии с КА в КНВ на первом этапе осуществляются следующие операции: 1) нормировка данных двух БЗ (TS0 и TS1); 2) кодирование состояний, статистическая обработка с целью формирования интегрального закона распределения вероятностей; 3) сформированы суперпозиции соответствующих кодированных сигналов управления для трех типов квантовой корреляции: пространственной, временной и пространственно-временной. Далее, согласно следующему шагу КА, осуществляется: вычисление амплитуд и определение максимальной

амплитуды вероятностей квантовых состояний (действия оракула и интерференции) в сформированных суперпозициях; при этом для каждого момента времени формировались законы управления для трех типов корреляций с применением процедур декодирования и шкалирования коэффициентов усиления нечеткого ПИД-регулятора в режиме реального времени.

Рассмотрим важный вопрос извлечения квантовой информации из классических состояний спроектированных законов управления на основе выбора типа квантовой корреляции, используя результаты сравнительного анализа их влияния на робастность управления.

Пример 7. Влияние типов квантовой корреляции на вид процессов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора. Согласно рис. 1.20, имеем три типа квантовой корреляции: пространственную, временную и пространственно-временную. В качестве исходных БЗ используем сигналы управления коэффициентами усиления двух нечетких ПИД-регуляторов, спроектированных с помощью ОБЗ (см. результаты моделирования соответствующих сигналов управления).

А. Чувствительность спроектированных индивидуальных БЗ. Рассмотрим в первую очередь чувствительность спроектированных БЗ на обучающих ситуациях к изменению условий ситуации управления на основе схем моделирования рис. 1. В качестве модели ОУ использовалась описанная ниже модель (2). Чувствительность БЗ определяет реакцию ОУ на непредвиденную ситуацию управления. Данные два источника информации совместно являются физическим ресурсом для извлечения дополнительной скрытой квантовой информации в классических состояниях изменяющихся коэффициентов усиления ПИД-регулятора.

На рис. 2(а) показаны законы управления коэффициентами усиления двух нечетких ПИД-регуляторов, спроектированные для следующих ситуаций управления в режиме обучения (off-line) на ОС от ОБЗ: (i) при воздействии Гауссовского шума на ОУ (ситуация обучения TS0); (ii) в условиях влияния Рэлеевского шума на ОУ (ситуация обучения TS1).

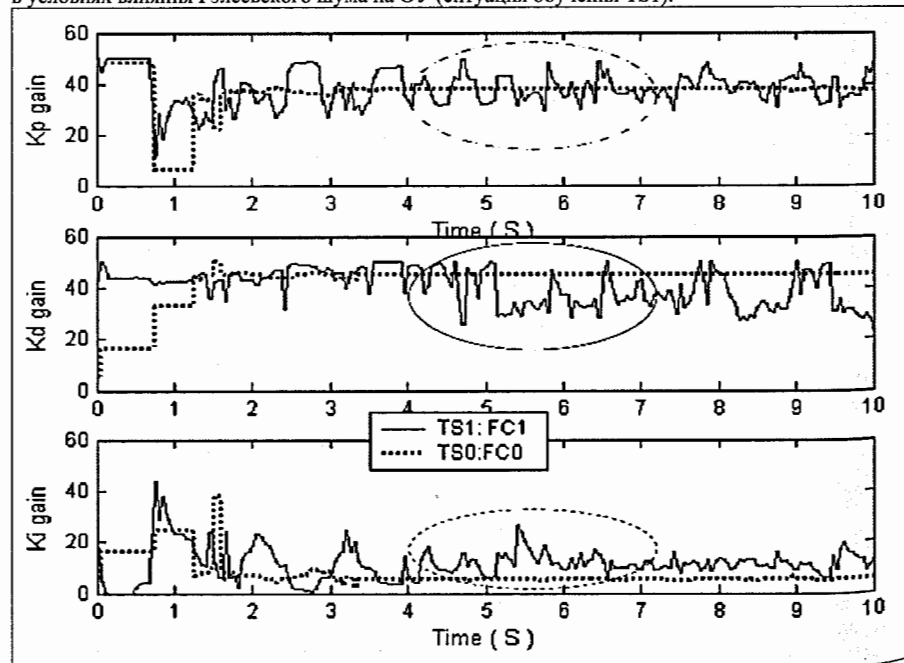


Рис. 2 (а)

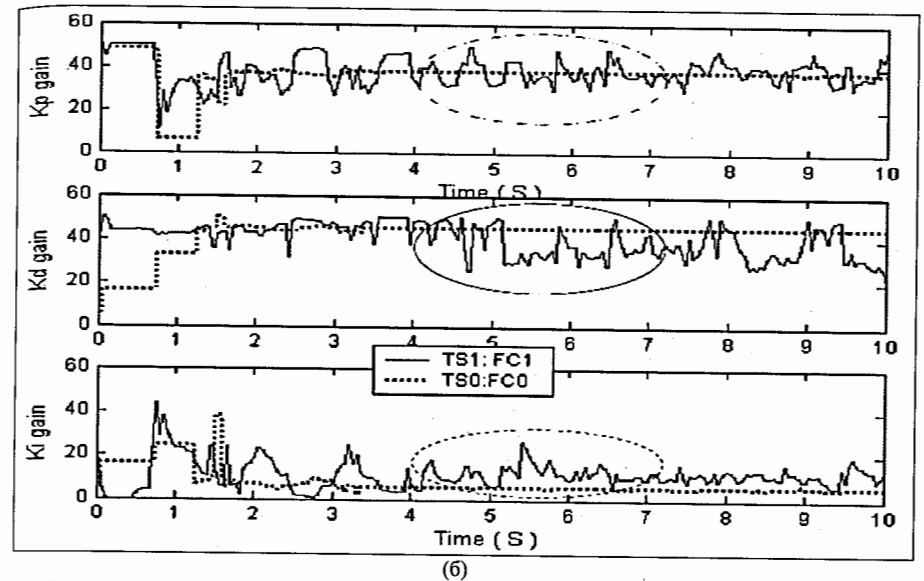


Рис. 2. Влияние вида шума на законы процессов управления коэффициентами усиления нечетких ПИД-регуляторов: а – ситуации управления в режиме обучения; б – вид законов управления в непредвиденной ситуации

Законы управления получены на основе блок-схемы моделирования, приведенной на рис. 1. Характеристики используемых случайных шумов показаны на рис. 3.

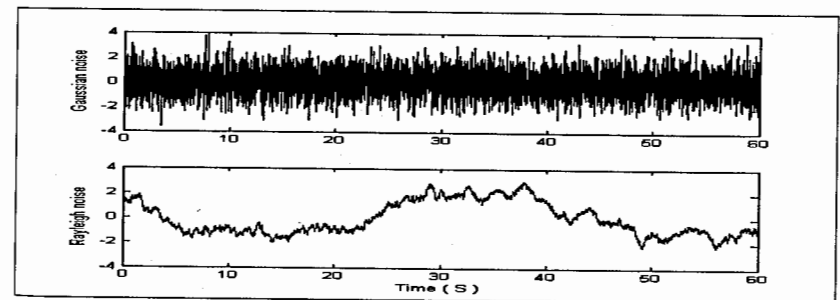


Рис. 3. Вид случайных шумов – гауссовский шум (вверху) и рэлеевский шум (внизу) с одинаковыми корреляционными функциями

Шумы имеют одинаковую корреляционную функцию

$$R(\tau) = \sigma^2 \exp\{-\alpha|\tau|\} \left(\cos \omega\tau + \frac{\alpha}{\omega} \sin \omega|\tau| \right), \quad (1)$$

но различаются по функциям распределения вероятностей.

Влияние вида шума на изменение закона управления коэффициентами усиления для второй ситуации рассмотрено на рис. 2(б) (воздействие гауссовского шума в ситуации управления TS1, когда БЗ для НР была спроектирована на рэлеевский шум). На рис. 2(а, б) выделены

характерные изменения законов управления коэффициентами усиления для ситуации TS1 при изменении типа случайного шума.

Б. Моделирование типов квантовой корреляции и законов управления. На рис. 4 показаны результаты моделирования законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора на основе программной поддержки и инструментария (см. меню инструментария выбора типа корреляции в Приложении 1), для выбранных трех типов квантовой корреляции, и блок-схемы на рис. 1.

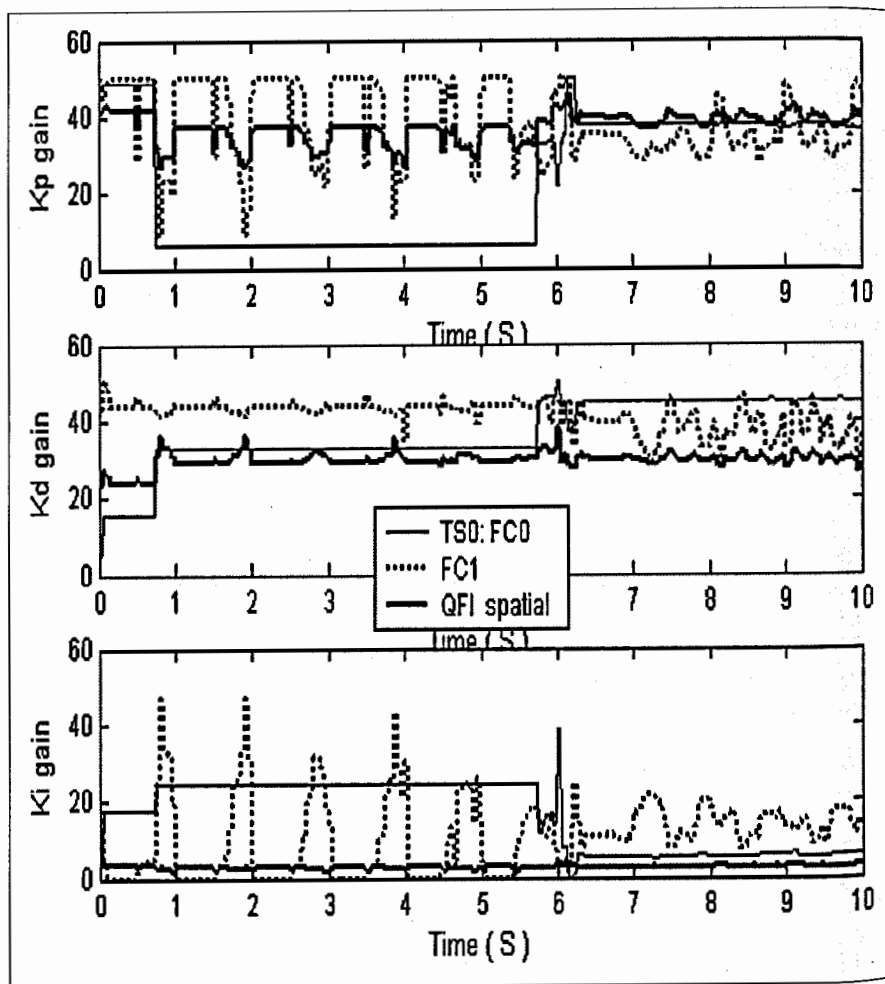
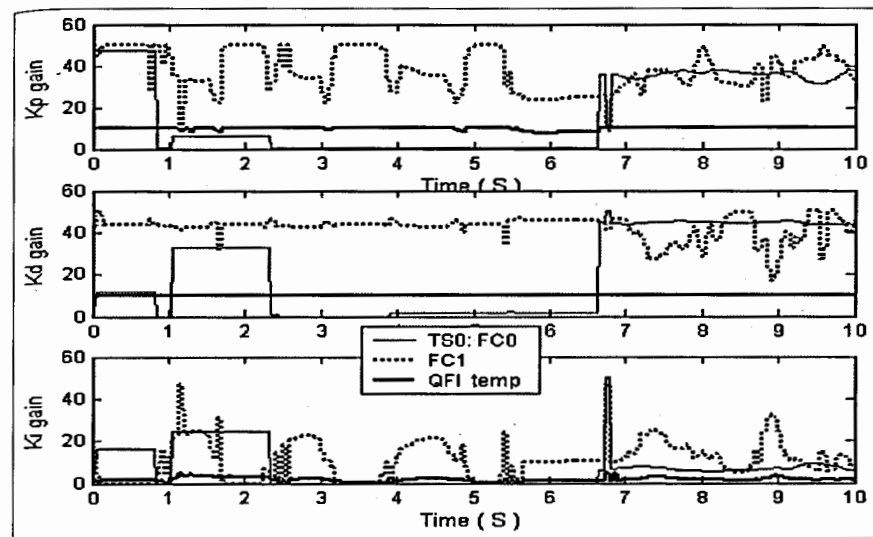
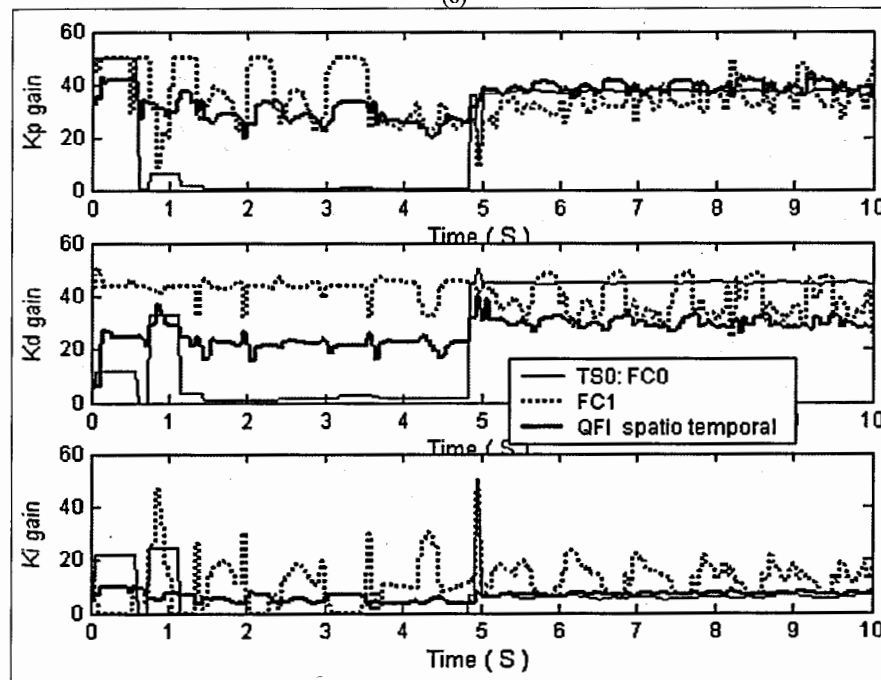


Рис. 4 (а)



(б)



(в)

Рис. 4. Влияние типов квантовых корреляций на вид законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора:

а – пространственная; б – временная; в – пространственно-временная корреляции

Анализ результатов моделирования на рис. 4, полученных с помощью КНВ, выявляет строгую тенденцию формирования простых (для программно-аппаратной реализации) законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора для всех трех типов квантовой корреляции. Эффективность и выбор окончательного закона управления определяется выбранным критерием оптимальности управления и динамического поведения ОУ (см. ниже пример 2).

На рис. 5 показан результат сравнения качества управления для трех исследуемых типов квантовой корреляции по критерию минимума ошибки управления.

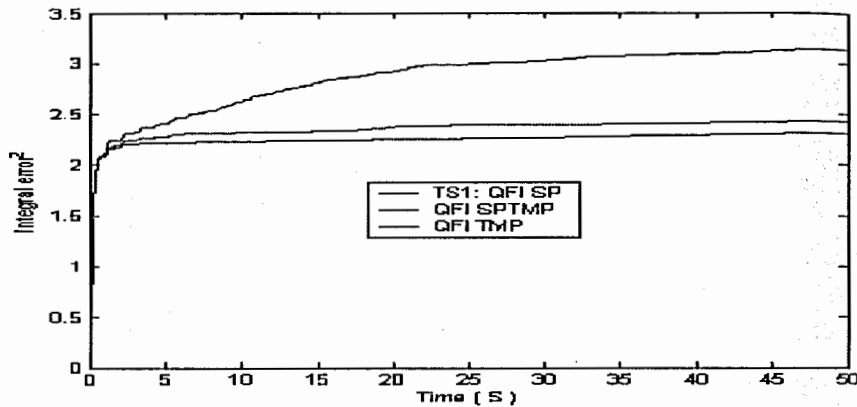


Рис.5. Сравнение качества управления по критерию минимума ошибки управления для трех типов квантовой корреляции (в ситуациях обучения)

Квантовая временная корреляция дает лучшее качество управления, и использовалась в дальнейшем моделировании и исследовании робастного управления в примере 2.

Приведем пример проектирования самоорганизующегося робастного НР основанного на применении КНВ для нелинейного ОУ в непредвиденных ситуациях управления.

Пример 2. Робастное интеллектуальное управление нелинейным ОУ (с существенной диссипацией и локальной неустойчивостью) Уравнения движения ОУ и формирование управляющей силы рассматриваются совместно с термодинамическими условиями в следующем виде:

$$\begin{aligned} \ddot{x} + [2\beta + \alpha\dot{x}^2 + k_1x^2 - 1]\dot{x} + kx &= \xi(t) + u(t); \\ \frac{dS_x}{dt} &= [2\beta + \alpha\dot{x}^2 + k_1x^2 - 1]\dot{x} \cdot \dot{x}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $\xi(t)$ описывает случайные возмущения с заданной функцией плотности распределения вероятностей; $u(t)$ задает искомую оптимальную управляющую силу; S_x представляет производство энтропии в ОУ.

Физической (реологической) моделью (2) ОУ является электромеханическая часть подвески движущегося объекта (автомобиля, мотоцикла, железнодорожного вагона и т.п.) с повышенной нелинейной диссипацией для повышения эффекта гашения (компенсации) колебаний, которая описывается обобщенным уравнением типа Дуффинга - Ван дер Поля (Халмоща - Рендэра).

При условии $2\beta + \alpha\dot{x}^2 + k_1x^2 \leq 1$, система обладает локальной неустойчивостью и скорость производства энтропии отрицательна, т. е. $\frac{dS_x}{dt} \leq 0$.

Система (2) проявляет различное динамическое поведение при смене структурных параметров: если $\beta = 0.5$ (другие параметры, например, $\alpha = 0.3; k_1 = 0.2; k = 5$), то система, асимптотически устойчива; когда $\beta = -1$ (прочие параметры, такие же, как выше), система локально неустойчива и обладает автоколебательным режимом. Динамическая система (2) характеризуется на фазовом портрете областью притяжения (странным аттрактором).

На рис. 6 показаны свободные и вынужденные колебания, а также соответствующие фазовые портреты рассматриваемой системы при указанных параметрах.

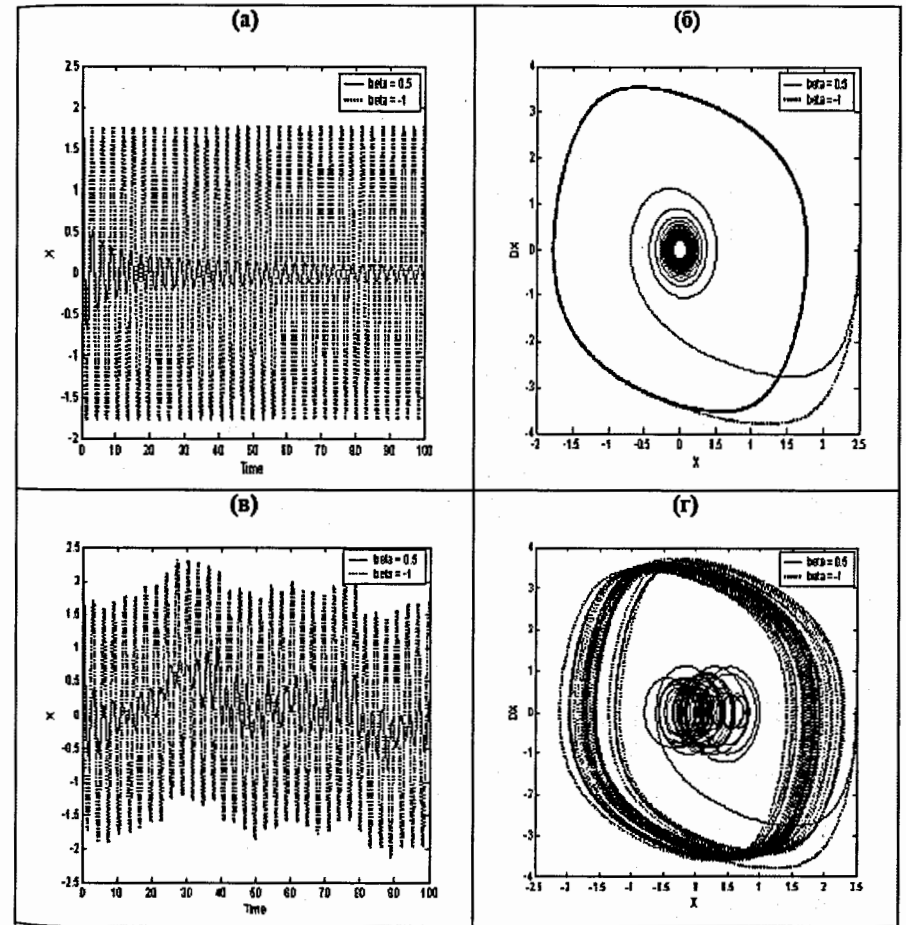


Рис. 6. Динамическое поведение ОУ: (а) – свободные колебания; (б) – фазовый портрет свободных колебаний; (в) - вынужденные колебания; (г) - фазовый портрет вынужденных колебаний

Отметим особенность условий управления ОУ: при малых колебаниях система (2) локально неустойчива, что создает трудности в проектировании робастного управления данной системой при задающем сигнале (цели управления) типа $x = 0$ и наличии малых случайных возмущений.

На рис. 7(а, б) показаны производство и скорость производства энтропии в динамическом поведении ОУ (режим свободных колебаний) в зависимости от изменения параметра β в (2).

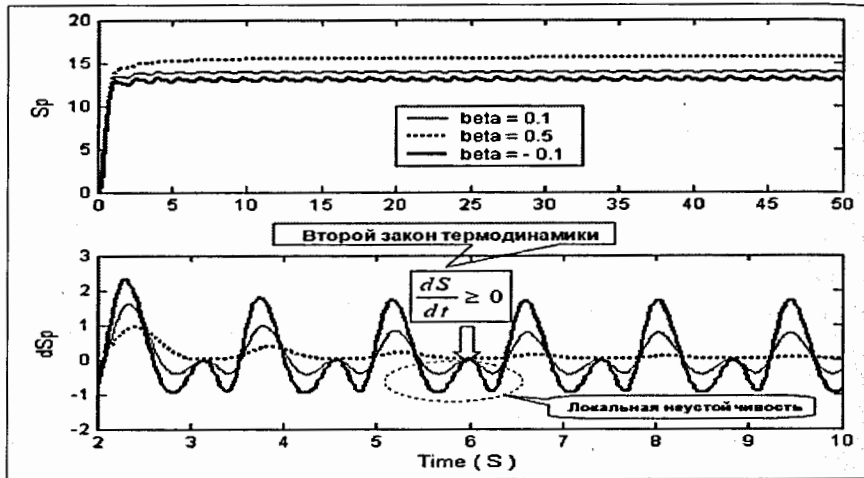


Рис. 7. Термодинамическая интерпретация феномена локальной неустойчивости

А. Рассмотрим следующие ситуации обучения.

Ситуация обучения для проектирования БЗ НР1 – FC1. В качестве исходных параметров системы (2) примем $\beta = 0.5$; $\alpha = 0.3$; $k_1 = 0.2$; $k = 5$ и начальные условия равными x_0 ; $\dot{x}_0 = 2.5$; 0.1 ; задающий сигнал $x_{ref} = 0$; область изменения коэффициентов усиления $[0, 10]$; внешнее возмущение - случайное воздействие с Рэлеевским законом распределения вероятностей. Данную ситуацию управления обозначим TS1.

Ситуация обучения для проектирования БЗ НР2 – FC2. В качестве исходных параметров системы (2) примем $\beta = -1$; $\alpha = 0.3$; $k_1 = 0.2$; $k = 5$ и начальные условия: x_0 ; $\dot{x}_0 = 2.5$; 0.1 ; задающий сигнал $x_{ref} = -1$; область изменения коэффициентов усиления примем $[0, 10]$; внешнее возмущение (как и в TS1) - случайное воздействие с Рэлеевским законом распределения вероятностей. Данную ситуацию управления выделим как TS2.

БЗ для данных ситуаций обучения (TS1, TS2) были спроектированы в Главе 4. Случайный сигнал воздействия на систему (2) с Рэлеевским законом распределения вероятностей моделировался (см. рис. 3) с помощью нелинейного формирующего фильтра. Используя инструментарий ОБЗ и ОС, полученный с помощью стохастического моделирования с ГА, для заданных ситуаций обучения были спроектированы БЗ1(КВ1) и БЗ2(КВ2) для НР1(FC1) и НР2(FC2) при воздействии Рэлеевского шума соответственно, которые оптимально аппроксимировали ОС (с точки зрения принятой функции пригодности и заданных ситуаций управления ОУ).

Особенности проектирования БЗ на основе ОБЗ. Для более полного восприятия результатов моделирования и проектирования НР отметим некоторые особенности программной поддержки ОБЗ (предварительно описанные в Приложении 1) и технические характеристики спроектированных на его основе БЗ для НР, а также приведем сравнение с результатом проектирования на инструментарии ННС типа AFM.

На рис. 8 приведена общая структура моделирования основных блоков НР и структура основных блоков программной поддержки проектирования БЗ. На рис. 8(в) показан пример встроенного в ОБЗ блока нечеткого вывода с использованием модели Сугено. Структурно ОБЗ имеет программный интерфейс сопряжения с МатЛаб, и программно сопряжен с блоком КНВ через встроенный интерфейс (см. Приложение 1).

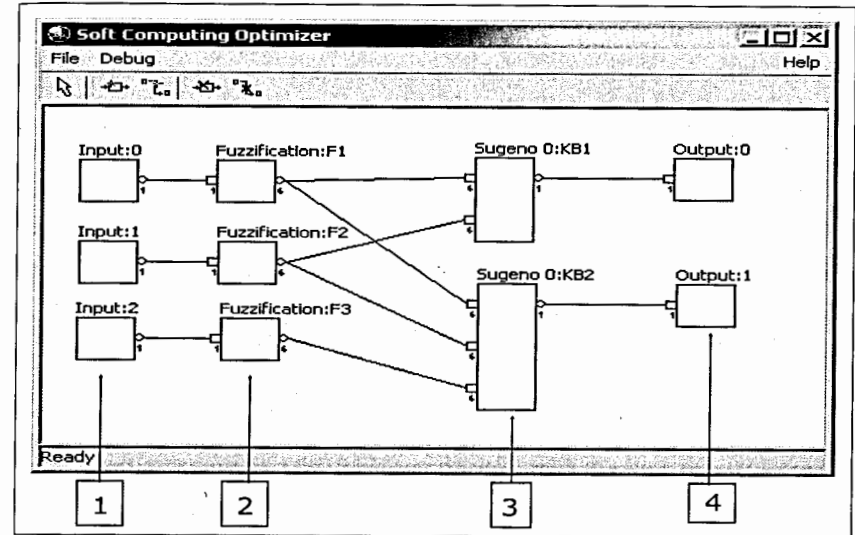


Рис. 8 (а)

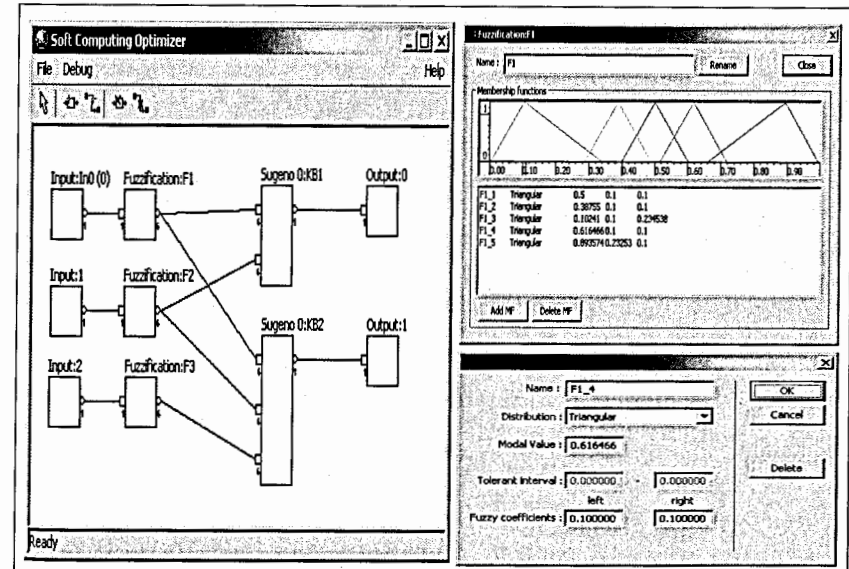


Рис. 8 (б)

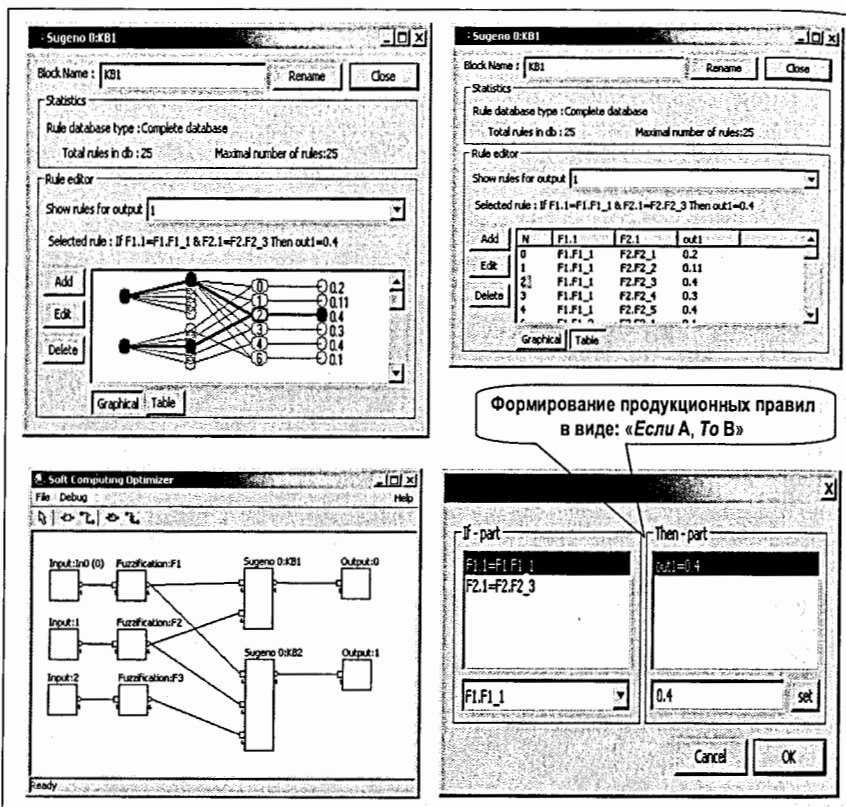


Рис. 8. Структура программной поддержки проектирования БЗ в НР

(а) – структура проектируемого НР; 1- порт входа; 2- фазификатор; 3- блок нечеткого вывода и дефазификатора; 4- порт выхода; (б) – фазификатор; (в) – блок нечеткого вывода

Рассмотрим кратко процесс проектирования ОС оптимального управления как выходного сигнала БЗ в НР. В качестве ситуации обучения примем ситуацию TS1. В этом случае критерий качества управления в виде минимума ошибки управления рассматривается как функция пригодности ГА с пространством поиска коэффициентов усиления (0,5).

Для проектирования БЗ в заданной ситуации управления задаются: 1) три входные переменные $\{e, \dot{e}, \int edt\}$, описывающие динамическое поведение ошибки управления; и 2) три выходные переменные $\{k_p, k_d, k_i\}$, представляющие коэффициенты усиления, проектируемого нечеткого ПИД-регулятора.

В ОБЗ процесс проектирования БЗ дал следующие характеристики: 1) количество функций принадлежности для каждой выходной лингвистической переменной (7,9,9) (оптимально определяемые ГА1), соответственно; 2) полное количество продукционных нечетких правил $7 \times 9 \times 9 = 567$; 3) оптимальное число выбранных для БЗ продукционных правил по критерию частоты запроса из БЗ составило 20; (3) оптимальное число продукционных правил, отобранных ГА2 составило 20.

На рис. 9 представлен оптимальный вид функций принадлежности для третьей выходной переменной k_i (коэффициент усиления интегральной ошибки).

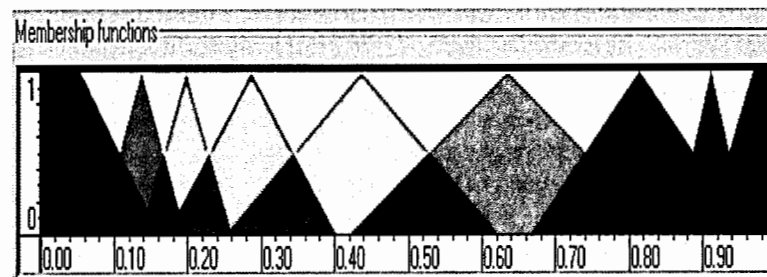


Рис. 9. Оптимальный вид функций принадлежности для описания третьей выходной лингвистической переменной

Для сравнения приведем на рис. 10 результаты работы с ННС типа AFM.

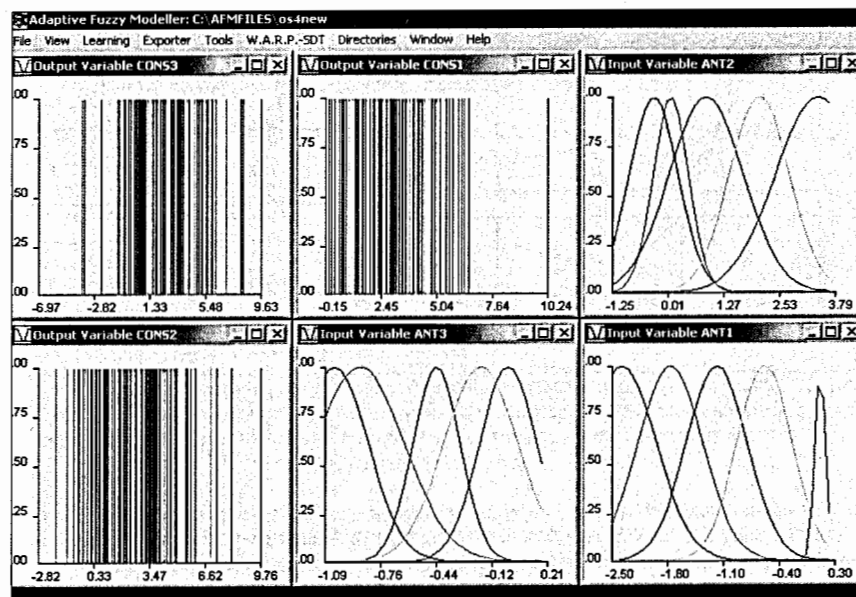


Рис. 10. Пример выбора функций принадлежности в ННС

Число заданных вручную функций принадлежности составил 5 по каждой лингвистической переменной; полное число продукционных нечетких правил составило 125; и число активированных правил также составило 125.

В AFM число и вид функций принадлежности определяются экспертом, в то время как в ОБЗ все операции проектирования автоматизированы оптимальным образом на основе ГА.

Анализ результатов показал, что структура БЗ с указанными параметрами, спроектированная на основе ОБЗ, обеспечивает более высокий уровень робастности НР по сравнению с ННС (125 правил) и ПИД-регулятором с постоянными параметрами (5,5,5).

Б. Сформулируем следующие задачи управления:

1) перевести ОУ из начального состояния $x_0, \dot{x}_0 = 2.5, 0.1$ в конечное заданное состояние (представляющее задающий сигнал (ЗС)) при внешних шумах, действующих на ОУ, при наличии изменений параметров модели ОУ и целей управления (ЗС);

2) провести оценки чувствительности и уровня робастности спроектированных НР(1,2), сравнить с традиционным ПИД-регулятором и самоорганизующимся регулятором с БД, полученной на основе применения КНВ в непредвиденной ситуации управления.

На рис. 11 показаны результаты моделирования процессов управления в указанных условиях для ситуации TS2.

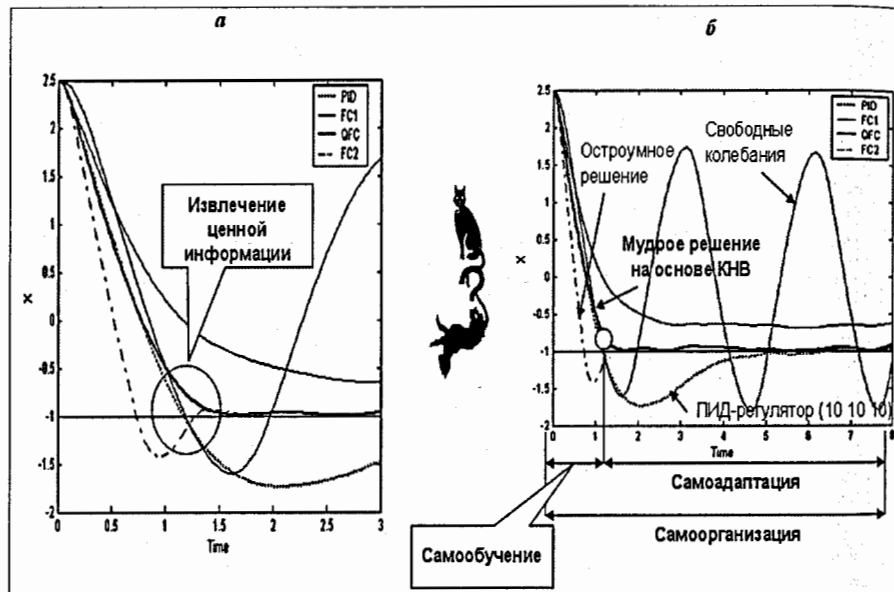


Рис. 11. Результаты моделирования робастного управления нелинейным ОУ самоорганизующимся НР в непредвиденной ситуации управления: а - формирование процесса самообучения интеллектуального НР; б - формирование процесса самоадаптации интеллектуального НР

В этом случае для НР1 данная ситуация управления является непредвиденной (существенно изменился параметр структуры ОУ и цель управления). Анализ результатов моделирования дан ниже. На рис. 12(а) приведен используемый для моделирования рэлеевский шум и на рис. 12(б) - полученные с помощью КНВ законы управления коэффициентами усиления при использовании реакции двух БЗ НР(1,2) на непредвиденную ситуацию управления.

В. Анализ результатов моделирования и физическая интерпретация процесса самоорганизации в НР. Рисунок 11(а) отражает основные преимущества и работу принципа самоорганизации. На этапе переходного процесса самоорганизующийся НР качественно следует по траектории традиционного ПИД-регулятора, но с уменьшенным интегральным коэффициентом усиления (см. рис. 12(б)). За счет снижения указанных коэффициентов усиления понижается расход ресурса в виде полезной работы ПИД-регулятора (значение произведенной энтропии). На данном этапе используется движение самого ОУ (на этапе переходного процесса до достижения ОУ цели управления коэффициенты усиления самоорганизующегося ПИД-регулятора имеют постоянные значения).

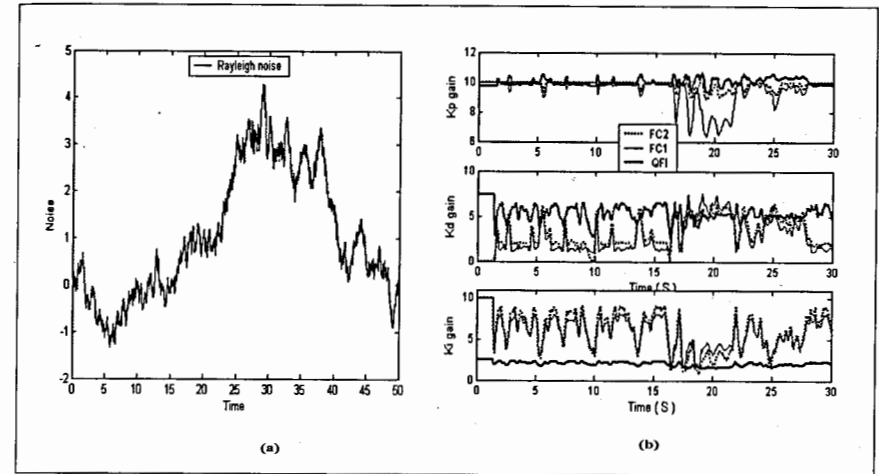


Рис. 12. Виды случайного процесса с рэлеевской функцией распределения вероятностей (а) и законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора (б)

На рис. 13 приведены значения обобщенных энтропий системы «ОУ+НР», вычисленные в соответствии с (2).

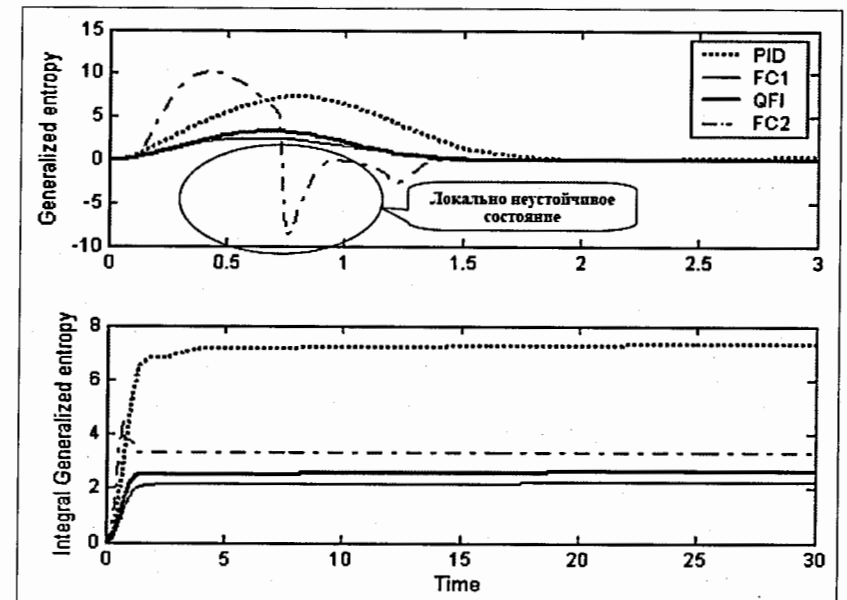


Рис. 13. Динамическое поведение обобщенных энтропий (ОУ+НР): (а) – временная обобщенная энтропия; (б) – накопленное значение обобщенной энтропии

В этом случае корректно устанавливаются необходимые соотношения между качественными и количественными определениями устойчивости по Ляпунову, управляемости и робастности процессов управления заданным ОУ. До достижения цели управления (ЗС управления, равного в данном случае -1) реализуется процесс самообучения НР и извлечение ценной информации из результатов реакций двух НР на непредвиденную ситуацию управления в реальном времени с помощью квантовой корреляции.

Поскольку в квантовую корреляцию входит информация о текущих значениях соответствующих коэффициентов усиления, то самоорганизующийся НР использует для достижения цели управления в результате преимущество быстродействия НР2 и аперриодический характер динамического поведения НР1.

Как следствие обеспечивается повышенное качество управления.

Напомним, что для рассматриваемого случая НР2 был обучен на ситуацию управления TS2, а для НР1 ситуация TS2 является непредвиденной (существенно изменился параметр структуры ОУ и цель управления). Поэтому за счет квантовой корреляции осуществляется координация между соответствующими законами управления. За счет данного эффекта самообучающийся НР извлек ценную информацию о перегулировании НР2 и реакции НР1 на непредвиденную ситуацию управления, использовал в законах управления коэффициентами усиления данные о быстродействии (рис. 11(a)) НР2 и перешел на режим самоадаптации, сохранив преимущество аперриодического процесса НР1 (достижение цели управления без перегулирования). Подчеркнем, что сам НР1 в данной ситуации цели управления не достигает (рис. 11), а НР2 имеет перегулирование и локально неустойчиво (рис. 13).

Пример 3: Робастное управление в непредвиденной ситуации управления. В примере 2 была рассмотрена оценка робастности ИСУ на обучающих ситуациях, когда одна из ситуаций TS2 была непредвиденной для первого НР (существенно изменились параметр β (в структуре ОУ) и цель управления), обученного на ситуацию TS1. Несмотря на парадоксальный факт, что сам НР1 в данной ситуации цели управления не достигает (см. рис. 11), а использование НР2 приводит к перегулированию и локально неустойчивому движению ОУ (см. рис. 13), самоорганизующийся НР с использованием КНВ успешно справился с задачей управления.

Ставится вопрос: сохраняется ли данный эффект применения КНВ в более сложных (чем на ситуациях обучения) непредвиденных ситуациях управления?

Для ответа на поставленный вопрос рассмотрим более сложную непредвиденную (одновременно для НР1 и НР2) ситуацию управления.

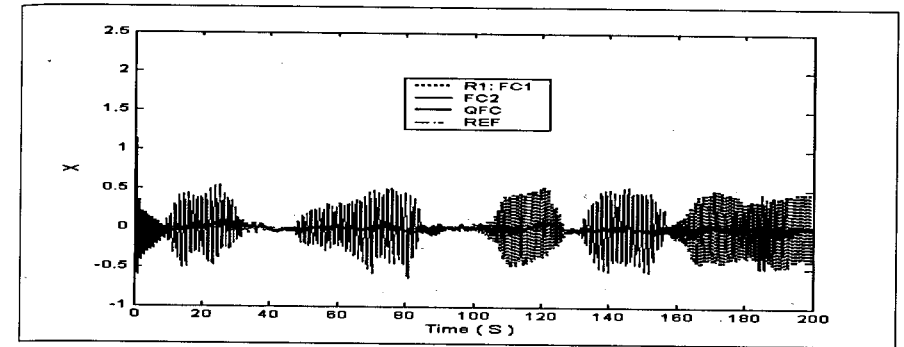
Для создания новой непредвиденной ситуации управления в блок-схему на рис. 1 введем новые формирующие параметры. Так, для новой ситуации управления были заданы: 1) задающий сигнал (цель) управления $x_{ref} = 0$; 2) внешний Рэлеевский шум (см. рис. 12(a)); 3)

новый параметр $\beta = -0.1$ в модели ОУ; 4) ограничение на силу управления $u \leq |10| [N]$; 5) в систему измерения введен случайный Гауссовский шум с коэффициентом усиления равным 0.02; 6) введена временная задержка сигнала ошибки управления, равная 0.0125 сек. Остальные параметры ОУ остались неизменными.

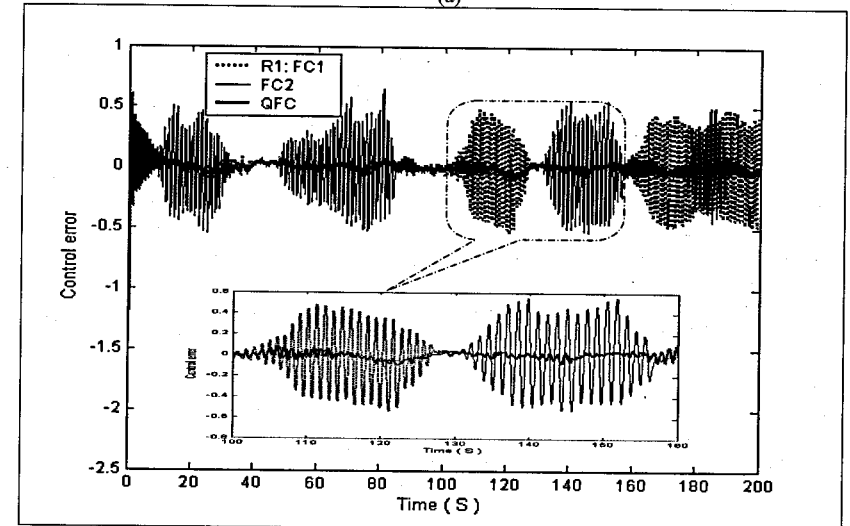
Таким образом, непредвиденная ситуация управления содержит шумы в системе измерения, задержку информации для НР1 и НР2 о текущем значении ошибки управления и скачкообразное изменение параметра в структуре ОУ.

Рассмотрим результаты моделирования для оценки робастности рассматриваемых НР.

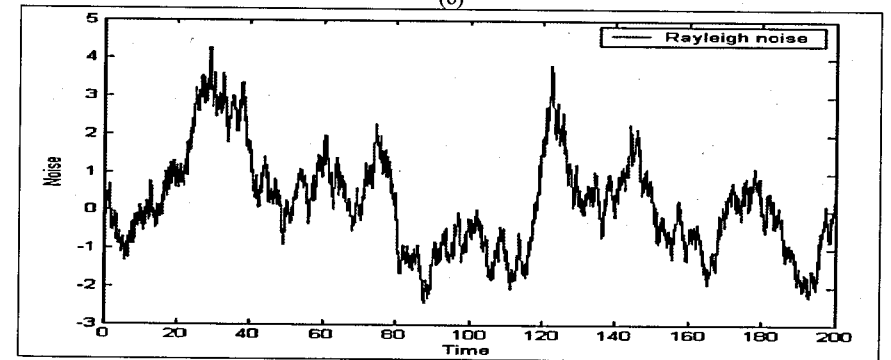
На рис. 14 показан результат моделирования динамического поведения ошибки управления, а на рис. 15 приведен результат моделирования динамики интегральной квадратичной ошибки управления.



(a)



(б)



(в)

Рис. 14. Оценка робастности в новой ситуации управления: (а) движение системы; (б) ошибка управления; (в) Рэлеевский шум

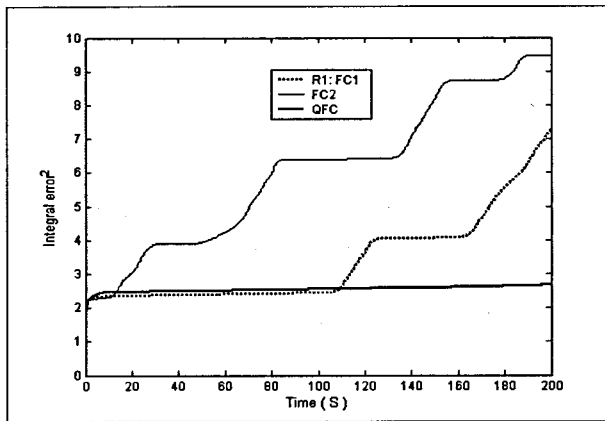


Рис. 15. Оценка робастности в новой ситуации управления: динамика интегральной квадратичной ошибки управления

Полученные законы управления изменением коэффициентов усиления и силы управления при заданных физических ограничениях приведены на рис. 16 и 17, соответственно.

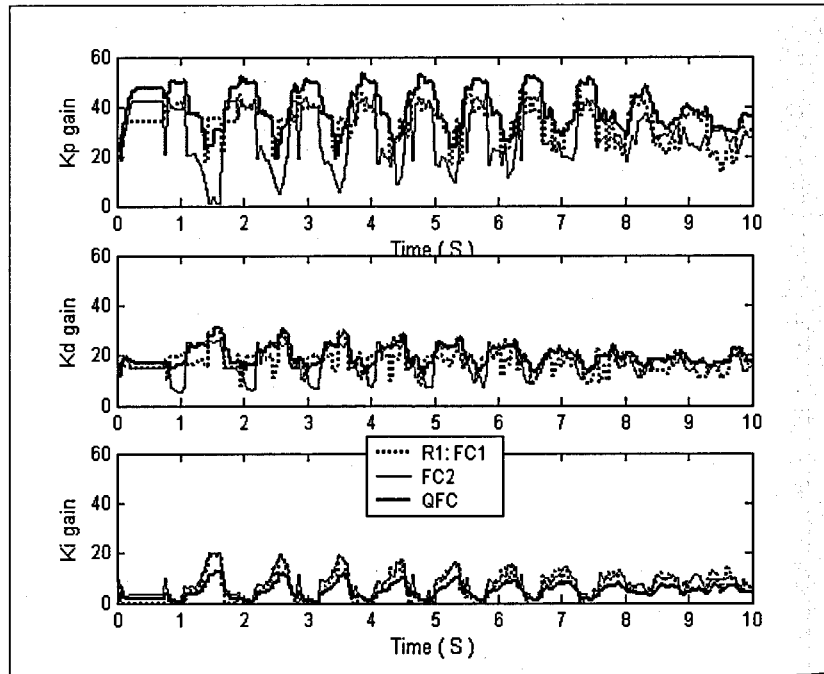


Рис. 16. Оценка робастности в новой ситуации управления: самоорганизация законов управления коэффициентами усиления квантового нечеткого ПИД- регулятора

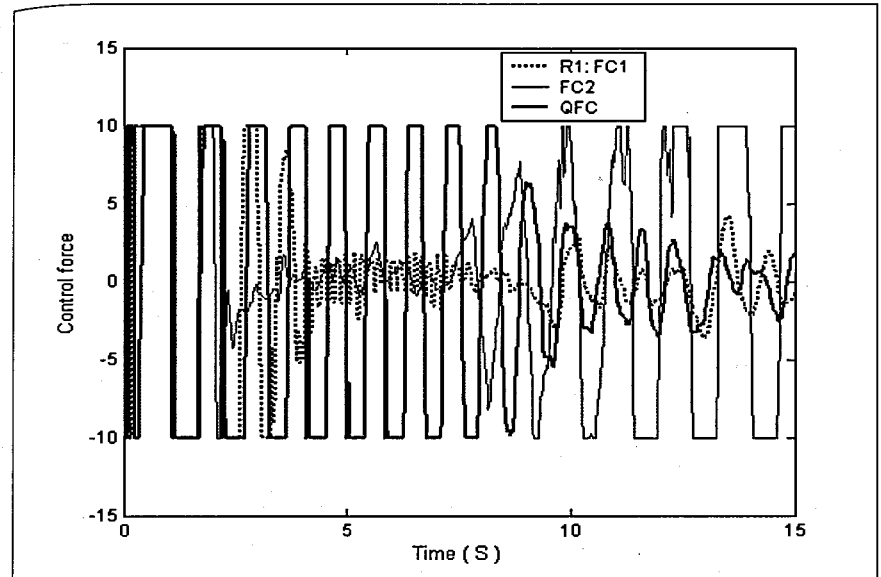


Рис. 17. Оценка робастности в новой ситуации: динамика управляющего воздействия

Рисунок 18 отражает потери ресурса ИСУ в виде возрастания интегральной обобщенной энтропии в системе «ОУ + нечеткий ПИД-регулятор».

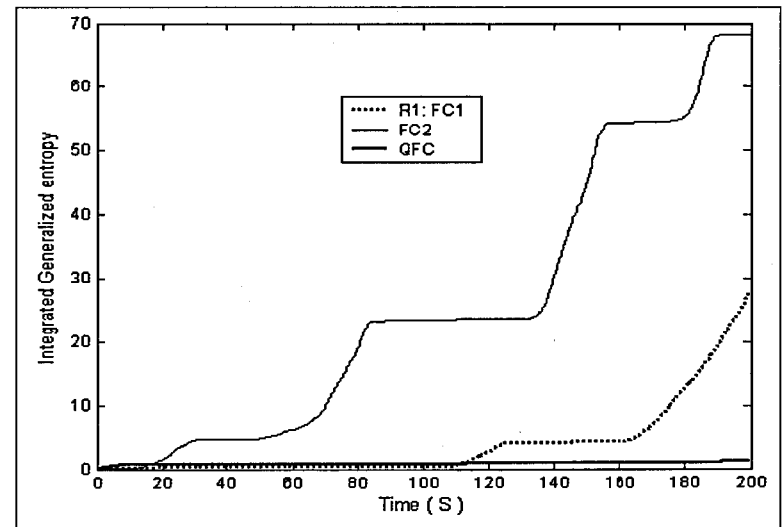


Рис. 18. Оценка робастности в новой ситуации управления: динамика интегральной обобщенной энтропии

Анализ приведенных результатов показывает, что оба НР1 и НР2 не справляются с поставленной задачей управления и имеют большой расход ресурса. В отличие от данных НР, с помощью КНВ самоорганизующийся НР извлеч из динамического поведения ОУ, НР1 и НР2 ценную скрытую квантовую информацию и достиг цели управления с наименьшими потерями ресурса.

Таким образом, в сложной непредвиденной ситуации управления сохраняется эффект применения модели КНВ, что и является ответом на поставленный вопрос.

Подчеркнем, что примеры 2 и 3 служат только иллюстрацией возможностей применения разработанной модели КНВ в задачах проектирования ИСУ с повышенным уровнем робастности в непредвиденных ситуациях управления. Более подробный анализ эффективного применения модели КНВ требует самостоятельного обсуждения и здесь не рассматриваются. Отметим только первоочередные задачи исследования эффективного применения разработанной модели КНВ: ОУ с глобальной динамической неустойчивостью, с различными типами неустойчивостью по обобщенным координатам (с локальной и глобальной неустойчивостью), различным сочетанием внутренних и внешних шумов, изменением параметров структуры ОУ, оценка потерь ресурса, сложность обработки и физической реализации законов управления, а также многие другие смежные вопросы.

Результаты моделирования показали преимущество квантовых стратегий управления на основе КНВ, позволяющих спроектировать универсальный робастный НР из двух не робастных НР(1,2) с простыми законами управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора.

Таким образом, процесс самоорганизации может быть условно разделен на взаимодополняющие процессы самообучения и самоадаптации, повышающие уровень робастности интеллектуальных процессов управления в режиме реального времени.

Примечание 18. С точки зрения квантовой теории игр данный эффект является демонстрацией «Паррondo парадокса»: в игровой ситуации (в непредвиденной ситуации управления) между двумя классическими НР(1,2) (игроки А и В соответственно), которые не являются победителями при использовании классических стратегий в различных ситуациях управления, с помощью квантовой стратегии принятия решений на основе КНВ можно спроектировать из них победителя в виде нового самоорганизующегося НР. Подобный эффект описан также в Главе 3.

Рассмотренный пример иллюстрирует эффективность методологии применения квантовых вычислений для решения алгоритмически неразрешимых классических задач в теории и практике интеллектуального нечеткого управления, представленных в Главах 1, 2 и 3.

Приложение П1

Оптимизатор баз знаний на основе квантовых вычислений для проектирования самоорганизующихся нечетких регуляторов: Программный инструментарий

Рассматривается новая технология проектирования робастных ИСУ на основе Оптимизатора Баз Знаний на квантовых вычислениях. Рассматривается метод самоорганизации БЗ нечетких регуляторов на основе соответствующего квантового алгоритма. Дается краткое описание программного инструментария Оптимизатора Баз Знаний на основе квантовых вычислений и описываются результаты моделирования управления движением глобально-неустойчивого объекта управления («Каретка –маятник») с помощью спроектированного квантового нечеткого контроллера.

П1.1. Квантовый оптимизатор баз знаний и программный инструментарий

Для проектирования квантового контроллера (рис. П1.1) разработан новый программный продукт, называемый «Оптимизатор Баз Знаний на квантовых вычислениях», являющийся продвинутым дополнением к ранее разработанному инструментарию ОБЗ на мягких вычислениях.

Структура квантового регулятора на основе КНВ показана на рис. П1.1.

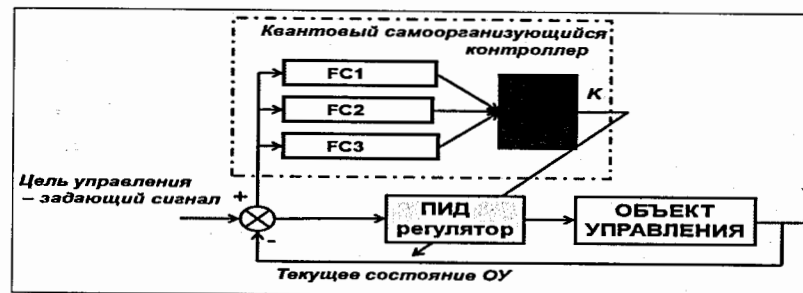


Рис. П1.1. Структура квантового контроллера на основе КНВ

Примечание 19. Для простоты в дальнейшем будем называть ОБЗ на квантовых вычислениях - квантовым оптимизатором. Будем использовать также сокращение ОБЗ2.

ОБЗ на квантовых вычислениях (ОБЗ2) предназначен для проектирования самоорганизующихся квантовых контроллеров и представляет собой программный инструментарий, позволяющий спроектировать несколько структур контроллеров с помощью КНВ (с разными типами квантовых корреляций) и выбрать из них наилучшую с точки зрения повышенной робастности. ОБЗ2 реализован в виде программной системы.

В качестве языка программирования при реализации данной системы был выбран язык C++ (Microsoft Visual Studio.net). Алгоритмическая часть, отвечающая за реализацию основных этапов алгоритмов оптимизации, была выполнена платформно независимо.

Графический интерфейс, представленный на рис. П1.2, разработан для операционных систем семейства Win32 и был протестирован на PC с различными установленными версиями операционной системы Windows.

Основное программное меню квантового оптимизатора (т.н. модельное окно) показано на рис. П1.2. Модельное окно ОБЗ2 позволяет строить различные модели управления на основе алгоритма КНВ. Главное меню ОБЗ2 обеспечивает доступ к функциям создания, редактирования моделей, а также к функции оптимизации параметров КНВ. Для создания

модели, показанной на рис. П1.2, выбираем в главном меню опции «File» и «New» и попадаем в окно, где надо указать число входных переменных в блок КНВ (для трех БЗ это равно 9), число выходных переменных (3) и размер состояния квантовой корреляции (для трех БЗ это число 6).

Далее попадаем в основное окно, где описываются заданные переменные и тип квантовой корреляции (например, так, как показано на рис. П1.2). В окне рис. П1.2 описываются входные данные блока, их гистограммы, выходные данные блока, коэффициенты шкалирования «Scale» (которые находятся с помощью ГА), а также тип квантовой корреляции. В окне «Delay time» задается параметр, связанный с параметром временной квантовой корреляции Δt . В окне «Time step» описывается время управления (моделирования движения ОУ в MatLab/Simulink-модели или в реальной физической модели). Для описания квантовой корреляции имеется окно «Correlation matrix». В случае, представленном на рис. П1.2, описана временная квантовая корреляция для алгоритма КНВ с тремя БЗ.

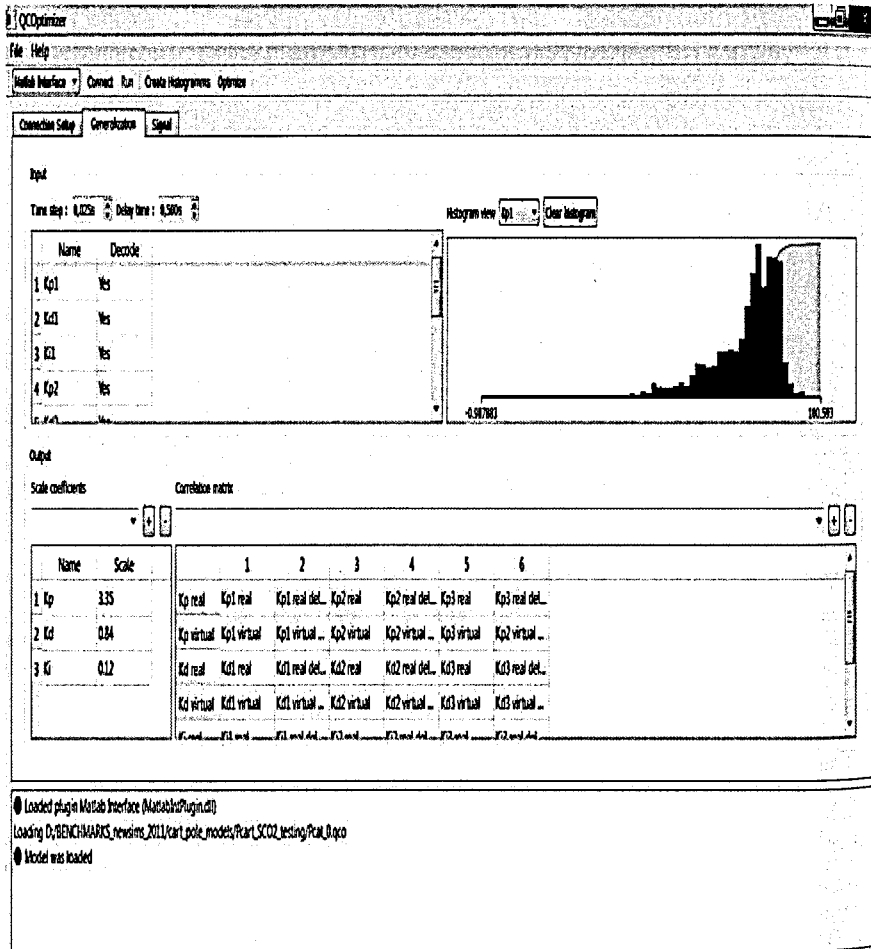


Рис. П1.2. Основное программное меню квантового оптимизатора

Обсудим данное представление. Временная квантовая корреляция может быть представлена в следующем виде: $k_p^1(t) \otimes k_p^1(t - \Delta t) \otimes k_p^2(t) \otimes k_p^2(t - \Delta t) \otimes k_p^3(t) \otimes k_p^3(t - \Delta t) \rightarrow k_p^{new}(t)$, где индексы 1, 2, 3 означают номера нечетких регуляторов (их БЗ соответственно), а \otimes - операция тензорного произведения квантовых состояний. В соответствии с указанной корреляцией будет вычисляться новое значение $k_p^{new}(t)$ как результат самоорганизации значений

$$k_p^1(t), k_p^1(t - \Delta t), k_p^2(t), k_p^2(t - \Delta t), k_p^3(t), k_p^3(t - \Delta t).$$

Для временной квантовой корреляции корреляционная матрица «Correlation matrix» представляется в виде следующей табл. П1.1.

Таблица П1.1.

	1	2	3	4	5	6
Kp real	Kp1 real	Kp1 real del	Kp2 real	Kp2 real del	Kp3 real	Kp3 real del
Kp virtual	Kp1 virtual	Kp1 virt del	Kp2 virtual	Kp2 virt del	Kp3 virtual	Kp3 virt del
Kd real	Kd1 real	Kd1 real del	Kd2 real	Kd2 real del	Kd3 real	Kd3 real del
Kd virtual	Kd1 virtual	Kd1 virt del	Kd2 virtual	Kd2 virt del	Kd3 virtual	Kd3 virt del
Ki real	Ki1 real	Ki1 real del	Ki2 real	Ki2 real del	Ki3 real	Ki3 real del
Ki virtual	Ki1 virtual	Ki1 virt del	Ki2 virtual	Ki2 virt del	Ki3 virtual	Ki3 virt del

На основе построенной корреляционной матрицы строится суперпозиция запутанных состояний. Коэффициенты шкалирования $gain_{P(D,i)}$ для алгоритма КНВ находятся с помощью ГА. Для этого в главном меню ОБЗ2 имеется кнопка «Optimize». Нажав ее, попадаем в окно параметров оптимизации и далее в сам процесс оптимизации (поиска коэффициентов шкалирования). Но перед этим в окне «Connection Setup» надо прописать путь доступа к MatLab/Simulink-модели и функциям инициации, пригодности и окончания сессии. Например, так, как показано на рис. П1.3.

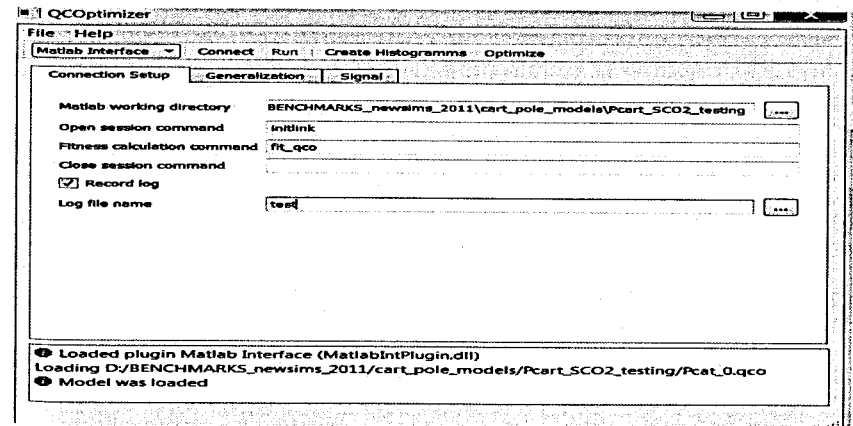


Рис. П1.3. Окно установок доступа к MatLab/Simulink- модели и фитнес функции

Нажав кнопку «Optimize» и подтвердив далее параметры ГА, активизируем процесс поиска ГА. При этом возникает окно, показывающее состояние процесса оптимизации (рис. П1.4).

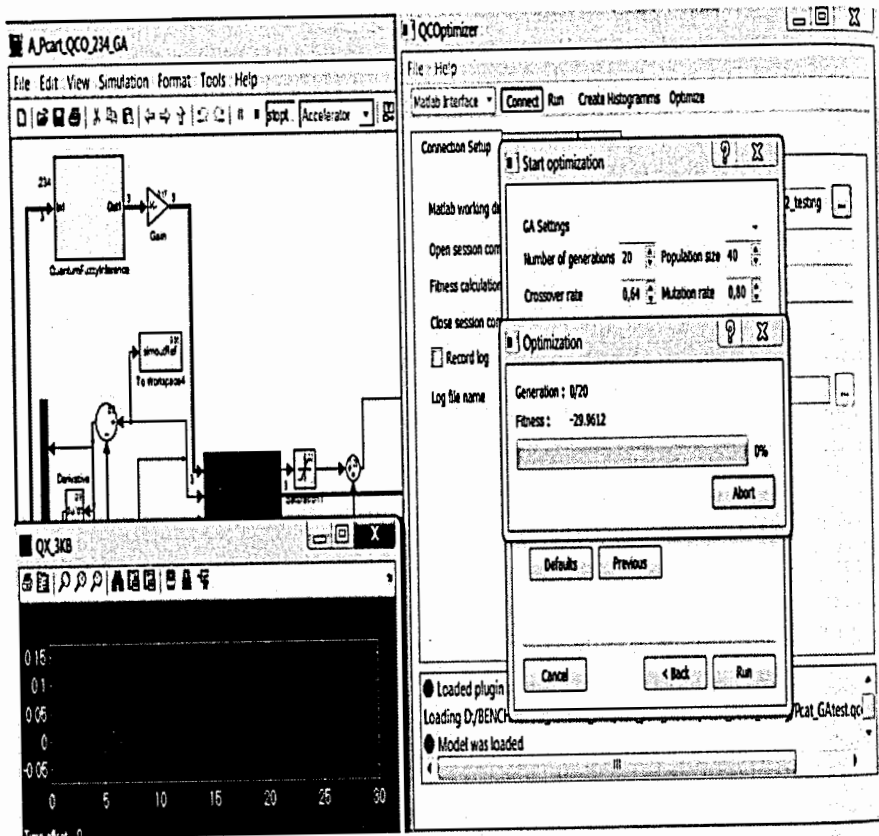


Рис. П1.4. Окно процесса оптимизации (справа) и текущая модель ОУ в MatLab/Simulink (слева)

Процесс (окно процесса оптимизации показано на рис. П1.4 справа) можно остановить кнопкой «Abort All». По умолчанию, лучшее решение запоминается в блоке модели КНВ. ОБЗ2 сохраняет файл с моделью в формате «имя.qco», который затем используется в квантовом нечетком регуляторе (КНР). КНР является либо блоком в среде MatLab/Simulink-модели управления заданным ОУ, либо может быть связан с реальным физическим ОУ.

П1.2. Программная поддержка и особенности процесса проектирования робастных БЗ для самоорганизующихся НР с применением КНВ

На рис. П1.5 показано основное программное меню КНВ.

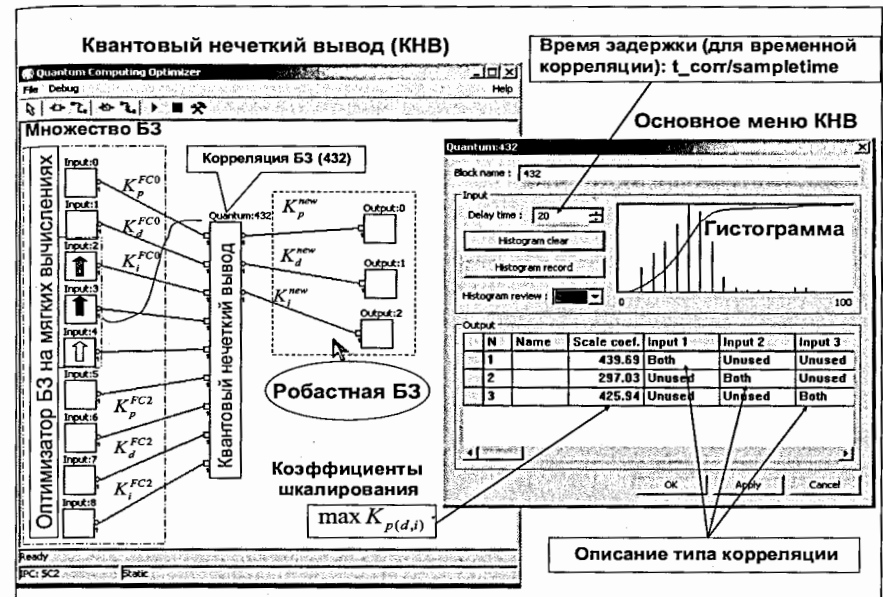


Рис. П1.5. Основное меню КНВ с использованием квантового оптимизатора БЗ

В разделе П1.1 рассмотрен конкретный КА в КНВ, который может быть реализован на классическом компьютере в виде квантовой алгоритмической ячейки (КАЯ) в соответствии с технологией проектирования, разработанной в Главе 3. В данном разделе рассмотрена структура программного продукта КАЯ разработанного для реализации КНВ на классическом компьютере.

П1.2.1. Программная реализация (версия 1.1) операторов модели КНВ

На рис. П1.6 отражена реализация блока квантовой самоорганизации БЗ в среде MatLab/Simulink на основе модели, используемой в структуре ИСУ на рис. 4.3.

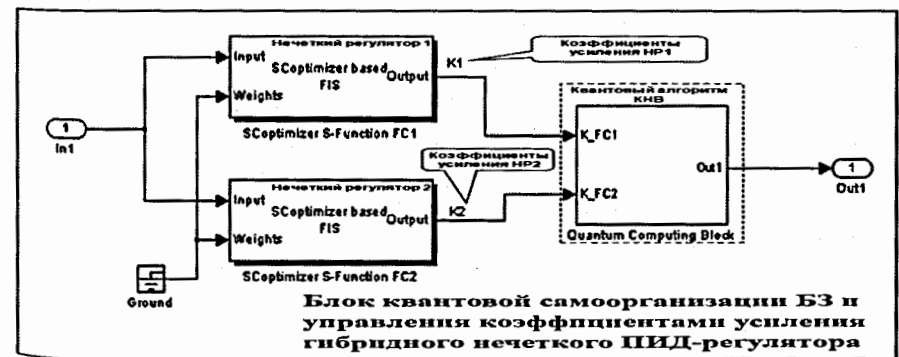


Рис. П1.6. Структурная реализация блока квантовой самоорганизации БЗ в среде MatLab / Simulink (первый уровень интегральной реализации)

Инициализация функций КНВ в разработанном программном продукте показана на рис. П1.7.

```

%this script prepares Histograms (probabilities) for all specified training pattern;
global Q_A_params;

% Case 4 oscillator, Example 3; beta= 0.1, Ref=0 DELAY=0.025; tc=0.05
% LIMITED control force U
Filename={'C:\sd31\U_TSD_FCO', '.pat'}; % Case 4 pattern file name for FCO
filename1={'C:\sd31\U_TSD_FCO', '.pat'}; % Case 4 pattern file name for FCO1

maxKp=50; % value used for Kp normalization
maxKd=30; % value used for Kd normalization
maxKi=20; % value used for Ki normalization
% CALCULATIONS
indexes=[4 5 6]; % indexes of columns of the pattern containing Kp, Kd and Ki
% after this script, probabilities and corresponding values will be
% allocated row wise, e.g. simulink block parameter P for Kp=P(1,:), and k for Kp will be X(1,:);
*****
pat=load(filename0);
P0=[];
X0=[];
for i=1:length(indexes);
    [P, X]=makeemp(pat(i, indexes(i)));
    P0=[P0; P];
    X0=[X0; X];
end
pat=load(filename1);
P1=[];
X1=[];
for i=1:length(indexes);
    [P, X]=makeemp(pat(i, indexes(i)));
    P1=[P1; P];
    X1=[X1; X];
end
Q_A_params={'1 1'} % for initialization
% NEW FCOnew TSD TEMP
% Q_A_params = [2.3969 2.0594 1.4125] % qel GOOD chosen
    
```

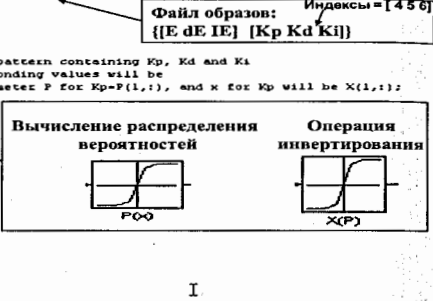


Рис. П1.7. Инициализация функций КНВ: MatLab/Simulink-функция (initQFI.m)

Рис. П1.8 показывает блок проектирования квантового состояния суперпозиции, который встроен в основное меню (см. рис. П1.5).

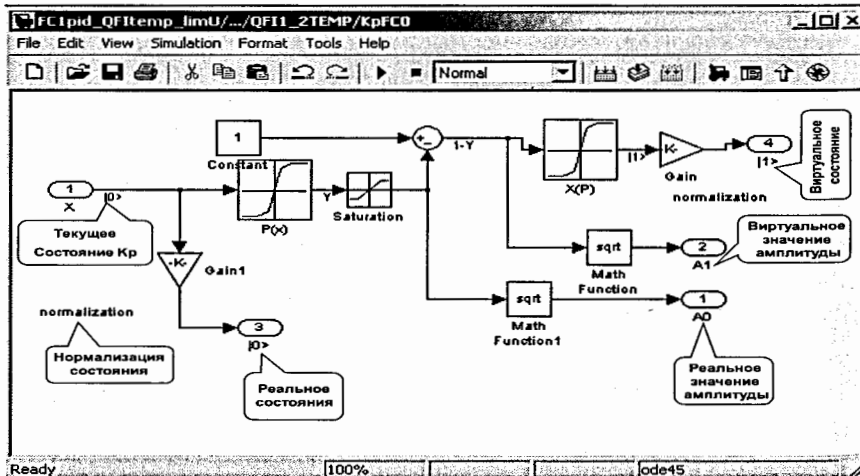


Рис. П1.8. Проектирование квантового состояния суперпозиции

Рис. П1.9 показывает в графической форме результат инициализации процесса формирования квантового состояния суперпозиции на основе преобразования Уолша-Адамара.

С помощью применения преобразования Уолша-Адамара организуется процесс формирования скрытой (ненаблюдаемой) смешанной корреляции в суперпозиции сигналов из двух классических БЗ НР; запутанные состояния моделируются квантовым оракулом, который может определить максимальную амплитуду вероятности на множестве соответствующих классических суперпозиционных состояний. По максимуму амплитуды вероятности (см. рис. 4.21) извлекается корреляционное состояние с помощью оператора интерференции (в виде оператора идентичности) совместно с процедурой классического измерения (наблюдения).

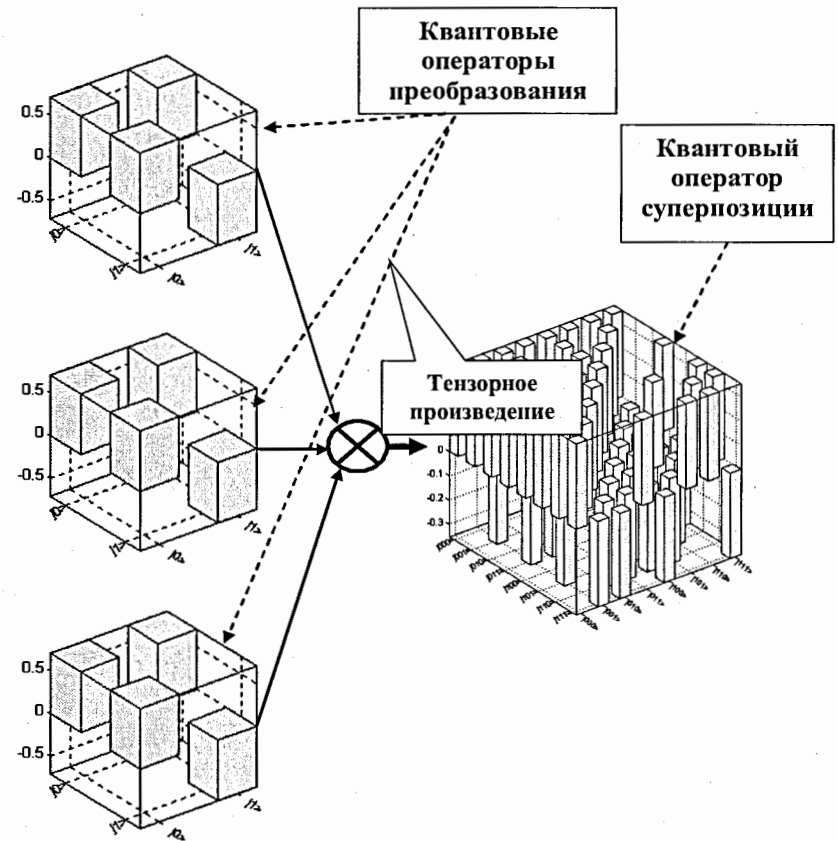


Рис. П1.9. Приготовление состояния суперпозиции на основе преобразования Уолша-Адамара и тензорного произведения

На рис. П1.10 представлены блоки формирования суперпозиции квантовых состояний для вычисления нового коэффициента усиления пропорциональности K_p , измерения максимального значения амплитуды вероятностей (рис. 1.21) и декодирования результата работы модели КНВ (выполнение этапа 5 алгоритма, описанного в Гл.1 (см. рис. 1.16)).

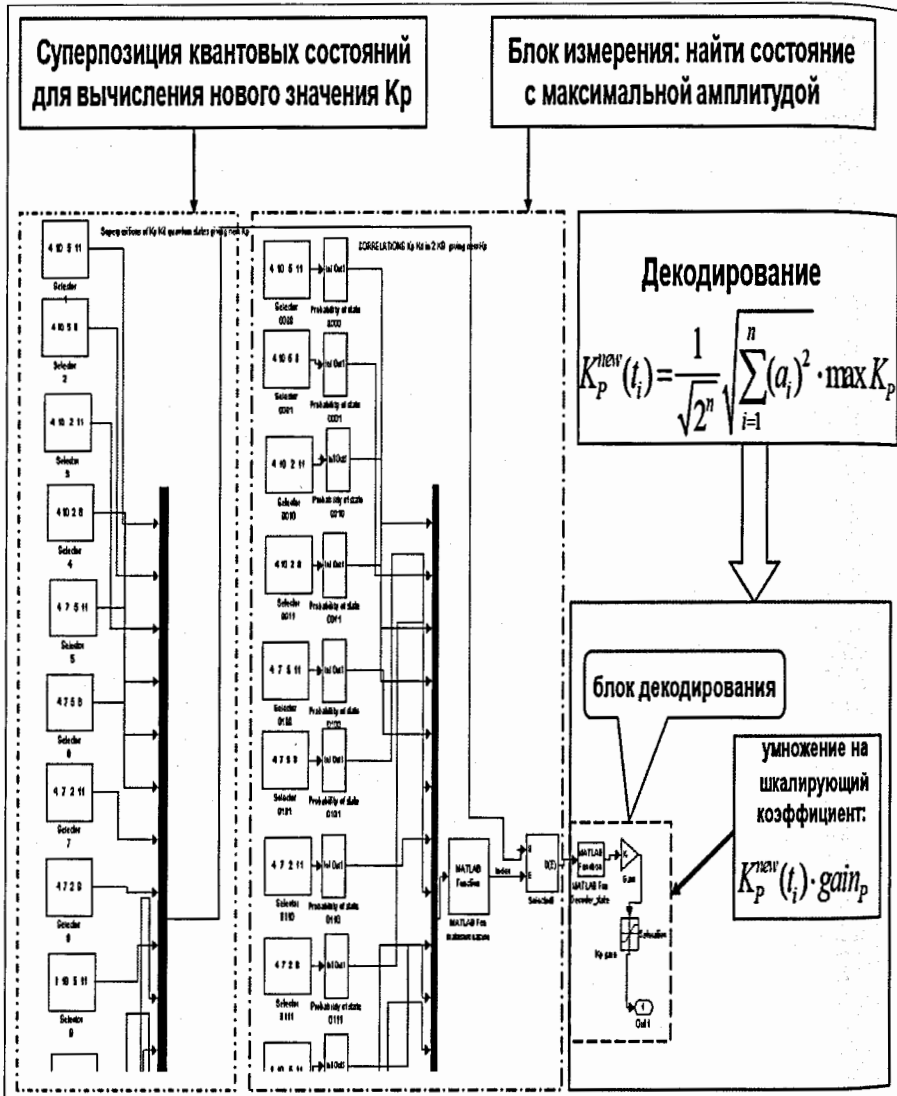


Рис. П1.10. Программная реализация блоков формирования суперпозиции квантовых состояний для вычисления нового коэффициента усиления пропорциональности K_p , измерения максимального значения амплитуды вероятностей и декодирования результата работы модели КНВ

Описание блоков на рис. П1.6 для процесса формирования входных сигналов в модели КНВ в среде MatLab/Simulink содержится на рис. П1.11.

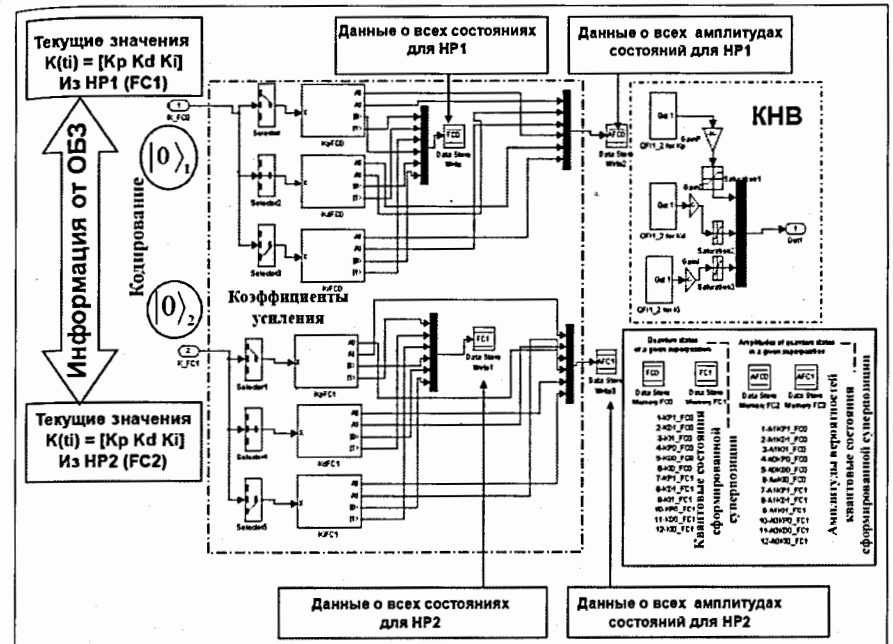


Рис. П1.11. Программная реализация блока квантовой самоорганизации БЗ для процесса формирования входных сигналов в модели КНВ в среде MatLab/Simulink (второй уровень поблочной реализации)

На рис. П1.12 приведен программный интерфейс и рабочие окна для работы с моделью КНВ при моделировании ИСУ в виде структуры на рис. 1.3(б).

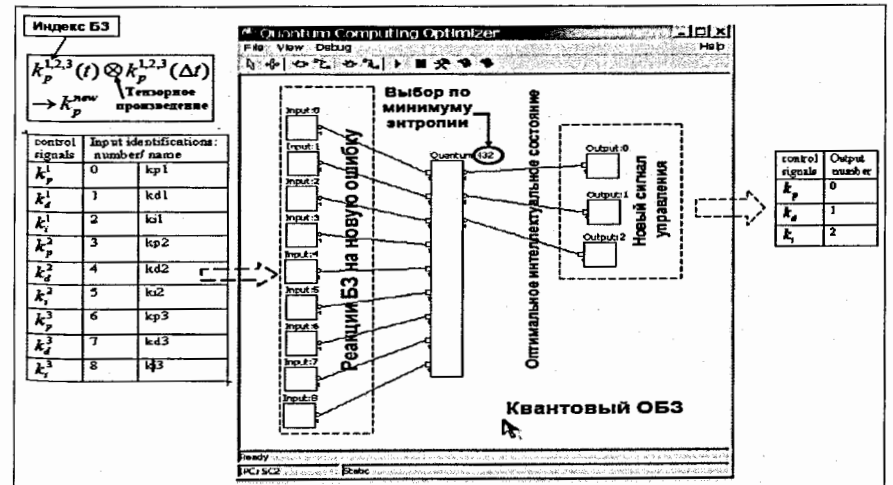


Рис. П1.12 (а)

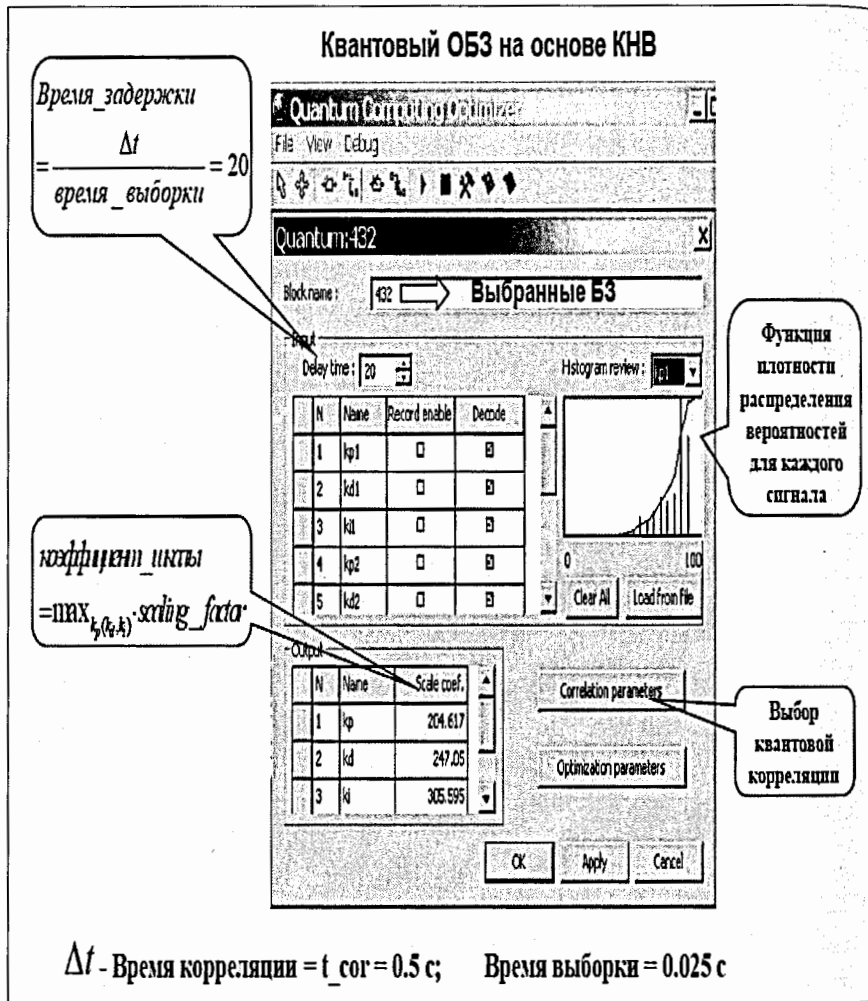


Рис. П1.12 (б)

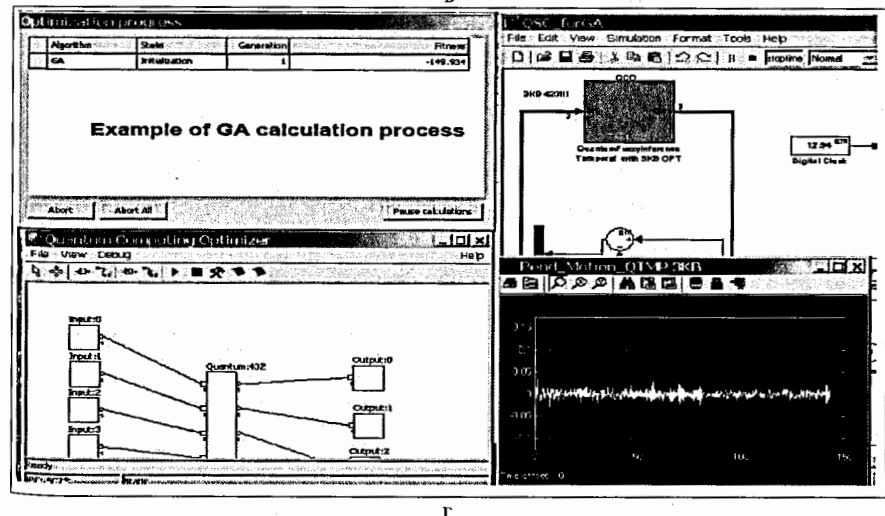


Рис. П1.12. Программный интерфейс и рабочие окна для работы пользователя с моделью КНВ: а - первый внутренний уровень ОБЗ на квантовых вычислениях; б - второй внутренний уровень ОБЗ на квантовых вычислениях; в - программная реализация интерфейса пользователя модели КНВ в среде MatLab/Simulink; г - пример моделирования ОУ в среде MatLab/Simulink (демонстрация результата моделирования системы «Каретка –маятник»)

алгоритм квантового сжатия данных; 2) существует сцепленное представление классической и квантовой информации в квантовом состоянии; 3) полная корреляция в квантовом состоянии представляет собой «смесь» классической и квантовой корреляций; 4) отсутствует скрытая (наблюдаемая, т.е. доступная извлечению) классическая корреляция в квантовом состоянии.

КНВ-алгоритм использует указанные четыре факта следующим образом: осуществляет сжатие классической информации путем кодирования в вычислительном базисе $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ и формирования квантовой корреляции между различными вычислительными базисами спроектированных БЗ (факт 1); разделяет и выполняет «сцепление» полной информации и корреляции на «классическую» и «квантовую» части, используя преобразование Адамара (факты 2 и 3); обеспечивает извлечение скрытой информации в квантовом состоянии и проводит операцию редукции избыточной информации в классическом сигнале управления (факт 4), применяя критерий максимума соответствующей амплитуды вероятности.

Поэтому перечисленные факты составляют основу информационного ресурса КНВ-алгоритма и дают возможность извлекать дополнительное количество ценной квантовой информации из индивидуальных робастных БЗ, а также использовать ее для проектирования робастных процессов управления с повышенным уровнем интеллектуальности. Основу прикладного эффекта составляют процедуры сжатия и редукции избыточной информации в классических сигналах управления. В следующих разделах статьи рассматривается применение данного информационного ресурса в структуре КНВ-алгоритма.

Особенности применения КНВ. Подчеркнем принципиально важную особенность работы КА (в модели КНВ) в процессе проектирования робастных законов управления коэффициентами усиления на основе спроектированных индивидуальных БЗ.

А. Робастные законы управления, проектируемые моделью КНВ, определяются в режиме обучения на выходных реакциях индивидуальных БЗ (с фиксированным набором производственных правил) на текущую непредвиденную ситуацию управления в виде сигналов управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора и реализуют процесс адаптации в реальном времени.

Такой эффект достигается только за счет использования законов квантовой теории информации в разработанной структуре КНВ (см. описание четырех фактов из квантовой теории информации). С точки зрения квантовой теории информации, структура КА в КНВ выполняет одновременно функции квантового фильтра. БЗ состоят из логических производственных правил, которые по заданной ошибке управления формируют законы изменения коэффициентов усиления в используемых нечетких ПИД-регуляторах. КА в этом случае позволяет извлечь необходимую ценную информацию из реакции двух (или более) БЗ на непредвиденную ситуацию управления за счет устранения дополнительной избыточности информации в законах изменения коэффициентов усиления используемых регуляторов. Выходным сигналом КНВ является новые законы изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора (см. рис. П1.14).

При этом для формирования робастной БЗ в реальном времени входом для КНВ могут служить любые сигналы обучения, полученные из индивидуальных БЗ независимо от используемого программного инструментария моделирования (или экспериментально полученных сигналов обучения) [см. Главу 2].

Б. На втором этапе проектирования с применением модели КНВ уже не требуется формирования новых производственных правил. Достаточно только в реальном времени получить реакцию производственных правил в используемых НР на текущую непредвиденную ситуацию управления в виде выходных сигналов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора. В этом случае для работы модели КНВ само знание сработанных в индивидуальных БЗ конкретных производственных правил не требуется. Наличие такой возможности дает большое преимущество, которое выражается в виде возможности проектирования процессов управления с требуемым уровнем робастности в реальном времени. При этом достижение требуемого уровня робастности в непредвиденной ситуации управления в ряде случаев может существенно зависеть от качества и количества используемых индивидуальных БЗ.

Следовательно, сам КА в модели КНВ служит физическим прототипом производственных правил, реализует программным путем «виртуальную» робастную БЗ для нечеткого ПИД-регулятора (для текущей непредвиденной ситуации управления) и является проблемно независимым инструментарием.

Приведенные факты дают возможность использовать экспериментальные данные обучающего сигнала без построения математической модели ОУ. Такой подход открывает новые перспективы использования КНВ в задачах управления ОУ со слабо формализованной структурой и большой размерностью фазового пространства управляемых параметров.

Таким образом, рассмотрены особенности использования программного продукта ОБЗ2 – «Оптимизатор Баз Знаний на квантовых вычислениях» – для проектирования самоорганизующегося квантового контроллера, способного выполнять функции управления заданным ОУ в широком классе ситуаций управления, включая непредвиденные (нештатные) ситуации. Основным блоком в ОБЗ2 является блок квантового нечеткого вывода – КНВ.

В результате применения КНВ в структуре ИСУ осуществляется извлечение дополнительной (скрытой) квантовой информации, а ее использование дает возможность проектировать робастные сигналы управления в реальном времени из реакций НР на непредвиденные ситуации управления. С помощью средств ОБЗ2 можно проектировать и тестировать различные квантовые контроллеры на основе разных КНВ: КНВ с разными типами корреляции, КНВ с различным набором БЗ (двумя, тремя, четырьмя и т.д.). После тестирования выберем наиболее робастный контроллер для использования в реальных приложениях.

Практическое применение КНВ рассмотрим на специальном примере, который применяется часто как Benchmark для тестирования и эффективности использования интеллектуального инструментария технологии мягких вычислений в НР. В частности, в следующем разделе рассмотрим и обсудим результаты моделирования поведения выбранного динамического объекта управления (т. наз. benchmark) на основе спроектированных самоорганизующихся квантовых контроллеров с помощью инструментариев ОБЗ1 и ОБЗ2.

Пример 8: *Проектирование самоорганизующейся ИСУ на основе квантового оптимизатора баз знаний.* Рассмотрим пример эффективного моделирования самоорганизации робастных БЗ в ИСУ глобально неустойчивым и существенно-нелинейным объектом управления (ОУ) (Рис. П1.15)¹.

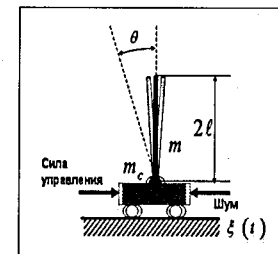


Рис. П1.15. Динамическая система «Картка – маятник»

Модель ОУ усложнена новыми (по отношению ко многим известным) ограничениями. В частности, модель ОУ содержит в структуре случайные параметрические возмущения, дискретные ограничения, задержки по времени в измерительной системе состояний ОУ, непредвиденные ситуации управления, что представляет большую алгоритмическую сложность для эффективного применения традиционных методов оптимального управления.

Движение динамической системы «Картка – маятник», описывается следующими уравнениями:

¹ Эффективность и качество управления на основе разработанного инструментария для данного примера рассмотрены в Главах 2 и 3.

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{+(u + \xi(t)) + \{a_1 \dot{z} + a_2 z\} - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m} \right) - k \dot{\theta}}{l \left(\frac{4}{3} \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}, \quad (\text{П1.1})$$

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

где g – ускорение свободного падения (9.8 m/sec^2), m_c – масса каретки, m – масса маятника, l – половина длины маятника, $\xi(t)$ – внешнее стохастическое воздействие и u – управляющая сила, действующая на каретку; $\{k; a_1; a_2\}$ – параметры модели ОУ.

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

$$\frac{d}{dt} S_\theta = \frac{k \dot{\theta}^2 + \frac{ml \dot{\theta}^3 \sin 2\theta}{m_c + m}}{l \left(\frac{4}{3} \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}; \quad \frac{d}{dt} S_z = a_1 \dot{z}^2; \quad \frac{d}{dt} S_u = k_d \dot{e}^2. \quad (\text{П1.2})$$

Задача управления: при наличии стохастического шума, действующего на каретку, при наличии времени задержки сигнала в системе измерения положения маятника (равного 0.001 сек.) и при наличии ограничения на силу управления, перевести маятник из начального положения в целевое вертикальное ($\theta = 0$) и удерживать движение ОУ в заданном вертикальном положении.

Для решения поставленной задачи управления рассмотрим следующую схему управления. Так как сила управления действует на каретку, то задающий сигнал управления тоже должен быть связан с движением каретки. Для задачи стабилизации перевернутого маятника ($\theta \rightarrow 0$) выберем следующий задающий сигнал z_{ref} : проекция центра тяжести перевернутого маятника на ось z . Проекция центра тяжести перевернутого маятника вычисляется по формуле: $z_{ref} = -l \cdot \sin \theta$. Следовательно, задающий сигнал может быть представлен следующим образом: $z_{ref} = -l \cdot \sin \theta$. Очевидно, что, если $\theta \rightarrow 0$, то $z_{ref} \rightarrow 0$.

Зададим также ограничение на задающий сигнал: $|z_{ref}| \leq 1$. Будем проектировать самоорганизующийся квантовый контроллер для робастного управления в широком классе ситуаций управления, в том числе и в случае непредвиденных ситуаций, на основе инструментариев ОБЗ1 и ОБЗ2 [6].

○ *Обоснование разработки ОБЗ2 на основе квантового алгоритма самоорганизации БЗ с использованием результатов моделирования.* На первом этапе будем строить ИСУ в виде нечеткого ПИД-регулятора (НР) на основе инструментария ОБЗ1. Исследуем возможности четырех баз знаний (и соответственно четырех НР), построенных для четырех типовых ситуаций², различающихся внешними шумами, показанными на рис. П1.16.

² А.А. Мишин, С.П. Петров, С.В. Ульянов, Применение оптимизатора баз знаний для проектирования интеллектуальных систем управления в среде MATLAB/SIMULINK. Ч.1 // ЭЖ Системный анализ в науке и образовании. – 2011. – № 3. Идентификационный номер: 0421100111\0020

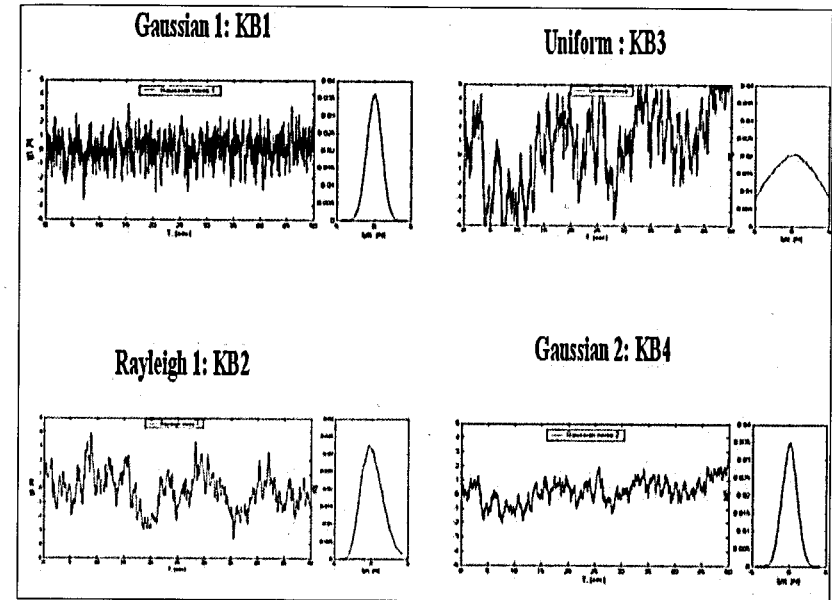


Рис. П1.16. Четыре типовых шума для выбранного ОУ

Остальные параметры обучающих ситуаций следующие: параметры модели ОУ

$$\{m_c [kg]; m [kg]; l [m]; k; a_1; a_2\} = \{1; 0.1; 0.5; 0.4; 0.1; 5\}.$$

Начальное положение: $[\theta_0 \ \dot{\theta}_0] = [10 \ 0.1]$ (в градусах); $[z_0 \ \dot{z}_0] = [0 \ 0] [m]$; Задержка по времени в канале измерения = 0.001 (сек); Ограничения на силу управления: $-5.0 < u < 5.0 [N]$. Ограничения на движение каретки: $-1.0 < z < 1.0 [m]$.

Для построения БЗ необходим обучающий сигнал (ОС), который может быть получен экспериментально или на основе моделирования процесса поиска оптимального сигнала управления с помощью ГА. Выберем следующие параметры поиска для ГА: область поиска значений вектора $K = [100 \ 100 \ 100]$; функция пригодности

$$\Phi\Pi = \sum |\theta| + \sum |\dot{\theta}|$$

представляет собой сумму абсолютных значений угла отклонения и скорости угла отклонения; ГА ищет минимум ФП.

По окончании процесса поиска оптимального сигнала управления с помощью ГА, формируем ОС для следующего этапа технологии проектирования. Данный ОС поступает на вход ОБЗ1, который строит оптимальную и робастную БЗ для заданной типовой ситуации. Пример одной из построенных БЗ (БЗ3 для типовой ситуации 3 с равномерно распределенным (uniform) шумом) показан на рис. П1.17.

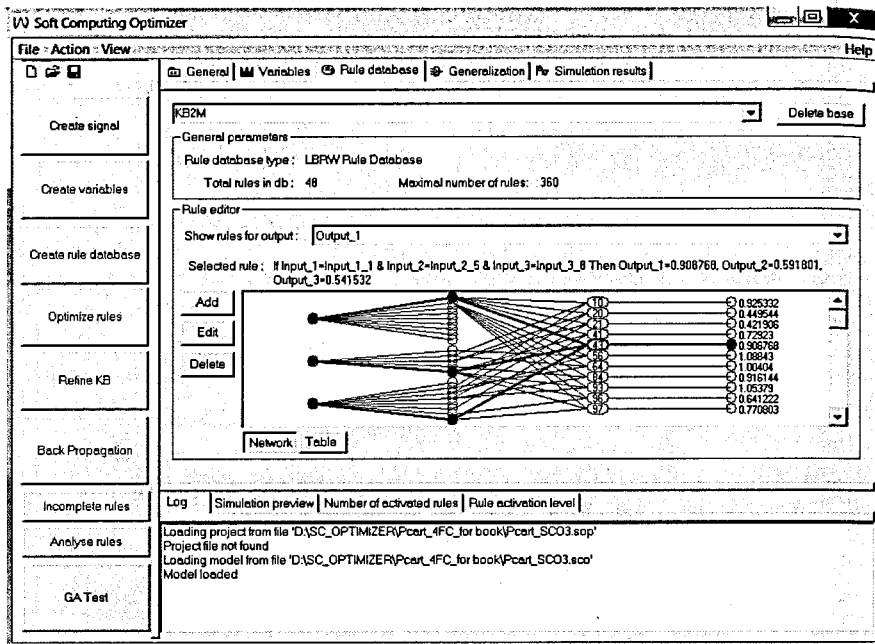


Рис. П1.17. БЗЗ нечеткого контроллера 3 (HP3)

База знаний 3 (БЗЗ) состоит из 48 правил (рис. П1.17), выбранных ОБЗ1 из полной БЗ с 360 правилами. Число лингвистических переменных для трех входов равно (9,5,8). Напомним, что полная БЗ равна произведению числа лингвистических переменных для трех входов, т.е. полная БЗ состоит из $9 \times 5 \times 8 = 360$ правил.

На рис. П1.18 показано представление нечетких множеств для входной переменной (input_3) в нечетком регуляторе HP3.

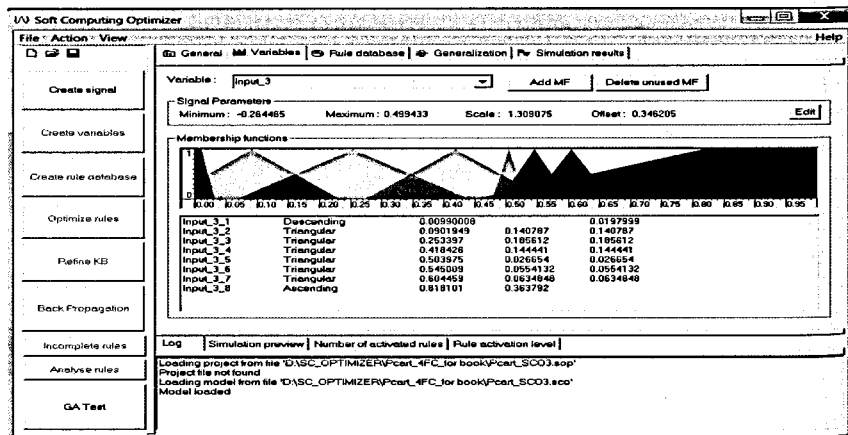
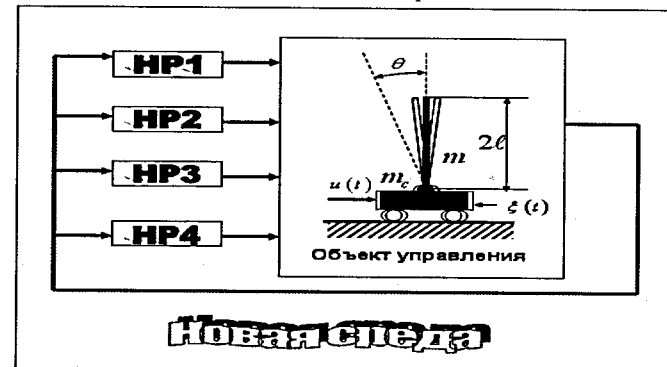


Рис. П1.18. Представление нечетких множеств для третьей входной переменной в HP3

Проведем исследование, схематично показанное на рис П1.19.



Какая ИСУ победит в новой среде функционирования ОУ ?

Рис. П1.19. Схема исследования робастности построенных HP

Для этого выберем ситуации управления («новая среда») отличные от четырех типовых указанных выше.

Сравнение движения перевернутого маятника в новых непредвиденных ситуациях для четырех построенных нечетких регуляторов. Смоделируем три нетиповых (непредвиденных) ситуаций, как показано в Табл. П1.2.

Таблица П1.2

S1 ситуация управления	S2 ситуация управления
Новый Рэлеевский шум (рис. П1.20)	Новый Рэлеевский шум (рис. П1.20)
Шум в системе измерения (Гауссовский шум с амплитудой = 0.01);	Шум в системе измерения (Гауссовский шум с амплитудой = 0.01);
Новая временная задержка = 0.003 сек;	Новая временная задержка = 0.002 сек;
Типовые параметры модели и начальное положение	Новое значение параметра $a_1 = 0.08$;
	Типовое начальное положение
S3 ситуация управления	
Равномерно распределенный шум: (рис. П1.21)	
Шум в системе измерения (Гауссовский шум с амплитудой = 0.01);	
Новая временная задержка = 0.005 сек; Типовые параметры модели и начальное положение	

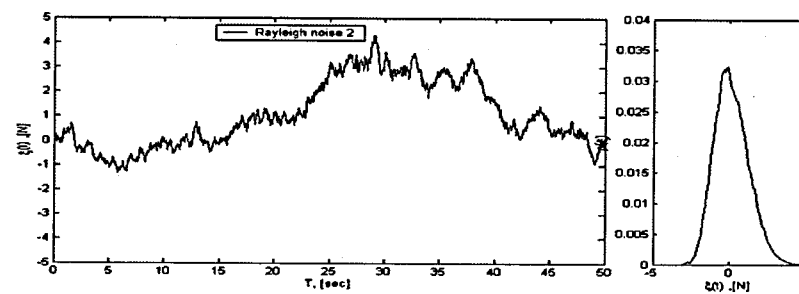


Рис. П1.20. Новый Рэлеевский шум

Ситуация S1. Новый стохастический шум, новое время задержки и шум в измерительной системе.

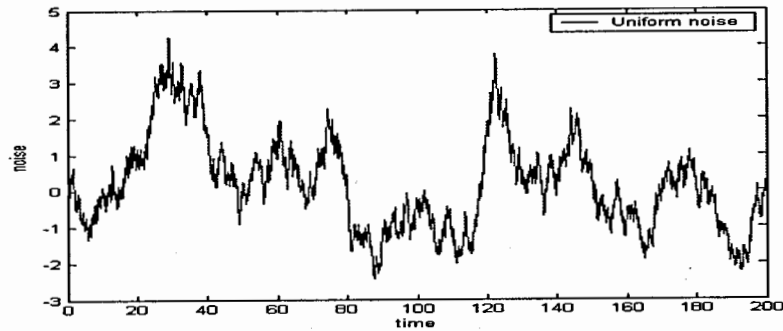


Рис. П1.21. Равномерно распределенный шум

Ситуация S1. Новый стохастический шум, новое время задержки и шум в измерительной системе. (Примечание. На рисунках используются следующие обозначения: FC1 – НР1, FC2 – НР2, FC3 – НР3, FC4 – НР4). Результаты сравнения движения маятника под управлением четырех нечетких регуляторов (четыре баз знаний соответственно) в трех смоделированных непредсказуемых ситуациях управления (Табл. П1.2) показаны на рис. П1.22 – П1.24.

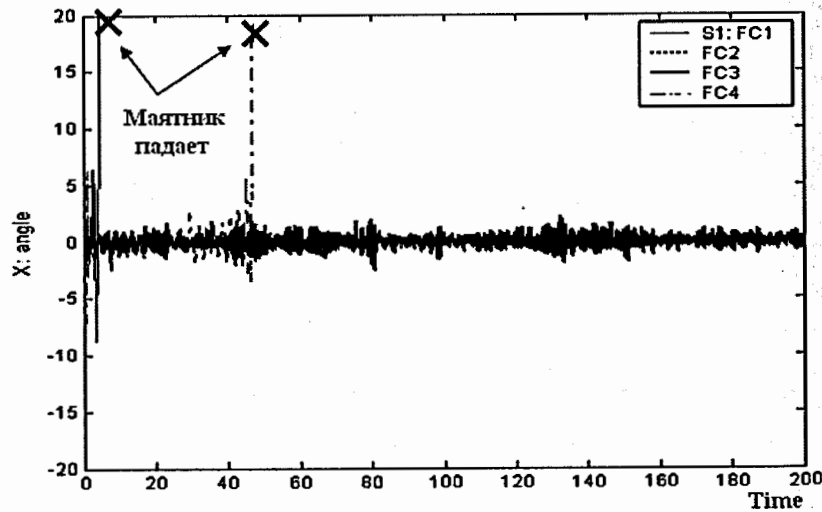


Рис. П1.22. Движение перевернутого маятника в ситуации S1 для четырех нечетких регуляторов

Вывод: нечеткие регуляторы НР1 и НР4 - не робастны в S1 ситуации, так как маятник падает при их управлении.

Ситуация S2. Новый стохастический шум, новое время задержки и шум в измерительной системе. Кроме того, изменился параметр модели ОУ.

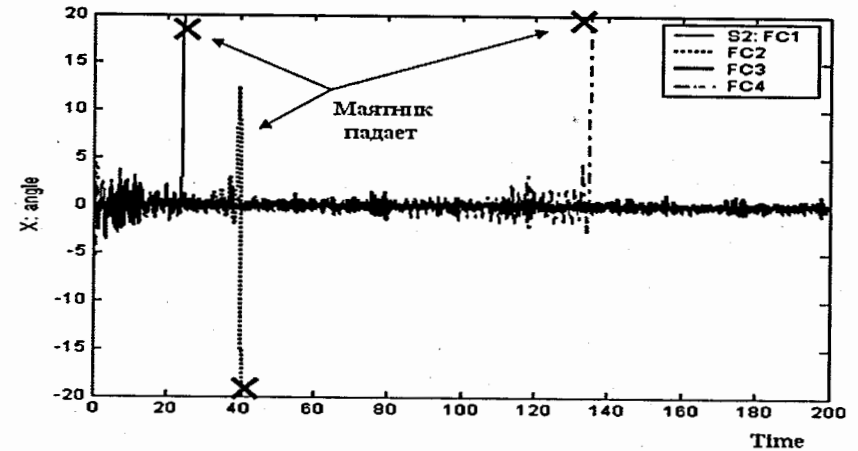


Рис. П1.23. Движение перевернутого маятника в ситуации S2 для четырех нечетких регуляторов

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

Ситуация S3. Новый стохастический шум, новое, еще большее, время задержки и шум в измерительной системе.

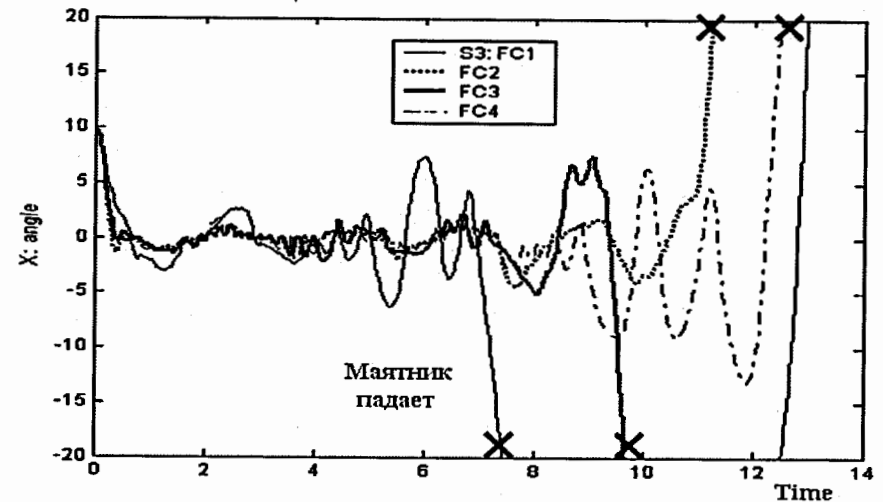


Рис. П1.24. Движение перевернутого маятника в ситуации S3 для четырех нечетких регуляторов

Вывод: все регуляторы не робастны в S3 ситуации.

Результаты моделирования (рис. П1.22 – П1.24) показывают границы робастности нечетких регуляторов, построенных на основе инструментария на мягких вычислениях. Факторами, влияющими на робастность нечетких регуляторов, построенных в типовых обучающих условиях, являются:

- изменение стохастических параметров внешнего шума;
- появление шумов в сенсорной системе (погрешности в системе измерения);
- изменение времени задержки в сенсорной системе (неполадки в системе измерения);
- смена параметров модели (в результате старения объекта управления, например).

Как показывают приведенные выше результаты моделирования, трудно спроектировать глобально «хорошую» и робастную структуру ИСУ на все случаи. В этом случае необходимо выбрать некоторую обобщающую стратегию, которая давала бы возможность переключать поток управляющих сигналов, поступающих с выхода различных БЗ НР, и (если необходимо) модифицировать их выходной сигнал под текущие условия функционирования ОУ. Конкретная реализация обобщающей стратегии достигается за счет введения обобщения стратегий в моделях нечеткого вывода (на конечном множестве предварительно спроектированных НР) в виде нового, квантового нечеткого вывода (КНВ).

Таким образом, процесс проектирования робастных БЗ состоит из двух взаимосвязанных этапов, основанных на мягких и квантовых вычислениях соответственно. Функционально, на первом этапе процесса проектирования формируются индивидуальные БЗ для двух (или более) НР для конкретных ситуаций управления (ситуации обучения). На втором этапе реализуется самоорганизация Баз Знаний нечетких регуляторов на основе разработанного квантового алгоритма КНВ.

○ **Проектирование квантового регулятора для выбранного ОУ с помощью инструментария ОБЗ2.** Будем проектировать самоорганизующийся квантовый нечеткий регулятор (КНР) на основе следующих трех спроектированных на первом этапе нечетких контроллеров – НР2, НР3 и НР4 (см выше). Количество выбранных баз для процесса самоорганизации является проектируемой величиной. С помощью ОБЗ2 можно исследовать различные варианты КНВ (с двумя базами, с тремя, с четырьмя базами знаний и т.д.) и выбрать наиболее робастный вариант. Как показали результаты моделирования, в случае с данным ОУ, вариант КНВ с четырьмя БЗ является «избыточным», менее робастным.

MatLab/Simulink структура КНР (блок «Quantum Fuzzy Inference») с тремя выбранными НР для динамической системы «Каретка-маятник» показана на рис. П1.25. Блок «Connect block for SCO2» (справа на рис. П1.25) связывается с текущей (активированной моделью КНВ), показанной на рис. П1.26.

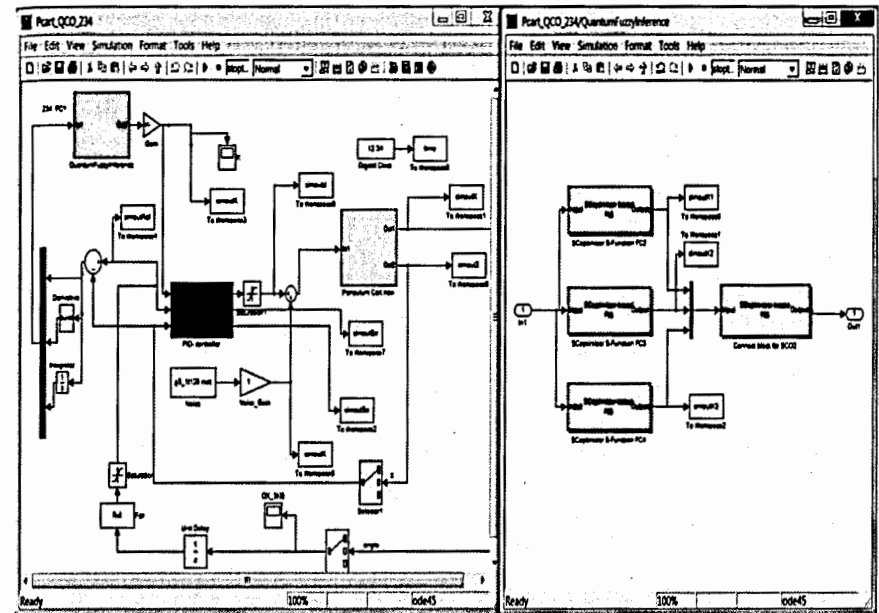


Рис. П1.25. MatLab/Simulink структура квантового регулятора динамической системы «Каретка-маятник»

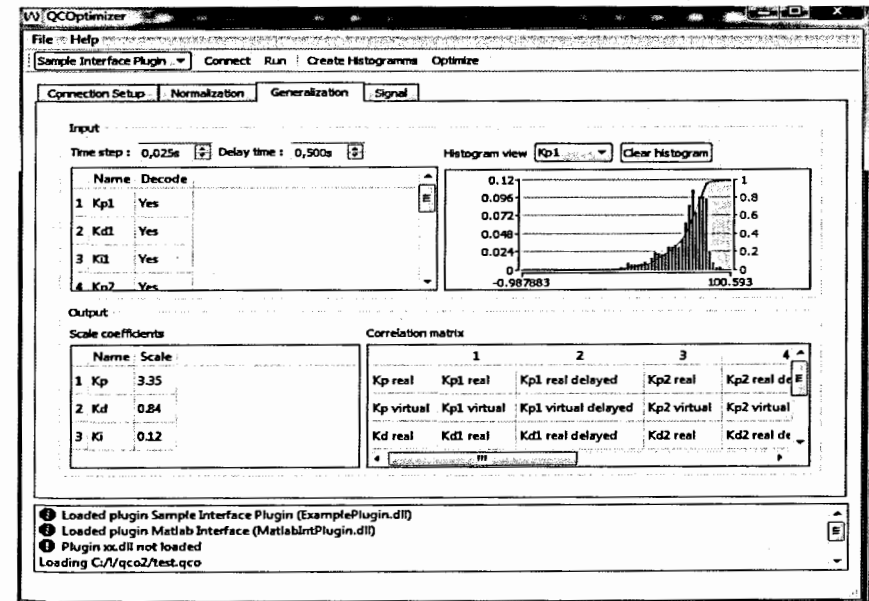


Рис. П1.26. Выбранная модель КНВ в инструментарии ОБЗ2

Задача проектирования на данном этапе сводится к тестированию различных типов КНВ и выбора наилучшего для данного объекта управления и данной задачи управления. Исследуем три типа квантовой корреляции и выберем лучшую с точки зрения критериев управления. Выберем одну из типовых (обучающих) ситуаций управления, например, четвертую типовую ситуацию TS4 (условия проектирования нечеткого регулятора НР4, рис. П1.21, КВ4).

На рис. П1.27 – П1.29 показано сравнение динамического поведения ОУ под управлением КНР на основе трех типов квантовой корреляции в КНВ (пространственной, временной и пространственно-временной) в ситуации TS4.

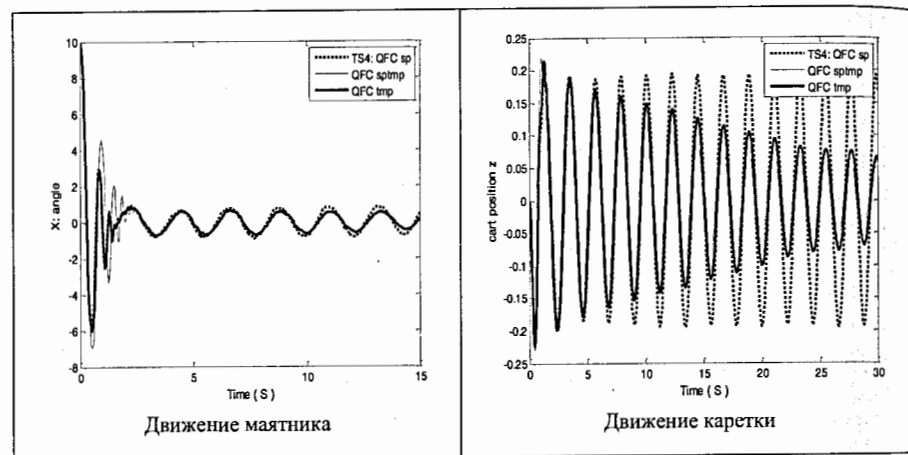


Рис. П1.27. Динамическое поведение системы «Каретка - маятник» при управлении КНВ с тремя типами корреляций

Примечание 21. Для КНВ на основе временной корреляции параметр “delta” = 0.5 (сек), коэффициенты шкалирования $\{gain_p, gain_d, gain_i\}$ посчитаны с помощью ГА и равны [3.3539, 0.8438, 0.1398];

Для КНВ на основе пространственно-временной корреляции параметр “delta” = 0.5 (сек), коэффициенты шкалирования $\{gain_p, gain_d, gain_i\}$ посчитаны с помощью ГА и равны [4.5930, 0.7117, 1.4500];

Для КНВ на основе пространственной корреляции коэффициенты шкалирования $\{gain_p, gain_d, gain_i\}$ посчитаны с помощью ГА и равны [3.4047, 0.5781, 0.7047].

Для простоты введем также следующие обозначения: QFC sp - КНР на основе пространственной корреляции в КНВ; QFC sptmp - КНР на основе пространственно-временной корреляции в КНВ; QFC tmp - КНР на основе временной корреляции в КНВ.

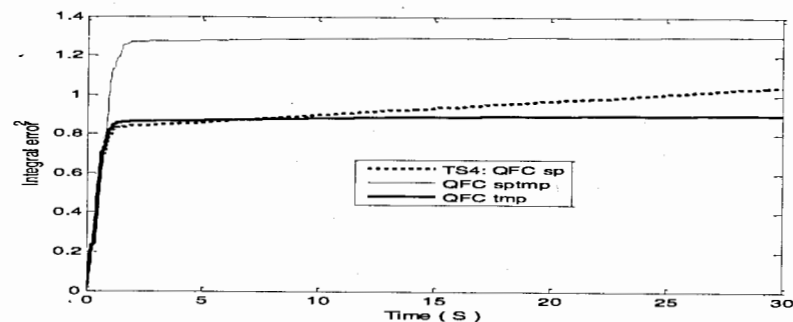


Рис. П1.28. Интегральная ошибка управления при управлении КНВ с тремя типами корреляций

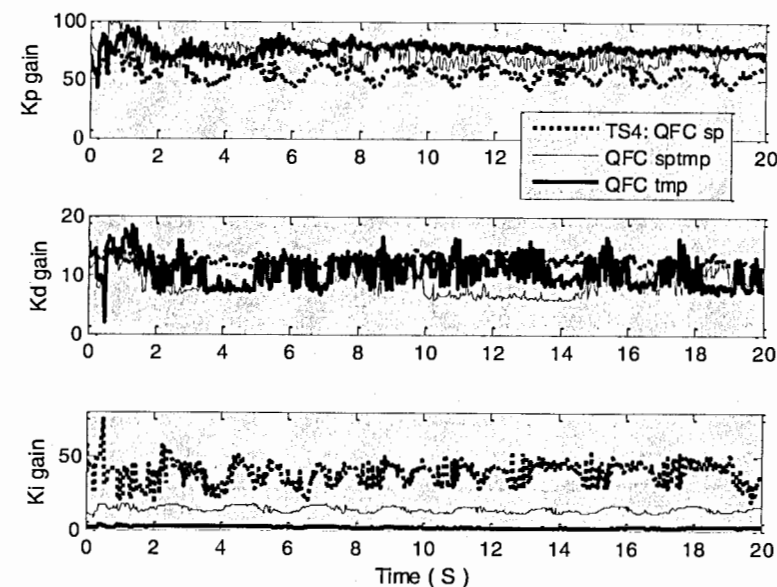


Рис. П1.29. Законы управления при управлении КНВ с тремя типами корреляций

Вывод. Результаты сравнения показывают, что для данного ОУ и выбранных трех нечетких контроллеров, КНР на основе временной корреляции в КНВ является лучшим с точки зрения основного критерия качества управления – минимум интегральной ошибки управления. Поэтому выберем КНР на основе временной корреляции в КНВ для дальнейшего тестирования свойства робастности.

Исследование робастности спроектированного квантового нечеткого контроллера: Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления. Вернемся к ситуациям, описанным выше в табл. П1.2. Посмотрим на поведение нашей динамической системы в ситуациях управления из табл. П1.2 и сравним качества управления нечетких регуляторов (НР2, НР3 и НР4) и КНР.

Ситуация S1. Начнем с ситуации S1, при этом немного усложним S1, увеличив время задержки до 0.004 сек, и увеличив амплитуду шума в измерительной системе до 0.015. (рис. П1.30 и П1.31).

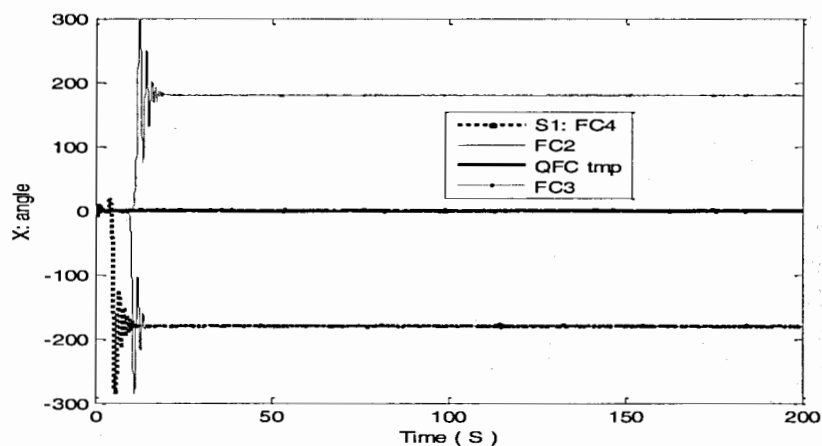


Рис. П1.30. Движение маятника в ситуации S1
Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления

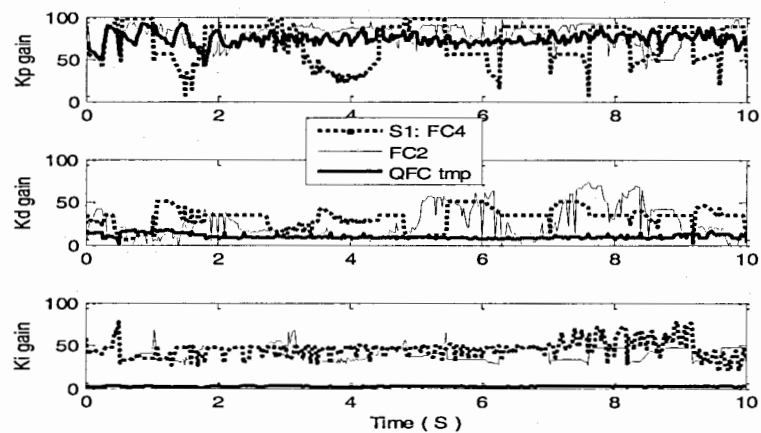


Рис. П1.31. Законы управления в S1.
Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления

Примечание 22. На рис. П1.30 и П1.31 жирной линией показано движение маятника под управлением КНР (QFC tmp); тонкой линией - движение под управлением НР2 (FC2), пунктирной линией - движение под управлением НР4 (FC4); штрихпунктирной линией показано движение под управлением НР3 (FC3).

Вывод. Все спроектированные нечеткие регуляторы не робастны в ситуации S1, так как маятник падает. Однако, квантовый регулятор успешно справляется с задачей управления.

Ситуация S2. Рассмотрим ситуацию S2 (Табл. П1.2) и усложним ее, увеличив задержку по времени до 0.004 сек.

На рис. П1.32 показано сравнение динамического поведения перевернутого маятника установленного на каретке (в ситуации S2) под управлением нечетких регуляторов и под управлением КНР на основе временной квантовой корреляции в КНВ.

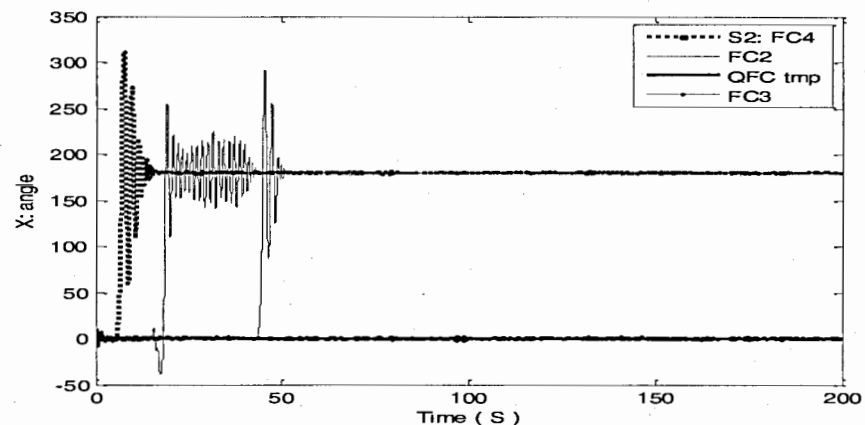


Рис. П1.32. Динамическое поведение системы «маятник-каретка» в ситуации S2.
Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления

Вывод. Все спроектированные нечеткие регуляторы не робастны в ситуации S2, так как маятник падает. КНР успешно справляется с задачей управления.

Ситуация S3. Рассмотрим ситуацию S3 (Табл. П1.2) и усложним ее, увеличив задержку по времени до 0.006 сек.

На рис. П1.33 показано сравнение динамического поведения ОУ (в ситуации S3) под управлением нечетких регуляторов и под управлением КНР на основе временной квантовой корреляции в КНВ.

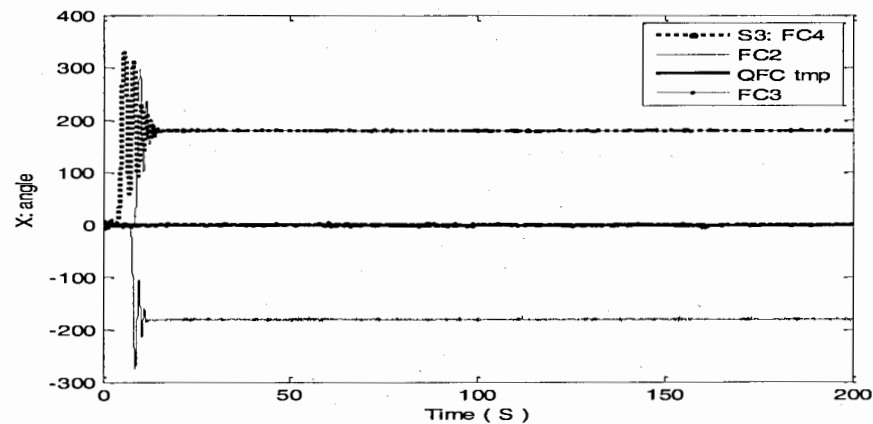


Рис. П1.33. Динамическое поведение системы «Каретка-маятник» в ситуации S3. Сравнение нечеткого управления и квантового нечеткого управления

Вывод. Все три нечетких регулятора – не робастны в ситуациях S1, S2 и S3, однако квантовый нечеткий регулятор – робастен. С точки зрения квантовой теории игр данный эффект является демонстрацией «Паррондо парадокса»: в игровой ситуации (в непредвиденной ситуации управления) между тремя классическими НР(1,2,3) (игроки А, В и С соответственно), которые не являются победителями при использовании классических стратегий в различных ситуациях управления, с помощью квантовой стратегии принятия решений на основе КНВ можно спроектировать из них победителя в виде нового самоорганизующегося НР.

○ **Сравнение качества управления классического ПИД, взвешенного нечеткого и квантового нечеткого регуляторов.** В заключение сделаем сравнение следующих трех типов управления: квантового нечеткого регулятора, традиционного ПИД с коэффициентами усиления равными средним значениям от КНВ в четвертой типовой ситуации ($K=[74.4684 \ 9.2590 \ 2.2474]$) и взвешенного нечеткого регулятора. «Взвешенный» нечеткий контроллер (weighted fuzzy controller, WFC) строит управляющий сигнал на основе усреднения выходных сигналов от НР так, как это показано в MatLab/Simulink-модели на рис. П1.34 - выходы от трех НР (НР4, НР2 и НР3) усредняются в блоке справа.

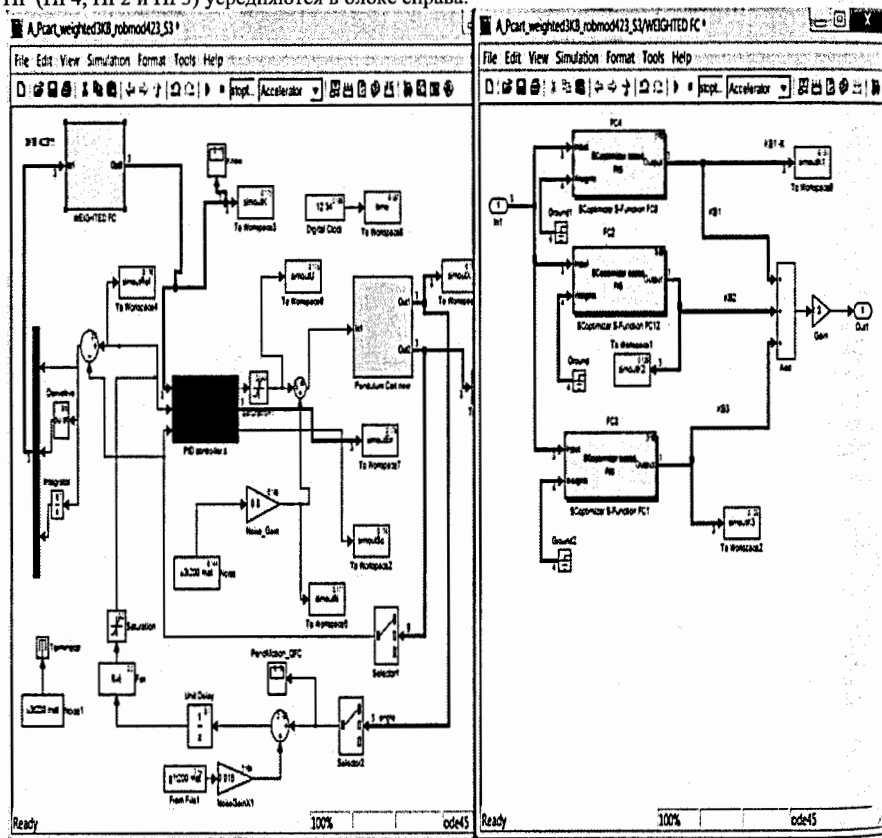


Рис. П1.34. MatLab/Simulink-модель управления на основе «взвешенного» нечеткого контроллера

На рис. П1.35 – П1.37 показано сравнение динамического поведения ОУ под управлением трех указанных типов в ситуации S3.

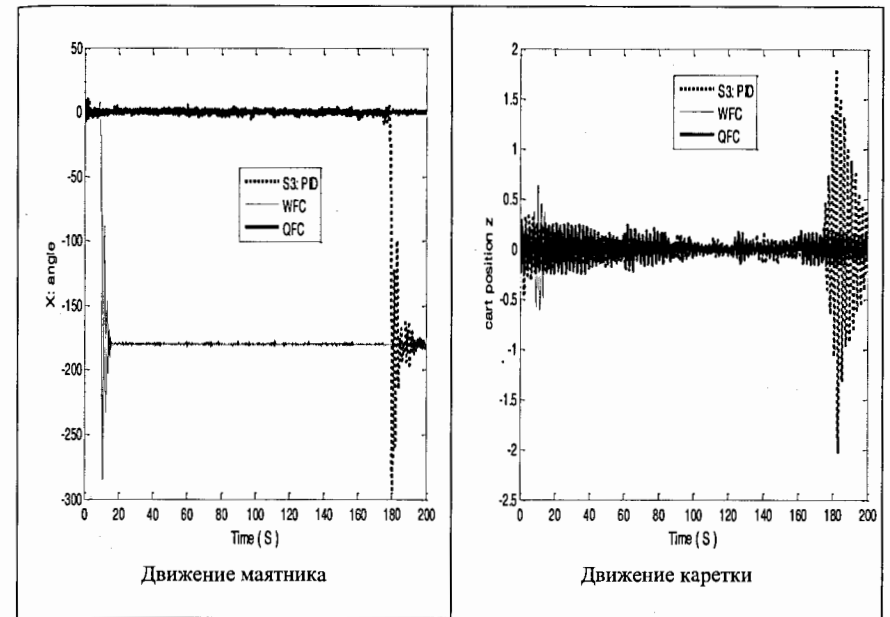


Рис. П1.35. Динамическое поведение системы «Каретка - маятник» в ситуации S3

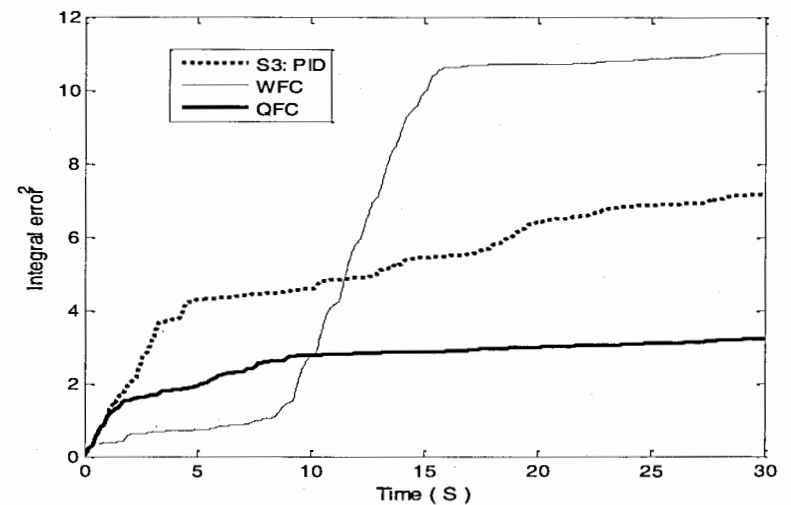


Рис. П1.36. Динамика интегральной ошибки управления в ситуации S3. Сравнение взвешенного нечеткого, ПИД и квантового нечеткого управлений

На рис. П1.37 Показано сравнение динамик системы под управлением взвешенного нечеткого и квантового нечеткого регуляторов в ситуации S3.

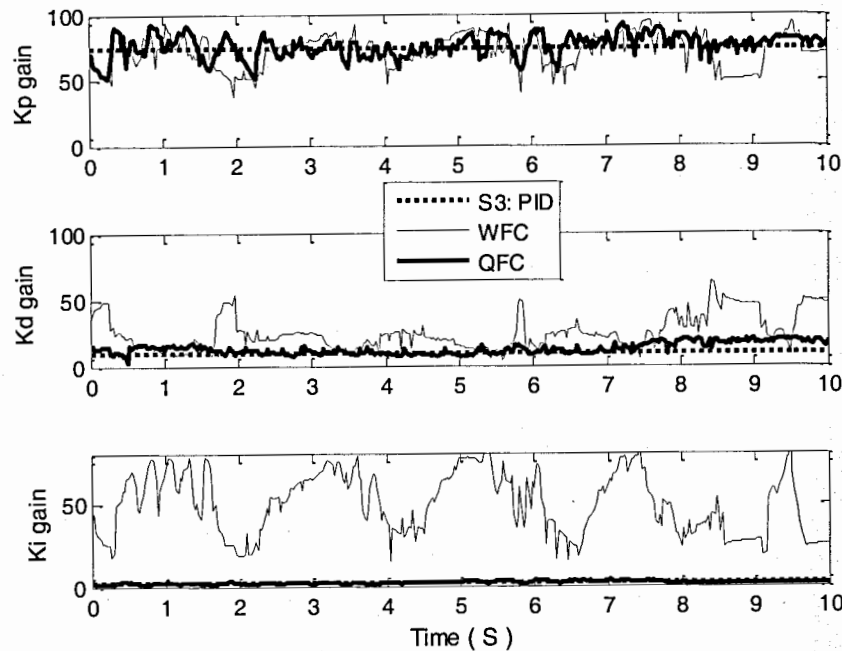


Рис. П1.37. Динамика законов управления в ситуации S3. Сравнение взвешенного нечеткого, ПИД и квантового нечеткого управлений. Жирной линией показано движение в случае QFC управления, тонкой линией показано движение в случае WFC управления, пунктирной линией - движение в случае ПИД управления

Выводы и заключение

В непредсказуемых ситуациях управления (в т.н. условиях риска) в случае сложных нелинейных неустойчивых динамических объектов управления традиционные в теории управления методы на основе ПИД регуляторов, а также нечеткие регуляторы, спроектированные на типовые обучающие условия, и взвешенные нечеткие регуляторы (на их основе) не справляются с задачей управления.

Квантовый нечеткий регулятор демонстрирует высокий уровень качества управления и робастность во многих ситуациях управления, особенно в сложных непредсказуемых ситуациях управления. Рассмотренный пример иллюстрирует эффективность методологии применения квантовых вычислений для решения алгоритмически неразрешимых классических задач в теории и практике интеллектуального нечеткого управления.

Отметим важные особенности алгоритма КНВ как квантового алгоритма (КА): Структурно КА управления самоорганизацией БЗ нечетких регуляторов включает все (необходимые и достаточные) действия и операторы, характеризующие его как принадлежащего к классу поисковых КА.

С точки зрения теории квантовых вычислений и алгоритмов, структура КА содержит ряд особенностей и действий:

- 1) приготовление состояния квантовой суперпозиции;
- 2) выбор типа квантовой корреляции (при этом определение (типа и вида) квантовой корреляции зависит от класса нелинейности ОУ);
- 3) применение оператора квантового оракула (модель «черного ящика»);
- 4) обмен частично извлеченной (скрытой) квантовой информацией между компонентами;
- 5) использование квантовой корреляции как альтернативы классической корреляции, которая рассматривается в качестве дополнительного ресурса КА;
- 6) привлечение эффекта квантовых массивных параллельных вычислений.

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.
- 6) 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.

Приведенная модель КА для КНВ позволяет решать классические проблемы проектирования робастных БЗ НР в структурах ИСУ, не имеющих аналогов решений среди семейства рандомизированных, классических алгоритмов, и отличается полиномиальной вычислительной сложностью (BQP -класс вычислительной сложности).

Таким образом, рассмотрены основные идеи и программный инструментарий новой технологии проектирования робастных ИСУ на основе Оптимизатора баз знаний на квантовых вычислениях

Рекомендуемая литература к Приложению П1

1. Ульянов С.В. Робастные интеллектуальные системы управления: Системный и структурный анализ // Нечеткие Системы и Мягкие Вычисления. – 2008. – № 2. – С. 15 – 31.
2. Васильев С.Н., Жерлов А.К., Федосов Е.А., Федунков Б.Е. Интеллектуальное управление динамическими системами. – М.: Физматлит – 2000.
3. Ульянов С.В., Л.В. Литвинцева, В.Н. Добрынин и др. Интеллектуальное робастное управление: технологии мягких вычислений. – М.: ВНИИгеосистем. – 2011.
4. Сорокин С.В., Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Технология мягких вычислений в проектировании робастных нечетких систем управления: Оптимизатор баз знаний // Нечеткие Системы и Мягкие Вычисления. – 2008. – Т. 3. – № 1.
5. Ульянов С.В., Нефедов Н.Ю. Эффективность и качество интеллектуального управления с применением квантового нечеткого вывода: Глобально неустойчивая динамическая система // ЭЖ Системный Анализ в Науке и Образовании. – 2012. – № 1.
6. Litvintseva L. V., Ulyanov I.S., Ulyanov S. V. and Ulyanov S. S. Quantum fuzzy inference for knowledge base design in robust intelligent controllers // J. of Computer and Systems Sciences Intern. – 2007. – Vol. 46. – No 6. – pp. 908 – 961.

Приложение П2

Элементы теории квантовых вычислений, квантового программирования и квантовой теории информации

С точки зрения применения теории квантовых вычислений в прикладной системной инженерии квантового программирования выделяют два направления исследований:

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

В качестве примера рассмотрим традиционный математический формализм описания моделей основных квантовых операторов, т.е. с точки зрения второй квантовой проблемы описания КА. Данный формализм может быть выражен на языке квантовых состояний или преобразований, но имеется также возможность адекватного описания квантовых состояний и эффектов на языке логического вывода: применение традиционного формализма, его мощности и выразительности как квантовой системы нечеткого логического вывода.

В данном разделе рассмотрены вопросы описания и интерпретации квантовых операторов, применяемых в квантовых вычислениях, квантовых алгоритмах и квантовой теории информации¹ для практического применения.

П2.1. Элементы теории квантовых вычислений

Ввиду ограниченного объема, в данном разделе излагаются на конкретных примерах необходимые сведения из теории квантовых вычислений и квантовой теории информации, используемые при изложении результатов на конкретных примерах применения в реальных объектах управления.

Дополнительную информацию о методах квантовых вычислений читатель может найти в рекомендуемой литературе к данному Приложению П2.

П2.1.1. Основные понятия и определения теории квантовых вычислений: квантовый бит (кубит) и особенности квантовых вычислений

Введем на примерах необходимые понятия и определения из теории квантовых вычислений.

Пример 9: *Квантовый бит как квантовое физическое состояние.* Классический бит может находиться в одном из двух состояний: 0 или 1. Таким образом, его физическое состояние можно представить, как $b = a_1 \cdot 0 + a_2 \cdot 1$, которое имеет одну из форм: или $a_1 = 1$ и $a_2 = 0$, тогда $b = 0$, или $a_1 = 0$ и $a_2 = 1$, и тогда $b = 1$. В противоположность, состояние квантового бита $|\psi\rangle$ задается вектором в двумерном комплексном

¹ В отечественной и зарубежной литературе издано достаточно много учебных пособий и монографий, посвященных данным вопросам. Поэтому ввиду ограниченного объема книги выбраны только минимально необходимые сведения для применения в практических задачах моделирования и проектирования интеллектуальных систем управления. Более подробное изложение данных вопросов читатель может найти на сайте: <http://www.qcoptimizer.com> (со свободным доступом ко многим оригинальным источникам).

векторном пространстве. Здесь вектор имеет две компоненты, и его проекции на базисы векторного пространства являются комплексными числами. Квантовый бит ψ представляется (в обозначениях Дирака в виде *кет*-вектора) как $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ или в

векторном обозначении $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$, $\langle\psi| = [\alpha \ \beta]^T$ (*бра*-вектор). Если $|\psi\rangle = |0\rangle$, то $|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$.

Амплитуды α и β - комплексные числа, для которых выполнено следующее условие: $\alpha\alpha^* + \beta\beta^* = 1$, где «*» - операция комплексного сопряжения; пара $|0\rangle$ и $|1\rangle$ образует пару ортонормальных базисных векторов, называемых *состоянием вычислительного базиса*. Если α или β принимают нулевые значения, то ψ определяет классическое, чистое состояние. В противном случае говорят, что ψ находится в состоянии суперпозиции двух *классических* базисных состояний. Геометрически квантовый бит находится в непрерывном состоянии между $|0\rangle$ и $|1\rangle$, пока не производятся измерения его состояния. С учетом условия нормировки можно опустить фактор глобальной фазы и записать вектор $|\psi\rangle$ в более удобном виде как $|\psi\rangle = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle + e^{i\phi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle$, где θ и ϕ изменяются в области от 0 до 2π . В данном случае вектор $|\psi\rangle$ описывает точки на поверхности сферы Блоха, как это представлено на рис. П2.1.

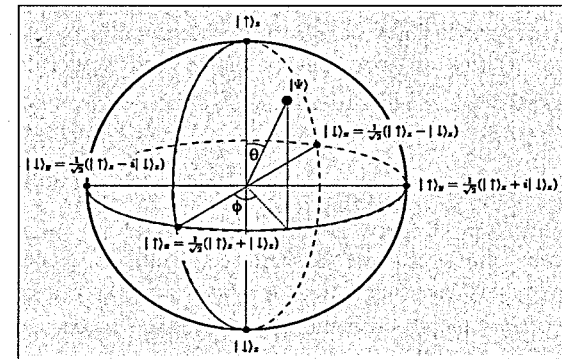
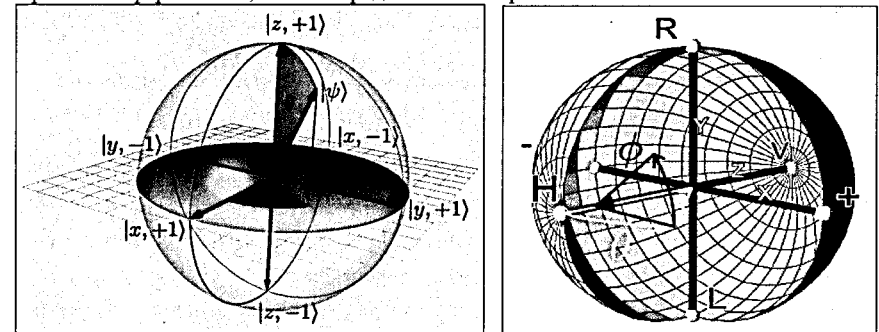


Рис. П2.1. Представления сферы Блоха

Оси x, y, z представляют геометрически собственные состояния вектора трех наблюдаемых, известных как матрицы Паули: $\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $\sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$ и $\sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$.

Каждая матрица Паули имеет два собственных значения, $+1$ и -1 . Значения собственных состояний данных трех наблюдаемых приведены в Таблице П2.1.

Таблица П2.1.

Собственные вектора и собственные значения матриц Паули

наблюдаемая	собственное значение	собственное состояние
σ_x	± 1	$ x, \pm 1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle \pm 1\rangle)$
σ_y	± 1	$ y, \pm 1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle \pm i 1\rangle)$
σ_z	± 1	$ z, +1\rangle = 0\rangle, z, -1\rangle = 1\rangle$

Ортогональный к $|\psi\rangle$ вектор имеет вид, $|\psi^\perp\rangle = \sin\left(\frac{\theta}{2}\right)|0\rangle - e^{i\phi}\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)|1\rangle$ и соответствующая наблюдаемая для состояний $|\psi\rangle$ и $|\psi^\perp\rangle$ имеет следующий вид

$$\sigma(\theta, \phi) = \sin(\theta)\cos(\phi)\sigma_x + \sin(\theta)\sin(\phi)\sigma_y + \cos(\theta)\sigma_z$$

Матрица σ_x изменяет вычислительный базис кубита $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ на $\alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$; аналогично операция σ_z осуществляет смещение фазы состояния на π и умножение состояния $|1\rangle$ на минус 1. Данные операции справедливы только в вычислительном базисе, например, в базисе σ_x данные действия обратимы.

Пример 10: Геометрические преобразования квантового бита. Показанное в Примере 9 стандартное представление сферы Блоха для состояния простого кубита можно описать в терминах матрицы плотности состояния с применением унитарной 2×2 матрицы и применением некоторых особенностей матриц Паули. Чистое состояние кубита $|\psi\rangle$ можно рассматривать в виде точки комплексного пространства \mathbb{C}^2 , представляет собой единичный вектор в \mathbb{C}^2 с точностью до глобальной фазы. Без

потери общности можно записать $|\psi\rangle = \begin{pmatrix} \cos\frac{\theta}{2} \\ e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2} \end{pmatrix}$, где $0 \leq \theta \leq \pi$ и $0 \leq \phi \leq 2\pi$ (фактор $1/2$

для θ выбран так, чтобы данные области соответствовали областям изменения сферических координат). Значениям $\theta = 0$ и $\theta = \pi$ соответствуют состояния $|0\rangle$ и $|1\rangle$. Таким образом, пространство состояний простого кубита соответствуют топологии сферы с единичным радиусом.

Рассмотрим однозначное соответствие между чистыми состояниями кубита и точками единичной сферы S^2 в \mathbb{R}^3 . Такое соответствие называется представлением сферы состояния кубита (см. рис. П2.1). Вектор Блоха для состояния кубита $|\psi\rangle$ определяется как

$$\vec{r} = (x, y, z), \text{ где } \begin{cases} x = \sin\theta \cos\phi, \\ y = \sin\theta \sin\phi, \\ z = \cos\theta. \end{cases}$$

Матрица плотности для состояния $|\psi\rangle$ определяется как

$$\rho = |\psi\rangle\langle\psi| = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 + \cos\theta & e^{-i\phi}\sin\theta \\ e^{i\phi}\sin\theta & 1 - \cos\theta \end{pmatrix} = \frac{1}{2}(I + x\sigma_x + y\sigma_y + z\sigma_z),$$

где (x, y, z) определяют координаты вектора Блоха и матрицы

$$I = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma_y = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

называются матрицами Паули. Тогда матрицу плотности ρ можно записать в компактном виде как $\rho = \frac{1}{2}(I + \vec{r} \cdot \vec{\sigma})$, $\vec{r} = (x, y, z)$, $\vec{\sigma} = (\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z)$. Если \vec{r}_1 и \vec{r}_2

векторы Блоха двух чистых состояний $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$, то имеем $\langle\psi_1|\psi_2\rangle^2 = \text{Tr}(\rho_1\rho_2) = \frac{1}{2}(1 + \vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2)$, т.е. имеем однозначное соответствие внутреннего произведения в S^2 и \mathbb{R}^3 . Отметим, что для ортогональных квантовых состояний имеем $\langle\psi_1|\psi_2\rangle^2 = 0$ и тогда $\vec{r}_1 \cdot \vec{r}_2 = -1$ и $\vec{r}_1 = -\vec{r}_2$, т.е. ортогональные состояния соответствуют полярные точки на сфере Блоха.

Рассмотрим другую геометрическую интерпретацию вектора $|\psi\rangle$ для простого кубита в виде $|\psi\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} \in \mathbb{C}^2$, которое полностью определяется второй компонентой

$\beta = e^{i\phi}\sin\frac{\theta}{2}$. Так как $|\beta| \leq 1$, то множество чистых состояний кубита может быть идентифицировано на единичном диске в комплексной области (с полярными координатами для β в виде (r, ϕ) , где $r = \sin\frac{\theta}{2}$). Определим соотношение $\zeta = \frac{\alpha}{\beta}$ как «линию комплексного переменного» для состояния $|\psi\rangle$, так как все точки этой линии

эквивалентны точкам линии ζ . Для чистого состояния кубита имеем $\zeta = e^{-i\phi}\cot\frac{\theta}{2}$. Данное представление не избыточно, так как состояниям $|0\rangle$ и $|1\rangle$ соответствуют значения $\zeta = \infty$ и $\zeta = 0$.

Таким образом, имеем однозначное соответствие между чистыми состояниями кубита и расширенной комплексной плоскостью $\mathbb{C}_\infty = \mathbb{C} \cup \{\infty\}$. Допустим, что

$U = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}$ унитарная матрица и преобразует состояние $|\psi\rangle$ в виде

$U|\psi\rangle = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a\alpha + b\beta \\ c\alpha + d\beta \end{pmatrix}$. Введем новое соотношение $\zeta' = \frac{a\alpha + b\beta}{c\alpha + d\beta} = \frac{a\zeta + b}{c\zeta + d}$

(деление на ноль возможно в силу свойств расширенной комплексной плоскости). Тогда оператору U соответствует следующее преобразование переменной $\zeta \in \mathbb{C}_\infty$:

$f(\zeta) = \frac{a\zeta + b}{c\zeta + d}$, где выполняются граничные условия $f\left(-\frac{d}{c}\right) = \infty$, $f(\infty) = \frac{a}{c}$.

Поскольку преобразование U унитарно, то $\det U = ad - bc \neq 0$, и преобразование f переменная функция.

Такое преобразование является специальным аналогом конформного преобразования, называемого линейным дробным преобразованием или преобразованием Мебиуса.

○ Понятие стереографической проекции сферы Блоха на (x, y) -поверхность (см. рис. П2.2). Рассмотрим рис. П2.2(б). Для определения проекции вектора Блоха $\vec{r} = (x, y, z)$ проведем линию соединения северного полюса z и вектора \vec{r} , т.е. определим точку пересечения η проекции \vec{r} с (x, y) -поверхностью (рис. П2.2(б)). Для определения проекции η будем интерпретировать \vec{r} как параметрическое семейство $(x + iy, z) \in \mathbb{C} \times \mathbb{R} \cong \mathbb{R}^3$. Тогда η является положительным множителем для $(x + iy)$.

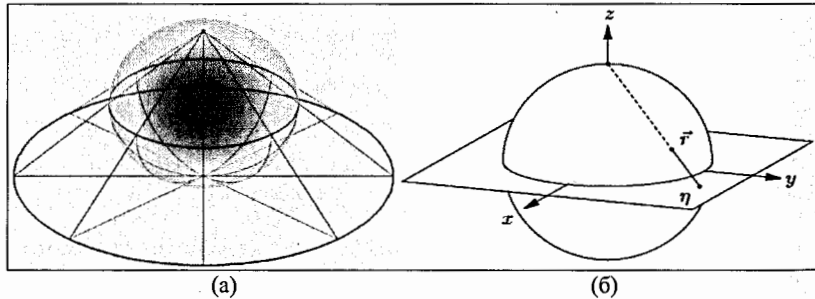


Рис. П2.2. Стереографическая проекция как гомеоморфизм отображения \mathbb{C} в S^2 (а) и стереографическая проекция сферы Блоха на расширенную комплексную плоскость (б)

Из рис. П2.3а видно, что $\frac{\eta}{x + iy} = \frac{1}{1 - z}$ и поэтому $\eta = \frac{x + iy}{1 - z}$.

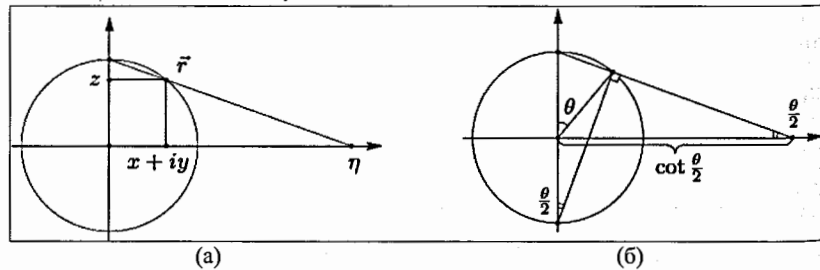


Рис. П2.3. Проекция η в $\vec{r} = (x + iy, z)$ (а) и геометрическая интерпретация члена $\cot \frac{\theta}{2}$ (б)

Отметим, что северный полюс $\vec{r} = (0, 0, 1)$ проектируется в $\eta = \infty$. Тогда для чистого состояния кубита $\zeta = e^{-i\varphi} \cot \frac{\theta}{2}$ имеем соотношение $\zeta = \bar{\eta} = \frac{x - iy}{1 - z}$, т.е. ζ комплексно сопряжено с η и (x, y, z) являются координатами вектора Блоха. Геометрический смысл определения $\zeta = e^{-i\varphi} \cot \frac{\theta}{2}$ представлен на рис. П2.3(б). Непосредственно из рис. П2.3(б) следует, что фактор $\cot \frac{\theta}{2}$ соответствует расстоянию проекции до оригинала или упрощенно до абсолютного значения величины ζ .

Формализм описания сферы Блоха можно представить также в виде расслоения Хопфа трехмерной сферы S^3 в пространстве \mathbb{R}^4 . Идентифицируем \mathbb{R}^4 и \mathbb{C}^2 в виде

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix} \cong \begin{pmatrix} x + iy \\ z + iw \end{pmatrix}.$$

Тогда сферу S^3 можно определить как $S^3 = \{\psi \in \mathbb{C}^2 \mid \|\psi\| = 1\}$. Допустим, что $\mu \in \mathbb{C}^2$ и является единичным вектором ($\mu \in S^3$). Тогда «комплексная линия» в направлении μ определяется как $L_\mu = \{c\mu \mid c \in \mathbb{C}\}$. Допустим, что C_μ определяет пересечение L_μ и S^3 : $C_\mu = L_\mu \cap S^3 = \{e^{i\varphi} \mu \mid \varphi \in \mathbb{R}\}$. Отметим, что C_μ определяет окружность S^1 на поверхности S^3 и для каждой точки $\mu \in S^3$ окружность C_μ однозначно определена и содержит параметр μ . Таким образом, поверхность S^3 можно рассматривать как семейство окружностей S^1 .

○ Визуализация полного пространства Гильберта (S^3) с расслоенной структурой в \mathbb{R}^3 . Рассмотрим возможные варианты визуализации полного (S^3) пространства Гильберта с расслоенной структурой. Это можно осуществить (прямым) стереографическим отображением S^3 в \mathbb{R}^3 (рис. П2.4(а)).

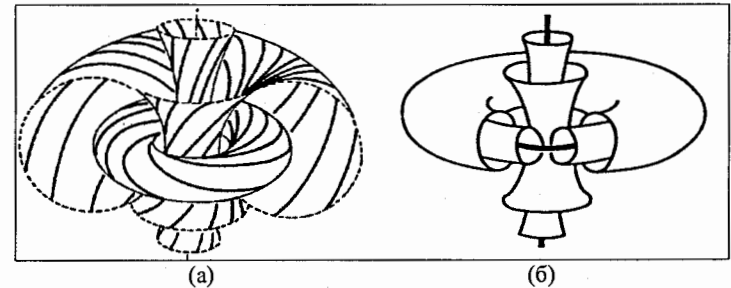


Рис. П2.4. Расслоение Хопфа сферы S^3 после стереографического отображения в \mathbb{R}^3 (а) и семейство вложенных торусов с параметризацией $\theta \in [0, \pi]$ (б)

Расслоения могут группироваться в конечное семейство вложенных торов, три из которых показаны на рис. П2.4(а).

В общем случае проективное отображение из северного или южного полюсов $(0, 0, \pm 1)$ в плоскость экватора определяется как

$$P: \mathbb{S}^n \setminus (0, \dots, 0, \pm 1) \mapsto \mathbb{R}^n, (P_1, \dots, P_{n+1}) \mapsto (P_1, \dots, P_n, 0) = \left(\frac{P_1}{1 \mp P_{n+1}}, \dots, \frac{P_n}{1 \mp P_{n+1}}, 0 \right),$$

и обратное отображение

$$P^{-1}: \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{S}^n \setminus (0, \dots, 0, \pm 1), (P_1, \dots, P_n, 0) \mapsto (P_1, \dots, P_{n+1}) = \left(\frac{2P_1}{P^2 + 1}, \dots, \frac{2P_n}{P^2 + 1}, \pm \frac{P^2 - 1}{P^2 + 1} \right)$$

где $P^2 = P_1^2 + \dots + P_n^2$.

Теперь можно представить в визуальном виде расслоение сферы S^3 стереографической проекцией на пространство \mathbb{R}^3 плоскости экватора.

Введем параметризацию $\alpha = \cos \frac{\theta}{2} e^{i\varphi_1}$, $\beta = \sin \frac{\theta}{2} e^{i\varphi_2}$ в соответствии с выражением для матрицы плотности кубита при $\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$. Для вложенного тора и глобальной фазы η имеем: $|\alpha(\eta)|^2 = |\alpha|^2 = \cos^2 \frac{\theta}{2}$. Стереографическая проекция в обратном представлении задается как

$$P^{-1}: \mathbb{R}^3 \mapsto \mathbb{S}^3 \setminus (0, 0, 0, \pm 1), (x, y, z, 0) \mapsto (\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2) = \left(\frac{2x}{r^2 + 1}, \frac{2y}{r^2 + 1}, \frac{2z}{r^2 + 1}, \frac{r^2 - 1}{r^2 + 1} \right),$$

где $r^2 = x^2 + y^2 + z^2$. Поскольку, $|\alpha|^2 = \alpha_1^2 + \alpha_2^2$, то, применяя полученное обратное преобразование, получим: $y^2 = \frac{\pm 2}{\cos \frac{\theta}{2}} \sqrt{x^2 + y^2} - (x^2 + y^2 + 1)$. Данное уравнение

описывает поверхность в \mathbb{R}^3 , которое инвариантно при вращениях вокруг 3 – осей, так как только сумма $(x^2 + y^2)$ присутствует в уравнении. Если принять $y = 0$ в 1 – 3 –

плоскости, то имеем $\frac{2x}{x^2 + z^2 + 1} = \cos \frac{\theta}{2}$, $\left(x - \frac{1}{\cos \frac{\theta}{2}} \right)^2 + z^2 = \frac{1}{\cos^2 \frac{\theta}{2}} - 1 = \tan^2 \frac{\theta}{2}$. Отсюда

следует, что данное соотношение определяет окружность с радиусом $\tan \frac{\theta}{2}$ и центром в

точке $\left(\frac{1}{\cos \frac{\theta}{2}}, 0, 0 \right)$. Вращение вокруг 3 – осей воспроизводит торус. Поэтому

поверхность y^2 задает семейство вложенных, коаксиальных торов с параметризацией $\theta \in [0, \pi]$ (рис. П2.4(б)).

○ *Визуализация полного пространства Гильберта (S^3) с расслоенной структурой в \mathbb{R}^4 .* С целью визуализации данной ситуации, введем сферические координаты в \mathbb{R}^4 и применим стереографическую проекцию для проектирования S^3 на более широкое семейство пространства \mathbb{R}^4 . По аналогии описания S^3 в \mathbb{R}^3 координаты единичного вектора $\mu \in \mathbb{R}^4$ можно задать как

$$\begin{cases} x = \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma \\ y = \sin \alpha \sin \beta \cos \gamma \\ z = \sin \alpha \cos \beta \\ w = \cos \alpha \end{cases}, \text{ где } \alpha, \beta \in [0, \pi] \text{ и } \gamma \in [0, 2\pi).$$

В этом случае окружность C_μ в 4 – мерном мире для $\mu = \begin{pmatrix} x + iy \\ z + iw \end{pmatrix}$, по аналогии с ранее введенными определениями для 3 – мерного мира, можно представить в следующем виде:

$$C_\mu = e^{i\varphi} \left(\mu = \begin{pmatrix} x + iy \\ z + iw \end{pmatrix} \right) \cong \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix}.$$

По аналогии с ранее введенной стереографической проекцией из S^2 в \mathbb{C}_∞ , можно

ввести обобщение в виде: $\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix} \mapsto \frac{1}{1-w} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix}$.

Выбирая единичный вектор $\mu \in \mathbb{R}^4$ и подставляя соответствующие значения α, β и γ можно вычислить окружность C_μ и ее проекцию в \mathbb{R}^3 согласно приведенным выражениям. В результате получаем пространство \mathbb{R}^3 , заполненное полностью окружностями в том смысле, что каждые две окружности попарно связаны друг с другом. Результат вычисления приведен на рис. П2.5 (вертикальная линия соответствует состоянию «окружность на бесконечности»).

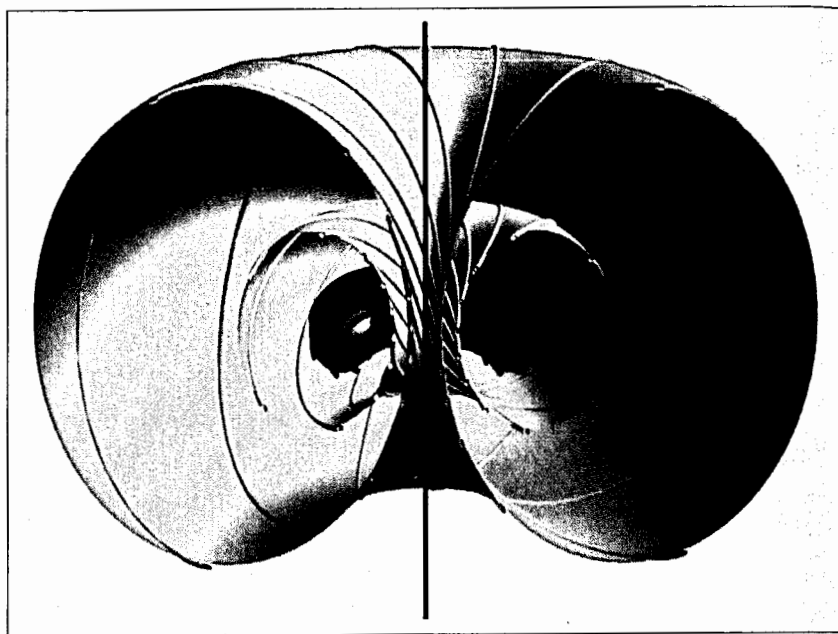


Рис. П2.5. Стереографическая проекция расслоения S^3

Тору соответствует $\alpha = \frac{\pi}{2}$ и $\beta = k \frac{\pi}{8}$, где $k = \{0, 1, 2, 3, 4\}$. При $k=0$ и $k=4$ тор вырождается и соответствует линии и окружности, соответственно. При фиксированных параметрах α и β данные окружности соответствуют при различных γ и охватывают поверхность тора. Примеры таких торов приведены на рис. П2.6.

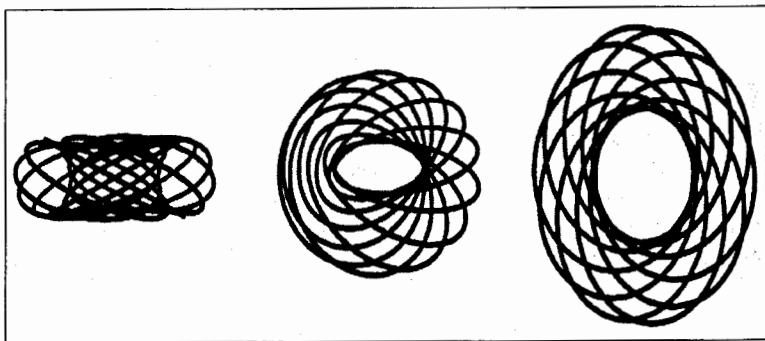


Рис. П2.6. Три примера торов, образуемых при $k=1$ на рис. П2.5

Физическое различие между классическим и квантовым битами показано для наглядности на рис. П2.7.

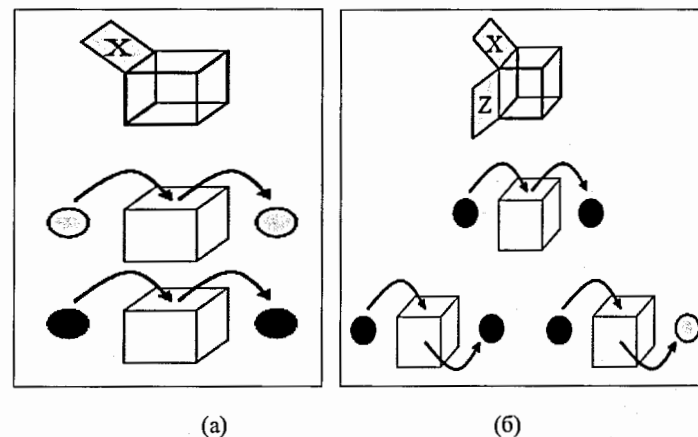


Рис. П2.7. Классический бит (а) и квантовый бит (б)

На рис. П2.8 показан физический механизм изменения качественных свойств квантовой системы в зависимости от условий взаимодействия с внешним прибором.

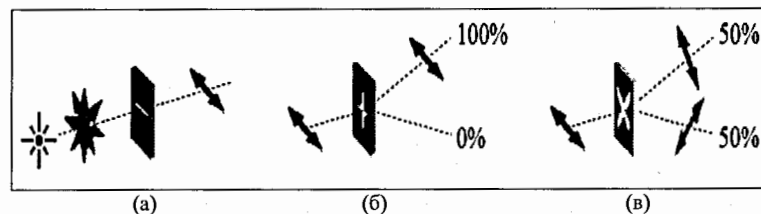


Рис. П2.8. Физическая реализация кубита как поляризованного фотона

Так в случае, представленном на рис. П2.8(а), фотоны из источника с горизонтальной поляризацией проходят через линейный поляризатор и формируется кубит с заданной поляризацией, в этом случае с горизонтальной поляризацией фотонов. В случае, представленном на рис. П2.8(а), фотоны с горизонтальной поляризацией из источника проходят через линейный поляризатор с вертикальной и горизонтальной поляризацией, но, как и в первом случае, имеем фотоны с горизонтальной поляризацией. В третьем случае (рис. П2.8(в)) поляризация в разделителе фотонов имеет диагональные поляризации. Поэтому фотон с вероятностью 50% может быть в обеих формах поляризации (но измерение дает только одну из форм поляризации). При повторном измерении фотон будет обнаружен с данной формой диагональной поляризации, т.е. измерение изменяет состояние фотона. Понятие *амплитуда вероятностей* квантового состояния является комбинацией концепции состояния и фазы.

В случае, когда система состоит из двух квантовых битов, она описывается как тензорное произведение. Например, в обозначениях Дирака двухуровневая бит система задается, как $|\psi, \psi_2\rangle = \alpha\gamma|00\rangle + \alpha\delta|01\rangle + \beta\gamma|10\rangle + \beta\delta|11\rangle$.

Число возможных состояний комбинированной системы возрастает экспоненциально при добавлении квантового бита. Это приводит к проблеме оценки

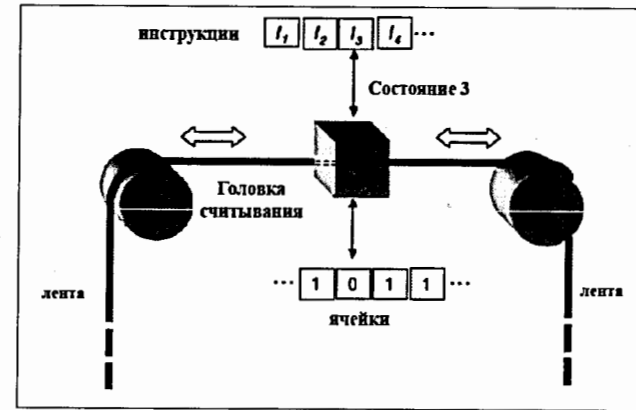
квантовой корреляции, которая присутствует между квантовыми битами в составной системе.

Рассмотрим пример, который иллюстрирует принципиальные отличия квантовых вычислений от классических (в общем случае вероятностных) вычислений.

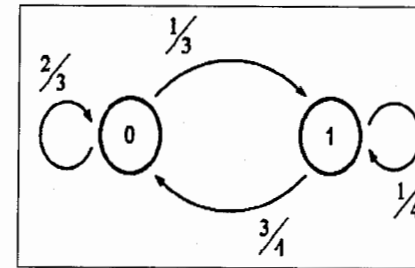
○ *Отличие квантовых вычислений от классических вычислений.* В классических вычислениях, основанных на булевой логике, один бит информации представляется в виде состояний 0 или 1. Два бита представляют четыре состояния 00, 01, 10, и 11; n бит могут представить 2^n состояний. В квантовых вычислениях квантовый бит (кубит) является системой из двух составных состояний в виде одного бита информации. Физически один электрон может моделировать кубит. Направления состояния спина «вверх» и состояния спина «вниз» электрона представляют два состояния 0 и 1, соответственно. Фотон также может представлять физическое состояние кубита, а его горизонтальная и вертикальная составляющие поляризации могут реализовать оба состояния одновременно.

Важное и принципиальное отличие заключается в том, что один кубит представляет собой суперпозицию состояний 0 и 1. Поэтому можно представить состояния 0 и 1 кэт – векторами $|0\rangle$ и $|1\rangle$, соответственно, так, что состояние суперпозиции представляет линейную комбинацию $|0\rangle$ и $|1\rangle$ в виде: $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$, где коэффициенты a и b представляют значения амплитуд вероятностей. Поэтому, согласно постулату Борна, величина $|a|^2$ является вероятностью, что вектор суперпозиции $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ после измерения кубита будет: $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ и величина $|b|^2$ является вероятностью, что вектор суперпозиции $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ после измерения кубита будет: $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$. Тогда $|a|^2 + |b|^2 = 1$ в соответствии с законом сохранения вероятности полного события. Если, в частности, амплитуды вероятностей a и b равны $1/\sqrt{2}$, то имеем состояние суперпозиции $|\psi\rangle = (a=1/\sqrt{2})|0\rangle + (b=1/\sqrt{2})|1\rangle$, а вектора $|0\rangle = (1,0)^T$ и $|1\rangle = (0,1)^T$. При измерении состояния суперпозиции $|\psi\rangle$ состояние $|0\rangle$ наблюдается (измеряется) с вероятностью $(1/\sqrt{2})^2 = 1/2$ и $|1\rangle$ также с вероятностью $(1/\sqrt{2})^2 = 1/2$.

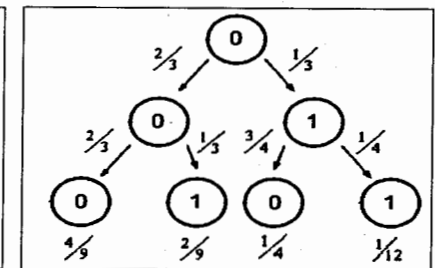
Такое необычное для булевой логики свойство квантовых вычислений создает возможность параллельных массивных вычислений. Поскольку каждый кубит представляется двумя состояниями, то два кубита представляются четырьмя состояниями одновременно. Например, если использовать в качестве входных сигналов два кубита в суперпозиционном состоянии 0 и 1, то в результате обрабатываются четыре операции для четырех входных сигналов для четырех выходных сигналов за один шаг, в то время как на классическом компьютере требуется для обработки четыре шага. Для n кубитов суперпозиция из 2^n состояний составляет входной сигнал, и решение проблемы осуществляется за один шаг, в то время как для классического компьютера требуется 2^n шагов. Сравним теперь отличие и результаты работы классического и квантового компьютера на примере вероятностной классической и квантовой машин Тьюринга для выяснения роли интерференции в квантовых вычислениях. В качестве модели машины Тьюринга (рис. П2.9(а)) рассмотрим дерево вычислений, представленное на рис. П2.9(б) и П2.9(в).



(а)



(б)



(в)

Рис. П2.9. Машина Тьюринга (а) диаграмма перехода состояний (б) и дерево вычислений вероятностной машины Тьюринга (в)

На рис. П2.9 вершина дерева означает состояние машины Тьюринга, ребро означает вероятность события перехода. Уровень дерева означает шаг вычисления, а источник вершины дерева представляет состояние старта вычисления.

Вычислительный процесс, т.е. временная эволюция машины Тьюринга, определяется т. н. переходной функцией δ - зависимости от текущего состояния управления $q \in Q$ и символа $\sigma \in \Sigma$, обозначающего ячейку ленты, в которой находится головка считывания машины. Когда машина Тьюринга переходит в некоторое новое внутреннее состояние $q' \in Q$, в данную ячейку ленты записывается некоторый символ $\sigma' \in \Sigma$ и затем записывающая головка перемещается влево (L) или вправо (R). Таким образом, функция перехода δ является отображением:

$$\delta: Q \times \Sigma \rightarrow Q \times \Sigma \times \{L, R\}.$$

Например, рассмотрим машину Тьюринга с алфавитом $\Sigma = \{0, 1, \#\}$, внутренним состоянием $Q = \{q_0, q_1, q_f\}$ и функцией перехода δ в виде

$$\begin{aligned}
 q_0, 0 &\xrightarrow{\delta} q_1, 1, R \\
 q_0, 1 &\xrightarrow{\delta} q_1, 0, R \\
 q_1, 0 &\xrightarrow{\delta} q_1, 1, R \\
 q_1, 1 &\xrightarrow{\delta} q_1, 0, R \\
 q_1, \# &\xrightarrow{\delta} q_f, \#, R
 \end{aligned}$$

Состояния $\delta(q_0, \#)$ и $\delta(q_f, \sigma)$ для некоторого σ определяются как функции аргументов. Допустим, что данная машина Тьюринга стартует с некоторым входным битом s полосы, который записан в сегмент ленты $[0, \ell(s) - 1]$. Головка машины установлена в нулевой ячейке. Вычисление на машине Тьюринга осуществляет изменение полосы и процесс останавливается. Например, на рис. П2.10 отображены первые шаги временной эволюции машины Тьюринга для входа $s = 10$.

Квантовая машина Тьюринга определяется по аналогии с машиной Тьюринга, но с очень важным отличием, что функция перехода описывается *амплитудой* перехода. Вместо простого классического состояния для каждого внутреннего состояния и символа ленты, в квантовой машине Тьюринга задается *суперпозиция* различных классических состояний.

Например, допустим, что квантовая машина Тьюринга с управляемым внутренним состоянием $q_0 \in Q$ и символом ленты 0 переходит во внутреннее состояние q_1 и записывается 1 и головка сдвигается вправо, а если записывается 0, то сдвигается влево, но при этом оба состояния одновременно находятся в суперпозиции с комплексными амплитудами $\frac{1}{\sqrt{2}}$ и $\frac{-i}{\sqrt{2}}$.

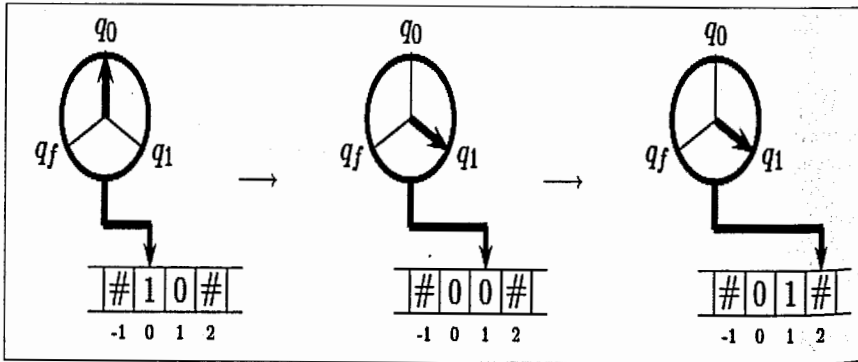


Рис. П2.10. Временная эволюция машины Тьюринга

Данная операция в символьном виде представлена на рис. П2.11.

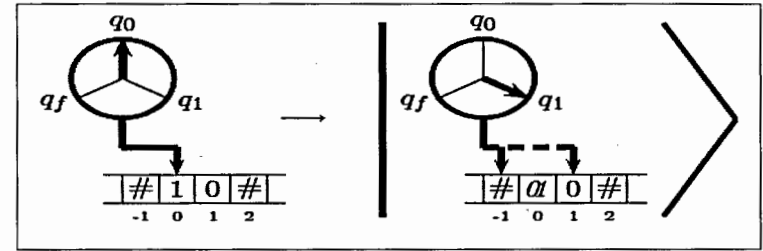


Рис. П2.11. Один шаг временной эволюции квантовой машины Тьюринга

Для данного варианта вычисления можно записать амплитуду перехода как отображение

$$q_0, 0 \xrightarrow{\delta} \frac{1}{\sqrt{2}}(q_1, 1, R) + \frac{-i}{\sqrt{2}}(q_1, 0, L).$$

Формально амплитуда перехода δ является отображением $Q \times \Sigma$ в комплексные функции на $Q \times \Sigma \times \{L, R\}$.

Если квантовая машина Тьюринга функционирует в Гильбертовом пространстве состояний, то амплитуда перехода линейно расширяется до определения глобальной временной эволюции на данном Гильбертовом пространстве и является унитарной. Вычислим вероятность перехода $0 \rightarrow 1$ после двух шагов вычислений, просуммировав вероятности двух возможных путей из вершины в состоянии 1 следующим образом:

$$P(0 \rightarrow 1) = \left(\frac{2}{3} \times \frac{2}{3}\right) + \left(\frac{1}{3} \times \frac{1}{4}\right) = \frac{2}{9} + \frac{1}{12} = \frac{11}{36}.$$

Аналогично $P(0 \rightarrow 0) = \left(\frac{2}{3} \times \frac{2}{3}\right) + \left(\frac{1}{3} \times \frac{3}{4}\right) = \frac{4}{9} + \frac{3}{12} = \frac{25}{36}$. Таким образом, за два шага

вычислений, стартуя из состояния 0 вероятностная машина Тьюринга перейдет в состояние 1 с вероятностью 11/36 и в состояние 0 с вероятностью 25/36.

○ *Интерференция квантовых вычислений.* По аналогии с вероятностной машиной Тьюринга, опишем вычисления на квантовой машине Тьюринга, используя дерево вычислений, представленное на рис. П2.12.

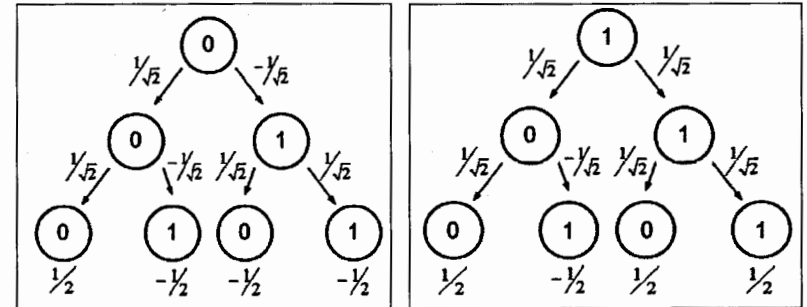


Рис. П2.12. Вычисления на квантовой машине Тьюринга
а – старт из состояния 0; б – старт из состояния 1

Отметим одну из особенностей квантовых вычислений на квантовой машине Тьюринга, которая связана с явлением квантовой интерференции амплитуд вероятностей. В квантовой машине Тьюринга каждое ребро представляет амплитуду вероятностей, в то время как в вероятностной машине Тьюринга каждое ребро представляет вероятность перехода. Только одно состояние обрабатывается на заданном уровне в заданный момент времени в вероятностной машине Тьюринга.

В квантовой машине Тьюринга, напротив, все состояния на заданном уровне обрабатываются одновременно. Например, вероятность события перехода $0 \rightarrow 1$ из источника вершины, после одного шага вычисления, определяется как $\left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2}$ и

вероятность события перехода $0 \rightarrow 0$ при таких же условиях определяется как $\left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2}$.

Вычислим теперь вероятность перехода $0 \rightarrow 1$ после двух шагов вычислений. Во-первых, необходимо найти амплитуды вероятности по двум возможным путям перехода: $\psi(0 \rightarrow 0 \rightarrow 1)$ и $\psi(0 \rightarrow 1 \rightarrow 1)$, т. е.

$$\psi(0 \rightarrow 0 \rightarrow 1) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = \frac{1}{2}, \quad \psi(0 \rightarrow 1 \rightarrow 1) = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \times \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = -\frac{1}{2}.$$

Сложим обе амплитуды вероятностей событий перехода

$$\psi(0 \rightarrow 1 \text{ после двух шагов}) = \psi(0 \rightarrow 0 \rightarrow 1) + \psi(0 \rightarrow 1 \rightarrow 1) = \left(\frac{1}{2}\right) + \left(-\frac{1}{2}\right) = 0.$$

Таким образом, вероятность перехода $0 \rightarrow 1$ после двух шагов определяется как

$$P(0 \rightarrow 1 \text{ после двух шагов}) = |\psi(0 \rightarrow 1 \text{ после двух шагов})|^2 = |0|^2 = 0.$$

Аналогично вычисляется вероятность перехода $0 \rightarrow 0$ после двух шагов в виде:

$$\psi(0 \rightarrow 0 \rightarrow 0) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2}, \quad \psi(0 \rightarrow 1 \rightarrow 0) = \left(-\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \times \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) = -\frac{1}{2},$$

$$\psi(0 \rightarrow 0 \text{ после двух шагов}) = \psi(0 \rightarrow 0 \rightarrow 0) + \psi(0 \rightarrow 1 \rightarrow 0) = \frac{1}{2} + \left(-\frac{1}{2}\right) = 0,$$

$$P(0 \rightarrow 0 \text{ после двух шагов}) = |\psi(0 \rightarrow 0 \text{ после двух шагов})|^2 = |0|^2 = 0.$$

Получили замечательный результат.

После одного шага вычислений вероятности перехода $0 \rightarrow 1$ и $0 \rightarrow 0$ были обе равны $\frac{1}{2}$. Но после двух шагов вычислений из одного источника (вершины) вероятность перехода $0 \rightarrow 1$ равна 0, а вероятность перехода $0 \rightarrow 0$ равна 1. Данный результат возможен, в силу свойства амплитуды вероятностей принимать отрицательные значения, и означает, что состояния квантовой машины Тьюринга интерферируют друг с другом.

В этом случае, переход $0 \rightarrow 1$ после двух шагов имеет конструктивную интерференцию $\left[(-1/2) + (-1/2)\right] = -1$, а переход $0 \rightarrow 0$ после двух шагов имеет деструктивную интерференцию $\left[(1/2) + (-1/2)\right] = 0$.

о *Оператор плотности*. В квантовой механике квантовое состояние $|\psi\rangle$ выражается оператором плотности состояния ρ . Матрица плотности ρ квантовой системы имеет следующие свойства: $\rho^\dagger = \rho$ (Эрмитова матрица); $\rho > 0$ (положительная матрица); $\text{Tr} \rho = 1$ (нормированная матрица). Если состояние квантовой системы известно точно, то система описывается оператором плотности в матричном виде $\rho = |\psi\rangle\langle\psi|$ и находится в *чистом* состоянии. В противном случае система пребывает в *смешанном* состоянии. В этом случае имеем смесь из различных чистых состояний, описываемую оператором плотности $\rho = \sum_i p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$ в ансамбле $\{p_i, |\psi_i\rangle\}$.

Матрицы, удовлетворяющие перечисленным условиям, образуют выпуклое множество. Поэтому они могут быть записаны в виде $\rho = \sum_k p_k |\psi_k\rangle\langle\psi_k|$, где $|\psi_k\rangle$ - единичные

векторы Гильбертова пространства и $p_k > 0$, $\sum_k p_k = 1$. Коэффициент p_k для

заданного k может интерпретироваться как вероятность нахождения квантовой системы в чистом состоянии $|\psi_k\rangle$. Однако данная физическая интерпретация зависит от представления $\rho = \sum_k p_k |\psi_k\rangle\langle\psi_k|$, которое не является однозначным, т.к. разные

состояния могут иметь одинаковую матрицу плотности.

В частности, векторы могут быть выбраны ортонормальными и интерпретированы как собственные векторы матрицы плотности ρ с собственными значениями p_k , а форма $\rho = \sum_k p_k |\psi_k\rangle\langle\psi_k|$ называется спектральным представлением ρ . Чистые

состояния представляют собой одномерные проекторы $|\psi\rangle\langle\psi|$ и являются экстремальными точками выпуклого множества матриц плотности.

Таким образом, на основе матриц плотности чистых состояний воспроизводятся все остальные матрицы плотности, соответствующие смешанным состояниям как выпуклая комбинация в виде $\rho = \sum_k p_k |\psi_k\rangle\langle\psi_k|$, но сами они не допускают описания в виде

нетривиальной выпуклой комбинации других матриц.

Существует простой критерий определения типа состояния квантовой системы: если след матрицы плотности $\text{Tr}(\rho^2) = 1$, то квантовая система находится в чистом состоянии; если $\text{Tr}(\rho^2) < 1$, имеет место смешанное состояние. Определение и вычисление следа оператора плотности дано ниже.

С точки зрения теории информации, в квантовом бите содержится точно такое же количество информации, как и в классическом бите, несмотря на бесконечное множество виртуальных состояний квантового бита. Квантовый бит может быть описан бесконечным числом суперпозиций классических состояний, но из-за необратимого характера процесса измерения можно извлечь только простой классический бит информации из одного среди возможных состояний. При этом остальные виртуальные состояния разрушаются, и происходит потеря информации. Основанием для данного утверждения (в квантовом бите содержится не больше количества информации, чем в классическом бите) является тот факт, что информация извлекается в результате физического процесса измерений.

За счет измерения квантового бита происходит изменение его состояния и в результате он переходит в одно из возможных базисных состояний. Каждый квантовый бит существует в двухмерном пространстве, его измерение ассоциируется с соответствующим базисом и выражает результат только в одном из двух состояний, т.е. один из базисных векторов ассоциирован с данным измерительным прибором.

Таким образом, как и в классическом случае, при измерении квантового бита существует только два возможных результата. Поскольку измерение изменяет состояние квантового бита, то невозможно осуществить одновременно регистрацию состояния в двух различных базисах. При моделировании классической динамической системы, ее состояние можно измерить на первом этапе в одном базисе, затем - на втором этапе в другом базисе.

В истинно квантовой системе подобное действие невозможно, так как при измерении происходит разрушение волновой функции, описывающей состояние квантового бита. Более того, квантовые состояния в истинно квантовой системе невозможно клонировать, т.е. существуют объективные физические ограничения, в силу которых не удастся проводить измерение двумя разными путями, используя, например, копирование квантового бита и его регистрацию в различных базисах.

В отличие от квантового бита состояние классического бита можно копировать и осуществлять измерение в различных вычислительных базисах. Более того, неизвестный квантовый бит нельзя «расщепить» на взаимно дополняющие части, т.е. содержащаяся в неизвестном состоянии квантового бита информация неразделима. Следовательно, в квантовой механике допустимы операции, невозможные в классической механике. И, наоборот, в классической механике существуют операторы решения задач, недопустимые в квантовой механике.

Примечание 23. Вычислительный базис $\{|+\rangle, |-\rangle\}$. Для описания и измерения квантового бита ранее использовался вычислительный базис $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Однако такой выбор вычислительного базиса не является единственным. Возможно использование различных множеств векторов в качестве ортонормальных базисов. Например, базисные векторы допустимо представлять в виде состояний $\{|+\rangle, |-\rangle\}$, определяемых как $\left\{ \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right\}$, соответственно. Используя данное представление базисных векторов, можно перейти к традиционному базису: $|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle + |-\rangle)$ и $|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle - |-\rangle)$.

П2.1.2. Квантовые операторы суперпозиции, квантовой корреляции (запутанные состояния - entanglement), интерференции и измерений

Операторы суперпозиции, квантовой корреляции (запутанные состояния - entanglement) и интерференция являются основными операторами проектирования квантовых алгоритмов. Рассмотрим алгоритмические особенности формирования данных операторов.

Пример 11: *Формирование состояния суперпозиции с помощью оператора Адамара (Уолша-Адамара).* Существование состояния суперпозиции и эффекта измерения квантового состояния физически означает, что присутствует *скрытая от наблюдателя*

информация, которая содержится в замкнутой квантовой системе (до момента ее возбуждения от внешнего возмущения) в виде наблюдения квантового состояния. Система остается замкнутой до взаимодействия с внешней средой (т.е. до действия наблюдения системы). Важнейшим в этом случае является следующий вопрос: как эффективно использовать скрытую в суперпозиции информацию?

В традиционном формализме квантовых вычислений квантовые операторы описываются в эквивалентной матричной форме. Умножение матрицы оператора на вектор состояния означает действие операции на исследуемую систему. Например, действие матрицы Адамара (H) на систему $|\psi\rangle = |0\rangle$ может быть представлено как

$$H|\psi\rangle = H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle + |1\rangle).$$

Аналогично,

$$H|\psi\rangle = H|1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix} \right) = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle),$$

т.е. преобразование Адамара порождает состояние квантового бита в виде суперпозиции двух классических состояний.

На рис. П2.13 показано действие оператора Адамара.

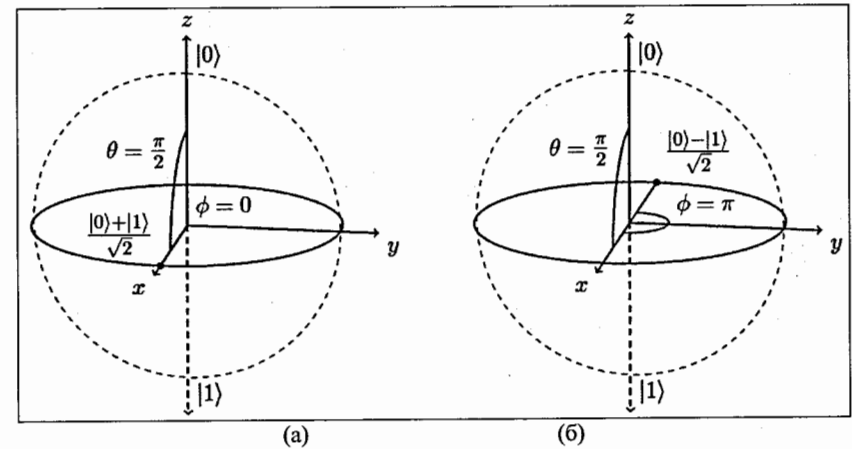


Рис. П2.13. Представление оператора Адамара на сфере Блоха для базисного состояния $|0\rangle$ (а) и для базисного состояния $|1\rangle$ (б)

Формирование суперпозиции с эквивалентными амплитудами вероятностей - важный шаг для многих КА. Применяя $H^{\otimes n}$ на соответствующих базисных состояниях $|x\rangle \in \mathcal{H}_n$, $x \in \{0,1\}^n$, получим в результате эквивалентную форму преобразования Адамара:

$$H|x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{z=0,1} (-1)^{x \cdot z} |z\rangle, \text{ где } x \cdot z = x_1 z_1 + \dots + x_n z_n \text{ для } x=0 \text{ и } x=1.$$

Таким образом, суперпозицию с эквивалентными амплитудами вероятностей $\frac{1}{\sqrt{2^n}}$ для каждого базисного состояния получают применением оператора $H^{\otimes n}$ к состоянию $|0\rangle$.

Значение состояния суперпозиции для теории вычислительных процессов становится более понятным, если интерпретировать результирующее суперпозиционное состояние как набор 2^n классических траекторий (путей) вычислений с эквивалентными весами, по которым квантовый компьютер физически проводит вычисления параллельно.

В этом смысле суперпозиция выступает как первый этап на пути организации квантового параллелизма.

Пример 12: *Квантовый параллелизм и модели вычислений с квантовым оракулом.* Рассматриваемый эффект является одним из важнейших в квантовых вычислениях и используется (также, как и суперпозиция) во многих моделях КА. Он особенно широко применяется в различных моделях «черного ящика» или «квантового оракула» при проектировании разного класса КА, например, для вычислений функций следующего вида $g: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}^m$. Поскольку отображение $x \rightarrow (x, g(x))$, $x \in \{0,1\}^n$ обратимо, то существует унитарное преобразование U_g , эффективно моделируемое классическими вычислениями $(x, g(x))$ так, что $|x, y\rangle \rightarrow |x, y \oplus g(x)\rangle$ для некоторого $y \in \{0,1\}^m$. При этом дополнительные квантовые биты, необходимые для реализации обратимых схемных преобразований, здесь не рассматриваются. Преобразование U_f , описывающее «черный ящик» (как частный случай U_g), представляет унитарное преобразование в виде Булевой функции $f: \{0,1\}^n \rightarrow \{0,1\}$. Если $|y\rangle$ - начальное состояние $|0\rangle$, то после применения преобразования U_f выход преобразования $f(x)$ будет $|x, f(x)\rangle$. Физический смысл квантового параллелизма заключается в наличии эффекта параллелизма вычислений после использования преобразования U_f для суперпозиционного состояния, представляющего различные значения x . Так применяя U_f к состоянию

$$|x, y\rangle = |\psi, 0\rangle, \quad |\psi\rangle = H^{\otimes n} |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{z \in \{0,1\}^n} |z\rangle,$$

имеем в результате, $U_f |\psi, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{z \in \{0,1\}^n} |z, f(z)\rangle$, т.е. суперпозицию всех возможных значений вычисляемой функции. Таким образом, применение только одного шага для оценки значений функции $f(x)$ является достаточным для вычисления параллельно значений $f(x)$ от всех возможных входных аргументов x .

Данный эффект эквивалентен применению свойств «черного ящика» (одноразовое применение внутренней квантовой схемы). Однако в действительности только одно

значение функции $f(x)$ доступно при измерении результата вычисления $f(x)$ в суперпозиции возможных состояний, так как из-за эффекта разрушения состояний в суперпозиции доступно только одно случайно измеренное состояние.

Обсуждение выбора модели квантового оракула для КНВ и его обоснование дано ниже.

Примечание 24. О вычислении значений функции с помощью фазы. Применение оператора U_f к управляемому квантовому биту в состоянии суперпозиции

$|\varphi\rangle := \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$ дает следующий результат:

$$U_f |x, \varphi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|x, f(x)\rangle - |x, 1 \oplus f(x)\rangle) = (-1)^{f(x)} |x\rangle \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle - |1\rangle) = (-1)^{f(x)} |x, \varphi\rangle.$$

Опуская $|\varphi\rangle$, можно определить новое преобразование типа $V_f: |x\rangle \rightarrow (-1)^{f(x)} |x\rangle$.

Следовательно, V_f позволяет вычислить значения функции $f(x)$ через фазу. Другими словами, вычисление возможно через преобразование значений f из базовых состояний в амплитуды относительно данных базовых состояний.

Теперь, применяя V_f к вектору $|\psi\rangle$, получим следующее состояние:

$$|\psi'\rangle = V_f |\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{z \in \{0,1\}^n} (-1)^{f(z)} |z\rangle \quad (\text{П2.1})$$

Это соответствует применению к управляемому квантовому биту операции

$$\left[U_f H^{\otimes(n+1)} (|0\rangle^{\otimes n} |1\rangle) \right].$$

Пример 13: *Моделирование квантовой корреляции (запутанных состояний - entanglement) с помощью CNOT-подобных операторов.* Корректная оценка вычислительной мощности квантовых вычислений возможна только с помощью установления корреляций между значениями переменных в КА в различные моменты времени. В качестве примера рассмотрим систему из двух квантовых битов A и B . В соответствии с законом тензорного произведения векторных пространств размерность пространства \mathcal{H}_{AB} составной системы AB определяется как произведение размерностей пространств \mathcal{H}_A и \mathcal{H}_B , т.е. как $\mathcal{H}_{AB} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$. Вычислительный базис состояний $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$ для составной системы AB выражается через базисные состояния систем A и B $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ тензорным произведением:

$$|x_1 x_2\rangle = |x_1\rangle \otimes |x_2\rangle, \quad \forall (x_1, x_2) \in \{0,1\}^2.$$

При этом в составной системе квантовых битов существуют состояния, которые не могут быть выражены через тензорное произведение отдельных компонент квантовых бит. Это свойство называется *запутыванием (entanglement)* или неразделимостью (*nonseparability*) квантовых состояний. Допустим, что $|\psi_{AB}\rangle$ состоит из двух состояний.

Если существуют два состояния $|\varphi_A\rangle$ в \mathcal{H}_A и $|\varphi_B\rangle$ в \mathcal{H}_B , такие, что $|\psi_{AB}\rangle = |\varphi_A\rangle \otimes |\varphi_B\rangle$, то состояние называется *разделимым (или unentangled)*. В противном случае оно является *запутанным (entanglement)* или *неразделимым (unseparable)*. В качестве примеров можно привести систему из двух квантовых битов известную как состояния

Белла или ЭПР-состояния (в честь пионеров этих примеров Белла и Эйнштейна, Подольского и Розена):

$$|\phi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle); \quad |\psi^{\pm}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle).$$

Когда производится измерение таких состояний, как подсистем в составной системе запутанных состояний, то при известном результате об одном состоянии подсистемы можно точно определить состояние другой подсистемы (без проведения над ней измерений). Поэтому существует другой вариант в интерпретации таких состояний: если рассматривают одно из состояний как запутанное, это означает, что состояние нельзя факторизовать в состояние произведения из подсистем двух состояний. Таким образом, если применяется оператор к одной из компонент запутанного состояния, то результат действия не факторизуется по остальным компонентам, а вычисляется для этих компонент непосредственно по одной из измеряемых компонент.

Действуя оператором Адамара H на состояние Белла $|\phi^{\pm}\rangle$, на первую компоненту, в результате получим:

$$H_1 \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}\{(H_1|0\rangle)|0\rangle + (H_1|1\rangle)|1\rangle\} = \frac{1}{2}(|00\rangle + |10\rangle + |01\rangle - |11\rangle),$$

или в матричной форме:

$$H_1 \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \end{pmatrix},$$

т.е. имеем новое запутанное состояние, которое используется в обратной связи квантового генетического поискового алгоритма для обогащения квантовой корреляции запутанного состояния. Последовательно действуя на вторую компоненту полученного состояния оператором Адамара H_2 , приходим к результату:

$H_2 H_1 \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$. К сожалению, сложность реализации операций квантовыми ячейками в данном подходе возрастает с числом запутанных состояний, связанных с управляемым битом.

Примечание 25. Эффективное моделирование КА на классических компьютерах. Запутанные состояния в квантовых вычислениях рассматриваются как дополнительный физический ресурс, позволяющий существенно увеличить расчетную мощность по сравнению с классическими моделями вычислений. Число параметров, необходимых для описания незапутанных (чистых) состояний в заданном Гильбертовом пространстве \mathcal{H}_n (представленных как тензорное произведение квантовых битов), возрастает только линейно с увеличением числа n квантовых битов. Однако для описания общего вида состояния (незапутанного или запутанного) требуется экспоненциальное число (2^n) векторных коэффициентов. Поэтому вопрос о физическом ресурсе квантовых вычислений не имеет простого ответа.

Данная проблема обсуждалась в деталях с общих позиций теории квантовых вычислений. Было показано, в частности, что для КА (оперирующих чистыми состояниями) для повышения эффективности по сравнению с классическими аналогами с увеличением размерности входных квантовых битов требуется неограниченное число

запутанных состояний. Более того, эффективно КА можно моделировать классическим инструментарием (классическими алгоритмами) только при наличии малого количества квантовой корреляции и фиксированном уровне толерантности вычислительных операций в КА. Было показано, как можно эффективно классическими алгоритмами моделировать КА со сравнительно слабой квантовой корреляцией.

Вычислительная стоимость возрастает линейно с числом входных квантовых бит и экспоненциально - с увеличением требуемого количества квантовой корреляции. Независимое обобщение такого подхода приведено в данном разделе и разработано соответствующее программно-аппаратное обеспечение для эффективного моделирования КА на классических компьютерах (см., Приложение П1). Этот подход использован при моделировании в реальном времени робастных БЗ для интеллектуальных нечетких регуляторов.

Изложенные аргументы и результаты свидетельствуют о предпочтительной роли квантовой корреляции как движущей силы квантовых вычислений (на чистых состояниях эволюции квантовой динамики).

Пример 14: *Моделирование квантовой интерференции с помощью преобразования Адамара и квантового преобразования Фурье (КПФ).* С целью повышения вероятности измерения и извлечения искомого (маркированного) решения основной единой идеей в процессах проектирования моделей КА служит использование явления конструктивной / деструктивной интерференции в качестве инструментария извлечения результатов эффективных вычислений КА. Для увеличения вероятности извлечения «успешного» решения применяется конструктивная интерференция, а для редукции «плохих» решений - деструктивная интерференция. Конструктивный (деструктивный) эффект можно проиллюстрировать наглядно на примере применения преобразования Адамара

к состояниям: $\{|0\rangle, |1\rangle\}, \{|\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \pm |1\rangle)\}$. Очевидно, что $H|0\rangle = |+\rangle$ и $H|1\rangle = |-\rangle$, т.е.

воспроизводится состояние суперпозиции классических состояний в виде квантовых битов. При этом применение преобразований Адамара к состояниям $|0\rangle$ и $|1\rangle$ порождает состояния с одинаковым распределением вероятностей. Поскольку состояние $|+\rangle$ является суперпозицией обоих классических состояний $|0\rangle$ и $|1\rangle$, то, при повторном применении преобразовании Адамара к $|+\rangle$, классическая модель логического вывода (модель Колмогорова) предполагает одинаковую вероятность результирующего классического состояния (принцип сохранения вероятности). Однако, вследствие оперирования в квантовых вычислениях с понятием амплитуды вероятностей, применение преобразования Адамара к состоянию $|+\rangle$ дает следующий

$$\text{результат: } H|+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle + |-\rangle) = |0\rangle.$$

Таким образом, проявился эффект *интерференции* между вероятностями обоих классических состояний. Интерференция (в силу своего физического характера) усилила амплитуду вероятности одного ($|0\rangle$) классического состояния (*конструктивная* интерференция) и ослабила существенно (до нуля) амплитуду вероятности другого ($|1\rangle$) классического состояния (*деструктивная* интерференция). Действуя на суперпозицию возможных решений, интерференция реализует процесс формирования финальной фазы квантовых вычислений и является (так же, как и квантовая корреляция) физическим ресурсом усиления квантовых вычислений, а также

для решения различных проблем проектирования моделей КА. Например, применяя преобразование $H^{\otimes n}$ к состоянию $|\psi'\rangle$ в виде (П2.1), получим в результате квантовое состояние вида:

$$\frac{1}{2^n} \sum_{z \in \{0,1\}^n} \sum_{x \in \{0,1\}^n} (-1)^{x \cdot z + f(x)} |z\rangle,$$

которое может служить основой для проектирования квантовой ячейки, например, при решении проблемы Deutsch-Jozsa.

В модели КА Шора при факторизации произведения на простые числа интерференцию обеспечивает оператор КДФ, т.к. оператор $QFT_n \otimes I_n$ действует на каждый базисный вектор, принадлежащий линейной комбинации исходного вектора $|\psi\rangle$. Это означает, что любой вектор в такой комбинации воспроизводит суперпозицию базисных векторов. Комплексные весовые коэффициенты базисных векторов равны по модулю (т.е. амплитуды вероятностей равны), но имеют различные фазы. Каждый базисный вектор является взвешенной суммой амплитуд вероятностей, полученных из разных последовательностей базисных векторов.

Данная сумма может увеличивать или уменьшать результирующую амплитуду вероятностей. Так как этот эффект подобен эффекту интерференции классических волн, то говорят, что оператор $[QFT_n]_{ij} = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \exp\left\{2\pi J \left[\frac{(i-1)(j-1)}{2^n}\right]\right\}$ играет роль

оператора интерференции. С математической точки зрения, когда оператор $QFT_n \otimes I_n$ действует на состояние, то все столбцы результирующей матрицы задействованы при вычислении. Интерференция в этой ситуации осуществляется между весовыми коэффициентами из разных последовательностей базисных векторов. Рассмотрим теперь особенности очень важного (и часто дискутируемого в работах по описанию основ квантовой механики) квантового оператора, описывающего необратимый процесс извлечения результата квантовых вычислений.

Пример 15: *Измерения в разных вычислительных базисах.* Постулат квантовых измерений был введен фон Нейманом. Рассматривались только проективные измерения, в которых «стандартные» квантовые наблюдения величины A имеют спектральное представление в терминах ортогональных проективных операторов. Постулат утверждает, что во время измерения A вектор состояния квантовой системы редуцируется в собственный вектор наблюдаемой величины A , соответствующий результату измерения. Таким образом, базис основного подхода к построению моделей процессов измерений в квантовых вычислениях составляет постулат о проекциях фон Неймана: результат действия наблюдения состояния ψ над наблюдаемой величиной A как результат измерения есть одно из собственных значений A , т.е. измерение разрушает состояние ψ и ренормализует его.

Для конечномерного Гильбертова пространства математически это означает следующее: пусть \mathcal{H} - Гильбертово пространство размерности n квантовой системы S . Допустим, что $A = \sum_{i=1}^n \lambda_i |\phi_i\rangle\langle\phi_i| = \sum_{i=1}^n \lambda_i P_i$ - спектральное представление наблюдаемой величины A , где λ_i - собственные значения и ϕ_i - собственный вектор, соответствующий λ_i ; $\{\phi_i\}_{i=1}^n$ - ортонормальный базис пространства \mathcal{H} и P_i - проекция

на собственное пространство оператора A (натянутое на собственные векторы) с собственными значениями λ_i .

Возможное значение проективного измерения отвечает собственному значению λ_i наблюдаемой величины A . Наблюдаемая величина A состояния $|\psi\rangle = \sum_{i=1}^n |\phi_i\rangle$

воспроизводится как значение λ_i с вероятностью $\left|\sum_{j=1}^k c_j\right|^2$, где c_1, \dots, c_k такие, что

$\lambda_{i_1} = \lambda_{i_2} = \dots = \lambda_{i_{k-1}} = \lambda_{i_k} = \lambda_i$, и при этом состояние системы после измерения определяется как

$$\sum_{j=1}^k \lambda'_j |\phi_j\rangle\langle\phi_j|, \text{ где } \lambda'_j = \frac{\lambda_{i_j}}{\sqrt{\sum |c_{i_j}|^2}}.$$

Таким образом, до измерения квантовой системы в состоянии $|\psi\rangle$ возможный результат измерения определяется как $p(m) = \langle\psi|P_m|\psi\rangle$, а после измерения система ренормализуется в состояние $|\psi'\rangle = \frac{P_m|\psi\rangle}{\sqrt{p(m)}}$. Полнота уравнений устанавливается фактом из теории вероятностей:

$$1 = \sum_m p(m) = \sum_m \langle\psi|P_m|\psi\rangle. \quad (\text{П2.2})$$

Постулат о проективных измерениях получил развитие в разных направлениях.

▪ *Постулат обобщенного квантового измерения.* Модель обобщенного квантового измерения (замкнутая квантовая система S в конечномерном пространстве состояний) описывается набором $\{M_m\}$ операторов измерений на Гильбертовом пространстве \mathcal{H} квантовой системы S , где индекс m указывает на возможный исход (результат) процесса измерений. Операторы измерений удовлетворяют условию полноты: $\sum_m M_m^\dagger M_m = I$.

Если состояние системы S есть $|\psi\rangle$ до измерения, то вероятность получить выходное значение m определяется как $p(m) = \langle\psi|M_m^\dagger M_m|\psi\rangle$. В последнем выражении и далее символ « \dagger » означает операцию сопряжения унитарного оператора. После измерения система S ренормализуется как $|\psi'\rangle = \frac{M_m|\psi\rangle}{\sqrt{p(m)}}$. Из данной модели измерений

как частный случай следуют модели проективных измерений и положительно-определенные операторно-значимые (ПООЗ) меры измерений. Так, например, если M_m удовлетворяет двум дополнительным ограничениям: $M_m = M_m^\dagger$, $M_m M_{m'} = \delta_{mm'} M_m$, то получим представленную ранее модель проективных измерений.

При выполнении условия: $E = M_m^\dagger M_m$, имеем ПООЗ меры измерений.

В квантовой теории информации существуют строгие правила и законы, описывающие процессы извлечения информации из неизвестного квантового состояния. Результат проективных измерений квантовых битов должен быть

сформулирован в классических терминах. Более точно любое проективное измерение одного квантового бита приносит только один классический бит информации. Поэтому, несмотря на существование бесконечного множества возможных квантовых состояний квантового бита, эти состояния не различимы. Не существует процессов измерений в рамках модели фон Неймана, с помощью которых можно извлечь информации больше чем один ожидаемый бит информации из квантового бита. Идентификация состояния квантового бита не является полной, т.е. для неизвестного состояния квантового бита $|\psi\rangle$ с помощью проективных измерений невозможно определить его истинное состояние. Измерение состояния квантового бита $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$, соответствующее наблюдению $\{\mathcal{O}_1, \mathcal{O}_2\}$ (где \mathcal{O}_1 (\mathcal{O}_2) - подпространство, натянутое на состояние $|0\rangle$ ($|1\rangle$), или, другими словами, в соответствии со стандартным вычислительным базисом $\{|0\rangle, |1\rangle\}$), имеет выходным результатом бит 0 (1) с вероятностью $|a|^2$ ($|b|^2$) и состояние $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ коллапсирует в состояние $|0\rangle$ ($|1\rangle$). Вся другая информация, содержащаяся в суперпозиции, необратимо потеряна. Поэтому для наблюдателя квантовый бит представляется как случайная величина с определенным распределением вероятностей.

Однако квантовый бит $|\psi\rangle = a|0\rangle + b|1\rangle$ можно измерить также относительно других вычислительных базисов бесчисленным образом. Например, часто используется дуальный вычислительный базис

$$\mathcal{D} = \left\{ |+\rangle \equiv |0'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle), |-\rangle \equiv |1'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle) \right\}, |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0'\rangle + |1'\rangle), \\ |1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0'\rangle - |1'\rangle).$$

Тогда $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}([a+b]|0'\rangle + [a-b]|1'\rangle)$ и измерение $|\psi\rangle$ в этом базисе дает 0 (или 1) с вероятностью $\frac{1}{2}|a+b|^2$ (или $\frac{1}{2}|a-b|^2$).

Пример 16: *Квантование классических операторов в различных вычислительных базисах (о соответствии квантовых и классических операторов)*. Рассмотрим в качестве примера проблему «квантования» заданного классического оператора. Допустим, что классическим оператором является однобитовая операция отрицания «НЕТ» (NOT gate), которая конвертирует бит (a) в его дополнение $(1-a)$, $(a=0,1)$. Нетрудно показать, что в качестве квантовой составляющей этой операции достаточно

выбрать унитарную матрицу Паули типа $\sigma_x = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$. Однако если принять операцию отрицания квантового бита в виде матрицы $\gamma_a = |a\rangle\langle a|$, где $|a\rangle = \begin{pmatrix} 1-a \\ a \end{pmatrix}$, то выполняется точно отношение $\gamma_a \xrightarrow{\sigma_x} \gamma_{1-a}$. С другой стороны, матрица Паули $\sigma_z = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ также реализует операцию отрицания «НЕТ»: $\eta_a \xrightarrow{\sigma_z} \eta_{1-a}$ при условии,

что вычислительный базис выбран другим образом, т.е. в виде $\eta_a = |a'\rangle\langle a|$, где $|a'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ (-1)^a \end{pmatrix}$.

Данный простой пример показывает зависимость процедуры установления квантово-классического соответствия от выбора состояний в вычислительном базисе. Более того, даже если выбран вычислительный базис, существует множество вариантов для дальнейшего описания операции. Так, например, если выбрана операция γ_a , то

оператор $\tilde{\sigma}_x = \begin{pmatrix} 0 & e^{i\theta} \\ e^{i\phi} & 0 \end{pmatrix}$ тоже реализует конвертирование бита $\gamma_a \xrightarrow{\tilde{\sigma}_x} \gamma_{1-a}$ для

заданных значений углов (θ, ϕ) . Стандартная операция отрицания, при $\theta = \phi = 0$, является только вариантом, но не единственно возможным. Этот факт объясняется физической природой квантовых состояний, которые описываются лучами, а не векторами в Гильбертовом пространстве. Приведенные аргументы имеют место и при установлении обратного соответствия между квантовыми и классическими операторами, т.е. квантовому оператору могут соответствовать разные классические операторы. Так, например, оператору σ_z соответствуют как операция идентичности:

$\gamma_a \xrightarrow{\sigma_z} \gamma_a$, так и операция отрицания: $\eta_a \xrightarrow{\sigma_z} \eta_{1-a}$.

Пример 17: *Применение моделей измерений в квантовых вычислениях*. Пусть задана составная квантовая система из двух квантовых битов в виде вектора состояний в комплексном пространстве \mathbb{C}^4 в вычислительном базисе:

$$|\psi\rangle = a_0|00\rangle + a_1|01\rangle + a_2|10\rangle + a_3|11\rangle. \quad (\text{П2.3})$$

Отметим, что (П2.3) является обобщенным запутанным состоянием. Если измеряется первый бит в состоянии $|\psi\rangle$, то существуют две возможные ситуации результата измерений ($m=0,1$): первый бит равен нулю ($m=0$), или он равен единице ($m=1$).

В первом случае соответствующий оператор обобщенного измерения определяется как $M_0 = |00\rangle\langle 00| + |01\rangle\langle 01|$, во втором - $M_1 = |10\rangle\langle 10| + |11\rangle\langle 11|$. Вероятность события «первый бит в состоянии $|\psi\rangle$ есть нуль» вычисляется в виде:

$p(0) = \langle \psi | M_0^\dagger M_0 | \psi \rangle = |a_0|^2 + |a_1|^2$, а, после измерения, состояние определяется как

$$|\psi'\rangle = \frac{M_0 |\psi\rangle}{\sqrt{p(0)}} = \frac{M_0 |\psi\rangle}{\sqrt{\langle \psi | M_0^\dagger M_0 | \psi \rangle}} = \frac{a_0 |00\rangle + a_1 |01\rangle}{\sqrt{|a_0|^2 + |a_1|^2}}.$$

Во втором случае вероятность, что первый бит в состоянии $|\psi\rangle$ есть единица, вычисляется как $p(1) = \langle \psi | M_1^\dagger M_1 | \psi \rangle = |a_2|^2 + |a_3|^2$ и, после измерения, состояние системы описывается в следующем виде:

$$|\psi''\rangle = \frac{M_1 |\psi\rangle}{\sqrt{p(1)}} = \frac{M_1 |\psi\rangle}{\sqrt{\langle \psi | M_1^\dagger M_1 | \psi \rangle}} = \frac{a_2 |10\rangle + a_3 |11\rangle}{\sqrt{|a_2|^2 + |a_3|^2}}.$$

Для рассматриваемого примера оператор обобщенного измерения M_m можно определить через операторы проективного измерения: $M_0 = P_{00} + P_{01}$, $M_1 = P_{10} + P_{11}$, где $P_{00}, P_{01}, P_{10}, P_{11}$ - соответствующие проекции на пространство \mathbb{C}^4 следующего вида:

$$P_{00} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, P_{01} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, P_{10} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, P_{11} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix},$$

где $P_{00} + P_{01} + P_{10} + P_{11} = I^{(4)}$ и $I^{(4)}$ - идентичный оператор в \mathbb{C}^4 . Матрицы M_0, M_1 являются двухмерными проекторами в $\mathbb{C}^2 \otimes \mathbb{C}^2$ и могут быть переписаны в виде блочных матриц:

$$M_0 = \begin{pmatrix} I^{(2)} & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, M_1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & I^{(2)} \end{pmatrix},$$

где $I^{(2)}$ - идентичный оператор в комплексном пространстве \mathbb{C}^2 . Нетрудно проверить прямым вычислением, что выполняется следующее необходимое условие:

$$M_0^\dagger M_0 + M_1^\dagger M_1 = I^{(4)}.$$

Рассмотрим соответствующую взаимосвязь с ПООЗ-мерами измерений. В этом случае для двух ПООЗ-мер, следуя определению, верны следующие соотношения:

$$E_0 = M_0^\dagger M_0 = M_0, E_1 = M_1^\dagger M_1 = M_1 \text{ и } E_0 + E_1 = I^{(4)}.$$

Аналогично приведенному выше варианту измерений, если измеряется второй бит в состоянии $|\psi\rangle$, то существуют два других варианта возможных результатов измерений ($m=2,3$): или второй бит нуль, или единица. В первом варианте соответствующий оператор обобщенного измерения будет: $M_2 = |00\rangle\langle 00| + |10\rangle\langle 10|$, а для второго случая - $M_3 = |10\rangle\langle 10| + |11\rangle\langle 11|$, где $M_2 = P_{00} + P_{10}$, $M_3 = P_{01} + P_{11}$. Очевидно, что данные измерения с возможными значениями ($m=2,3$) отличаются от предыдущего варианта ($m=0,1$).

Рассмотрим особенности обсуждаемого формализма описания квантовых процессов измерений на важном примере обобщенных измерений состояний Белла.

Напомним, что четыре состояния Белла имеют вид:

$$|\phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle); |\psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle),$$

являясь максимально запутанными, и образуют базис запутанных состояний в пространстве \mathbb{C}^4 . Их часто называют «магическими» в силу необычных физических свойств и важной роли в квантовых вычислениях.

Выделим частный случай: $|\phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$. Если измерять первый бит в $|\phi^+\rangle$,

то, как и ранее, существует два возможных варианта результата измерений ($m=0,1$): или первый бит нуль, или единица. Для случая $m=0$ имеем ранее приведенный вариант обобщенного измерения M_0 .

Вероятность, что первый измеренный бит в состоянии $|\phi^+\rangle$ будет 0, определяется в виде: $p(0) = \langle \phi^+ | M_0^\dagger M_0 | \phi^+ \rangle = \frac{1}{2}$. После измерения имеем квантовое состояние:

$$|\phi^{+*}\rangle = \frac{M_0 |\phi^+\rangle}{\sqrt{\langle \phi^+ | M_0^\dagger M_0 | \phi^+ \rangle}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}|00\rangle}{\frac{1}{2}} = \sqrt{2}|00\rangle.$$

Для случая $m=1$ справедлива аналогия варианта обобщенного измерения M_1 . Вероятность, что первый измеренный бит в состоянии $|\phi^+\rangle$ равен 1, вычисляется как

$p(1) = \langle \phi^+ | M_1^\dagger M_1 | \phi^+ \rangle = \frac{1}{2}$. После измерения получим квантовое состояние:

$$|\phi^{+*}\rangle = \frac{M_1 |\phi^+\rangle}{\sqrt{\langle \phi^+ | M_1^\dagger M_1 | \phi^+ \rangle}} = \frac{\frac{1}{\sqrt{2}}|11\rangle}{\frac{1}{2}} = \sqrt{2}|11\rangle, \text{ и, как результат, } p(0) + p(1) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} = 1$$

(закон сохранения вероятностей). Отметим, что операторы M_0 и M_1 являются ПООЗ-мерами для обобщенных наблюдаемых состояний.

Рассмотрим хорошо известный принцип *дополнительности* или *дуальности* системы «частица - волна», который служит основой для многих концепций в квантовой механике.

▪ *Квантовый дуализм «частица - волна» в моделях процессов измерения.* На структурном уровне модель квантовой механики состоит из двух составных частей, первая из которых оперирует с понятием квантового состояния исследуемой квантовой системы, а вторая часть - ориентирована на квантовую динамику (эволюцию квантовой системы). Наличие двух подходов связано с дуализмом «частица - волна» описания динамических объектов квантовой механики. Отметим некоторые особенности и свойства квантовой эволюции и взаимосвязь процессов измерений с дуализмом представления динамических объектов квантовой механики. Рассмотрим волновое представление квантовой динамики. Допустим, что состояние квантовой системы, описанное в следующем виде: $|\psi\rangle = \sum_i a_i |i\rangle$, где $\sum_i a_i = 1$, $\{|i\rangle\}$, определяет множество

ортогональных векторов. Если $i \geq 2$, то говорят, что динамика данной квантовой системы имеет волновой характер. В противном случае, $i=1$, квантовая система описывает динамическое поведение одной частицы и поэтому речь идет о корпускулярном поведении рассматриваемой системы.

▪ *След матрицы и процессы квантовых измерений.* Обратимся к понятию след матрицы A , который записывается как сумма ее диагональных элементов A_{ii} : $\text{Tr}(A) = \sum_i A_{ii}$. След матрицы имеет циклическое свойство и линеен. Предположим,

что состояние двух физических систем A и B описывается оператором плотности ρ^{AB} . Редуцированный оператор плотности для системы A записывается в следующем виде: $\rho^A \equiv \text{Tr}_B(\rho^{AB})$, где частный след Tr_B - отображение операторов, известных как частный след над системой B . В результате:

$$\rho^A \equiv \text{Tr}_B(\rho^{AB}) = \text{Tr}_B(\rho^{AB} = |a_i\rangle\langle a_i| \otimes |b_j\rangle\langle b_j|) = (|a_i\rangle\langle a_i|) \text{Tr}(|b_j\rangle\langle b_j|).$$

Частный след оператора, таким образом, является инструментарием количественного описания наблюдаемых подсистем, находящихся в композиции составной системы.

Для различения квантовых состояний требуются квантовые измерения. Проективное измерение над подсистемой подобно операции взятия частного следа. Допустим, что имеется состояние GHZ следующего вида: $|GHZ\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_A 0_B 0_C\rangle + |1_A 1_B 1_C\rangle)$ (запутанное трехчастичное состояние из трех квантовых бит ABC). Тогда частный след над одним квантовым битом, например, над системой A , запишем как

$$\text{Tr}_A(|GHZ\rangle\langle GHZ|) = \frac{1}{2}(\rho_{00}^{BC}) + \frac{1}{2}(\rho_{11}^{BC}),$$

где $\rho_{00}^{BC} = |0_B 0_C\rangle\langle 0_B 0_C|$, $\rho_{11}^{BC} = |1_B 1_C\rangle\langle 1_B 1_C|$. Т.е. после взятия частного следа над системой A подсистема BC имеет вероятность $p = \frac{1}{2}$ и находится в состоянии ρ_{00}^{BC} или ρ_{11}^{BC} . Согласно постулату квантовых измерений, если произведено проективное измерение в базисе $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ над системой A , то результатом будет состояние $|0\rangle$ (соответствующее ρ_{00}^{BC}) или состояние $|1\rangle$ (соответствующее ρ_{11}^{BC}) с вероятностью $p = \frac{1}{2}$.

Рассмотрим теперь квантовое состояние $|w\rangle$ из трех квантовых битов вида $|w\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}}(|1_A 0_B 0_C\rangle + |0_A 1_B 0_C\rangle + |0_A 0_B 1_C\rangle)$. Возьмем след над квантовым битом A :

$$\text{Tr}_A(|w\rangle\langle w|) = \frac{1}{3}\rho_{00}^{BC} + \frac{2}{3}|\psi_{BC}^+\rangle\langle\psi_{BC}^+|,$$

где $|\psi_{BC}^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0_B 1_C\rangle + |1_B 0_C\rangle)$ определяет состояние Белла.

Таким образом, после проективного измерения системы A в базисе $\{|0\rangle, |1\rangle\}$, система с вероятностью $p = \frac{1}{3}$ может находиться в состоянии $|0\rangle$ (соответствующем ρ_{00}^{BC}) и с $p = \frac{2}{3}$ в состоянии $|1\rangle$ (соответствующем $|\psi_{BC}^+\rangle$).

Допустим, что ρ - составная (из двух квантовых бит ρ_1 и ρ_0) система, которая находится в запутанном состоянии Белла: $|\Psi_\rho\rangle = \frac{|0_1 0_0\rangle - |1_1 1_0\rangle}{\sqrt{2}}$.

Оператор плотности ρ_ρ имеет представление:

$$\rho_\rho = \left(\frac{|0_1 0_0\rangle - |1_1 1_0\rangle}{\sqrt{2}} \right) \left(\frac{\langle 0_1 0_0| - \langle 1_1 1_0|}{\sqrt{2}} \right) = \frac{1}{2}(|0_1 0_0\rangle\langle 0_1 0_0| - |0_1 0_0\rangle\langle 1_1 1_0| - |1_1 1_0\rangle\langle 0_1 0_0| + |1_1 1_0\rangle\langle 1_1 1_0|) =$$

$$= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Вычислим частный след по состоянию второго квантового бита, т.е. системы ρ_1 .

В результате редуцированный оператор плотности $\rho_{\rho_0} \equiv \rho_0$ имеет следующий вид:

$$\rho_0 = \text{Tr}_1(\rho_\rho) = \frac{1}{2}[\text{Tr}_1(|0_1 0_0\rangle\langle 0_1 0_0|) - \text{Tr}_1(|0_1 0_0\rangle\langle 1_1 1_0|) - \text{Tr}_1(|1_1 1_0\rangle\langle 0_1 0_0|) + \text{Tr}_1(|1_1 1_0\rangle\langle 1_1 1_0|)] =$$

$$= \frac{1}{2}[|0_0\rangle\langle 0_0| \langle 0_1|0_1\rangle - |0_0\rangle\langle 1_0| \langle 1_1|0_1\rangle - |1_0\rangle\langle 0_0| \langle 0_1|1_1\rangle + |1_0\rangle\langle 1_0| \langle 1_1|1_1\rangle] =$$

$$= \frac{1}{2}[|0_0\rangle\langle 0_0| + |1_0\rangle\langle 1_0|] = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2}I.$$

При этом учитывалось, что состояния ортогональны: $\langle 0_1|0_1\rangle = 1$, $\langle 0_1|1_1\rangle = 0$ и т.д. Отметим, что в данном примере редуцированное состояние ρ_0 является смешанным,

так как выполняется: $\text{Tr}[(\rho_0)^2] = \text{Tr}\left[\left(\frac{I}{2}\right)^2\right] = \frac{1}{2} < 1$.

Данный результат характеризует особое свойство квантовой системы, принципиально отсутствующее в классической системе.

Действительно, состояние составной системы чистое: $\text{Tr}[(\rho_\rho)^2] = 1$ и установлено точно (максимальная информация). Однако первый квантовый бит находится в смешанном состоянии. Это означает, что информация о состоянии данного квантового бита не максимальна, а сама подсистема имеет более хаотическое поведение, чем составная система. Подобное странное для классических систем свойство, когда о составной системе имеется полная информация, а о подсистемах - только часть информации, характеризует способность квантовых систем к самоорганизации за счет использования свойства суперкорреляции (квантовой корреляции), содержащейся в запутанных состояниях. Именно за счет наличия квантовой корреляции у двух смешанных составных состояний появилась возможность организовать чистое состояние. Эволюция состояния квантовой системы описывается уравнением Шредингера, а обобщенные квантовые динамические процессы формализуются квантовыми операторами.

Принцип дополнителности предполагает дуализм «частица-волна» при описании квантового объекта. Для извлечения информации о поведении квантового объекта необходимо проводить квантовые измерения. Унитарные операции связаны с волновым представлением динамического поведения квантового объекта. Однако не унитарные операторы разрушают волновую картину описания системы и приводят к корпускулярному представлению.

В квантовом случае полнота и корректность отношений требует выполнения условия: $\text{Tr}(\rho) = 1$, что для квантовых измерений верно в силу условия (П2.2).

Операция взятия следа означает, что с определенностью можно обнаружить частицу в пространстве состояний, после чего волновое поведение квантовой частицы разрушается. Рассмотрим случай квантовых измерений с помощью проективных операций. Вероятность результата измерения, как отмечалось ранее, определяется в виде $p(m) = \langle \psi | M_m^\dagger M_m | \psi \rangle$. Так как после проективного измерения состояние квантовой системы ортогонально, согласно определению $|\psi\rangle = \sum_i a_i |i\rangle, i=1$, то ее поведение носит *корпускулярный* характер. Таким образом, разрушается рассмотрение волнового представления.

Однако после ПООЗ-измерений квантовая система может проявлять волновые свойства. Допустим, что квантовая система является двухмерной в базисе $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. Рассмотрим ПООЗ-меру измерения в виде трех операторов:

$$E_1 = \frac{\sqrt{2}}{1+\sqrt{2}} |1\rangle\langle 1|; \quad E_2 = \frac{\sqrt{2}}{1+\sqrt{2}} \cdot \frac{1}{2} (|0\rangle - |1\rangle)(\langle 0| - \langle 1|); \quad E_3 = I - E_1 - E_2,$$

которые попарно не ортогональны. После ПООЗ - измерений квантовая система проявляет как *волновое*, так и *корпускулярное* поведение.

Подобная дополнителность существует между запутанным состоянием (квантовой корреляцией) и интерференцией. Мера квантовой корреляции (entanglement) представляет убывающую функцию от меры «прозрачности» (visibility) зависящей от интерференции. Рассмотрим дополнителность между квантовой корреляцией и интерференцией на примере обобщенного состояния Белла.

Пример 18: *Дополнителность между запутанным состоянием и интерференцией.* Возьмем обобщенное (запутанное) состояние Белла $|\psi\rangle = a|0_1\rangle|0_2\rangle + b|1_1\rangle|1_2\rangle$ с ограничением на амплитуды вероятностей, следующим из условия унитарности: $a^2 + b^2 = 1$. Проведем унитарное преобразование с помощью оператора (матрицы) вращения по первому вычислительному базису $\{|0_1\rangle, |1_1\rangle\}$ для первого квантового бита $|0_1\rangle \rightarrow \cos\alpha|0_1\rangle + \sin\alpha|1_1\rangle$ и получим в результате:

$$|\psi\rangle \rightarrow |\psi'\rangle = a(\cos\alpha|0_1\rangle + \sin\alpha|1_1\rangle)|0_2\rangle + b(\cos\alpha|1_1\rangle - \sin\alpha|0_1\rangle)|1_2\rangle.$$

Следующей операцией осуществим наблюдение первого квантового бита без возмущения второго. Вероятность извлечь состояние $|0_1\rangle$ определяемая как

$P_{|0_1\rangle} = \frac{1}{2} [1 + (a^2 - b^2) \cos 2\alpha]$, является типичным примером эффекта интерференции, если интерпретировать угол α как управляемый параметр. Мера «прозрачности» интерференции: $\Gamma \equiv |a^2 - b^2|$. Как физическая мера результата измерений она исчезает, если начальное состояние было максимально запутанным (максимально коррелированным), т.е. при $a^2 = b^2$. Данная физическая мера максимальна, когда состояние разделимо (т.е. при $a = 0$ или $b = 0$).

С другой стороны, известно, что мерой запутанности состояния (квантовой коррелированности) служит частный след по одному из состояний в виде энтропии фон Неймана (определение см. ниже) следующего вида: $E \equiv S(\rho_{red}) = -a^2 \log a^2 - b^2 \log b^2$, где редуцированный оператор плотности имеет вид:

$$\rho_{red} = \text{Tr}_2 |\psi'\rangle\langle\psi'| = \text{Tr}_2 |\psi\rangle\langle\psi| = a^2 |0_1\rangle\langle 0_1| + b^2 |1_1\rangle\langle 1_1|.$$

Квантовая корреляция получает максимальное значение $E = 1$ при $a^2 = b^2$ и минимальное - $E = 0$, если $a = 0$ или $b = 0$. Таким образом, чем выше квантовая корреляция состояния, тем ниже «прозрачность» интерференции и наоборот.

Другая популярная мера корреляции, именуемая отрицательность N , определяется как отрицательное значение удвоенного значения наименьшего собственного значения транспонированной матрицы плотности. Следовательно, $N = 2|ab|$.

Мера дополнителности выражается в данном случае как $N^2 + \Gamma^2 = 1$. Тогда взаимоотношение между запутанным состоянием и интерференцией следует из ограничения в виде унитарности квантовых операторов: $a^2 + b^2 = 1$.

Таким образом, в моделях КА меры квантовой корреляции и интерференции не являются независимыми, и эффективность поиска успешного решения с помощью КА зависит от взаимоотношения между ними.

П2.2. Моделирование КАЯ и квантовое программирование

Основу метода проектирования квантовых алгоритмических схем и ему подобных методов формирования новых типов КА составляет система проектирования квантовых алгоритмических ячеек (КАЯ). Как и в общей структуре КА, структура системы проектирования КАЯ основана на формализации описания трех основных квантовых операторов (суперпозиции, квантовой корреляции (запутанных состояний) и интерференции) и измерений в виде элементарных эволюционных унитарных операторов. В соответствии с квантовой схемой КА, данные операторы собраны тензорным и прямым произведением в единый эволюционный квантовый унитарный оператор.

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*), которые составляют основу структур КА. В общем виде структура КАЯ может быть представлена в виде:

$$\text{КАЯ} = [(Int \otimes^n I) \cdot U_F]^{h+1} \cdot [{}^n H \otimes^m S], \quad (\text{П2.4})$$

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

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

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

Структурно КАЯ действует на начальный канонический базисный вектор и формирует комплексную линейную комбинацию состояний составляющих классических векторов (называемую суперпозицией) в виде базисных векторов как выходной результат действия оператора суперпозиции. Суперпозиция содержит в качестве одной из составляющих информацию о решении исследуемой проблемы. После процесса формирования суперпозиции в КАЯ применяются операторы квантовой корреляции, интерференции и измерения с целью извлечения информации об искомом решении. В квантовой механике процесс измерения носит необратимый характер и является недетерминированной операцией, что приводит к измерению только одного из базисных векторов в сформированной суперпозиции. Вероятность каждого базисного вектора быть результатом измерения в составе суперпозиции при заданном вычислительном базисе зависит от комплексного коэффициента (амплитуды вероятности).

Остановка итерационного действия КАЯ осуществляется программным путем на основе принципа минимума информационной энтропии «интеллектуального квантового состояния», содержащего ценную информацию об искомом решении. КАЯ могут быть реализованы с помощью программно-аппаратной поддержки эволюционных квантовых вычислений.

о В квантовом программировании существует доказательство полноты описания КАЯ с помощью соответствующих программных языков повышенной семантической выразительности. По аналогии с существованием эквивалентности в теории вычислений, которая основана на классических алгоритмах, известна гипотеза об эквивалентности между представлением выражений квантовых операций на синтаксическом уровне с сохранением полноты их описания за счет включения в квантовые языки программирования семантической выразительности квантовых операторов (на функциональном уровне описания действий квантовых операторов).

Одним из естественных шагов в этом направлении, является разработка принципов логического вывода и проверки истинности суждений в языках квантового программирования для устранения противоречий в получаемом следствии логического вывода. К таким языкам квантового программирования следует отнести, например, язык QPL (Quantum Programming Language) и др.

Рассмотрим, как осуществляется в языке QPL непротиворечивое описание, например, определения действия оператора Адамара в следующем виде:

$$Hx = \text{if } x \text{ then } (false + (-1) * true) \text{ else } (false + true).$$

Оценим полноту и истинность данного выражения, которое эквивалентно проверке истинности того, что последовательное действие операторов Адамара $H(Hx)$ на функциональном уровне описания приводит к результату, эквивалентному x .

Для этого используем следующую модель логического вывода на языке QPL:

```

H(Hx) = if (if x then (false + (-1) * true) else (false + true))
      then (false + (-1) * true)
      else (false + true)
-- by commuting conversion for "if"
= if x
  then if (false + (-1) * true)
        then (false + (-1) * true)
        else (false + true)
  else if (false + true)
        then (false + (-1) * true)
        else (false + true)
-- by "if"
= if x
  then (false - false + true + true)
  else (false + false + true - true)
-- by simplification and normalisation
= if x then true else false
-- by η-rule for "if"
= x
  
```

Элементы теории проверки полноты и истинности семантики функционального описания КА на языке функционального квантового программирования QPL описаны ниже.

о Квантовые языки программирования. При проектировании языка программирования одна из целей состоит в том, чтобы идентифицировать и проработать полезные понятия "высокого уровня" — абстракции или парадигмы, которые позволяют решать проблему концептуальным способом, вместо сосредоточения на деталях его выполнения. Исследование квантовых языков программирования обеспечивает урегулирование, в котором можно исследовать возможные языковые особенности и проверять их полноту и экспрессивность. Кроме того, определение прототипа языков программирования создает объединяющую формальную структуру, для рассмотрения и анализа существующего квантового алгоритма.

о Модели виртуальных машин Развитие языков программирования часто вызывается наряду с другими причинами развитием методов проектирования компиляторов. В случае квантовых вычислений ситуация усложняется отсутствием (в настоящее время) пригодной к использованию квантовой вычислительной аппаратуры. Чтобы иметь возможность говорить о «реализации», необходимо определить некоторую «виртуальную» модель вычислительной машины и работать с ней. При этом следует понимать, что будущая реальная квантовая машина, возможно, будет существенно

отличаться от этой виртуальной модели, но эти отличия в идеальном случае должны быть прозрачными для программиста и обрабатываться автоматически компилятором или операционной системой. Существуют несколько возможных моделей виртуальных машин, но все они эквивалентны, по крайней мере, теоретически.

Таким образом, можно подобрать модель, которая наилучшим образом соответствует вычислительной интуиции. По-видимому, наиболее популярной и понятной виртуальной моделью машины является модель квантовой цепи.

Квантовая цепь строится из квантовых ячеек точно таким же образом, как классическая логическая цепь – из логических ячеек. Отличие состоит в том, что квантовые ячейки всегда обратимы и соответствуют унитарным преобразованиям в пространстве комплексных векторов. Модель квантовой схемы, в основном, рассматривает унитарные преобразования как основные базовые операции. Другой базовой операцией является измерение, которое выполняется как последний шаг в процессе вычисления.

Другая модель виртуальной машины, возможно даже более подходящая для интерпретации квантовых языков программирования, - модель *QRAM*, предложенная Knill. В этой модели допускается свободное перемешивание унитарных преобразований и измерений. Квантовым устройством управляет универсальный классический компьютер. Это квантовое устройство содержит большое, но конечное число индивидуально адресуемых кубитов точно такое, как в классическом чипе памяти содержится конечное множество классических битов. Классический контроллер посылает последовательность инструкций («команд»), каждая из которых имеет вид «применить унитарное преобразование U к кубитам i и j » или «измерить кубит j ». Квантовое устройство выполняет эти инструкции и выдает в качестве ответа результаты доступных измерений.

Иногда в работах по теории сложности используется третья модель виртуальной машины – квантовая машина Тьюринга. В этой модели измерение не производится, а все операции предполагаются унитарными. Машина содержит ленту, головку и конечный набор управляющих правил перехода, аналогично классическому варианту. Хотя теоретически эта модель эквивалентна двум предыдущим, в общем случае она не рассматривается как достаточно реалистическое приближение для возможных будущих квантовых компьютеров.

○ *Императивные Квантовые языки программирования.* Ранее предложенные квантовые языки программирования следовали за императивной программной парадигмой. Эта линия языков была начата Knill, который определил ряд соглашений для выражения квантовых алгоритмов в псевдокоде. Несмотря на то, что предложение Knill было не очень формально, оно оказало большое влияние при проектировании более поздних императивных квантовых языков программирования. Более полные императивные языки были определены: Omer, Sanders и Zuliani, Bettelli и мн. др.

Общая черта этих императивных квантовых языков программирования заключается в том, что программа рассматривается как последовательность операций, которые работают, обновляя некоторое глобальное состояние. Эти языки могут быть непосредственно скомпилированы или интерпретироваться в реальную модель аппаратных средств *QRAM*. Квантовые состояния в этой парадигме, как правило, реализованы как массивы кубитов, и во время выполнения необходимы средства обнаружения ошибочных условий. Кроме того, обычно эти языки не имеют

формальной семантики, за исключением языка Sanders и Zuliani, который обладает операционной семантикой.

Различные языки в этой категории предлагают множество программных особенностей. Например, QCL содержит такие функции, как автоматическое управление рабочей памятью, и богатый язык для описания пользовательских операторов. Предложено несколько операций более высокого порядка, таких как вычисление инверсии определенного пользователем оператора. Язык Bettelli и мн. др. уделяет особое внимание практическим применениям. Языки задуманы, как расширение C++, и рассматриваются как квантовые операторы объектов первого порядка, которые могут быть явно построены и управляться во время выполнения. Одна из самых серьезных особенностей этого языка - непрерывная оптимизация квантовых операторов, которая производится во времени выполнения.

○ *Функциональные Квантовые языки программирования.* В функциональном программировании программы работают не на обновлении глобального состояния, а на отображении конкретных входов на выходы. Типы данных, связанные с чисто функциональными языками (такие как списки, рекурсивные типы), более поддаются анализу во время компиляции, чем их императивные аналоги (такие как массивы). Следовательно, даже в очень простых функциональных языках программирования можно избежать многих проверок во время исполнения.

В первом предложении варианта функционального квантового языка программирования введен язык QFC, который представляет программы через функциональную версию блок - схем. У языка также есть альтернативный синтаксис, основанный на текстовом представлении. Унитарные операции и измерения, непосредственно встроенные в язык, обрабатываются с сохранением типов. Классические и квантовые особенности интегрированы в рамках одного формализма. Отсутствует контроль соответствия типов во время выполнения или обработки ошибок. Язык может быть откомпилирован на модель *QRAM*, а также обладает полной денотационной семантикой, которая может использоваться для формальных рассуждений о программах.

Основной квантовый язык блок-схем функционален, поскольку свободен от побочных эффектов. Однако, функции сами по себе не рассматриваются как данные, и, таким образом язык теряет черты более высокого порядка.

Классификация языков программирования

	QCL	Q language	qGC L	(Block-)QPL
императивный язык	+	+	+	
функциональный язык				+
прагматический подход	+	+		
теоретический подход			+	+
формальная семантика			+	+
универсальный язык	+	+	+	+

Пример 19. Рассмотрим некоторые свойства языков квантового программирования
○ QCL (Quantum Computation Language)

- *Общие свойства*
- фактически первый квантовый язык программирования
- (элементарный) процедурный язык
- автоматическое управление рабочим пространством
- синтаксическая обратимость определяемых пользователем квантовых операций
- синтаксис как в C / Паскаль
- универсальный язык: может осуществить и моделировать все известные квантовые алгоритмы
- отсутствует формальная семантика
- нетривиальные унитарные операции - функции (функциональный синтаксис запроса)

Далее приведен пример «Вычисление факториала» на языке QCL с помощью классического программирования:

```
// program example: recursive
// and non-recursive function call:

int factorialR(int x) {
    // recursive implementation
    // precondition x >= 0
    if x == 0 {
        return 1;
    }
    return
        x*factorialR(x-1);
}

int x = 5;
print x, "! = ", factorialR(x);

//-----

int factorialNR(int x) {
    // iterative implementation
    // precondition x >= 0
    int k;
    int y = x;
    if (y == 0) or (y == 1) {
        return 1;
    }
    else { // "else" for better readability
        // here: y >= 2
        k = y;
        while y >= 3 {
            y = y - 1;
            k = k*y;
        }
        return k;
    }
}
```

```
x = 7;
print x, "! = ", factorialNR(x);
print "The End.";
-
/* result:
: 5 ! = 120
: 7 ! = 5040
: The End.
*/
```

- *Квантовые операторы и их действие*

П2. Оператор тождественности, Qop_{tu_op}

2. Встроенные квантовые операторы

$Qop_{tu_op} = QHadamard(7)$

3. Квантовые операторы, $Qop_{tu_op} = QFourier(7)$

4. Переупорядочение строки $Qubit, Qop_{a_swap} = QSwap(5)$

5. Операторы управления, $Qop_{a_controlled_op}(U, 5)$

6. Операторы для классических функций,

$Qop_{a_oracle} = Qop(f, 3, 5)$

7. Оформление структуры оператора,

$Qop_{composed} = part_1 \& part_2;$

8. Оператор связи, $Qop_{adj_operator} = ! an_op$

9. Оператор перестановки, $Qop_{split} = an_op(2, 3, SPLIT)$

10. Применение оператора, $an_operator(a_register)$

o qGCL (Quantum Guarded Command Language)

- *Общие свойства*

- qGCL: выражается через pGCL (вероятностный командный язык)

- qGCL: императивный язык

- подходит в качестве языка спецификаций (высокий уровень математической нотации)

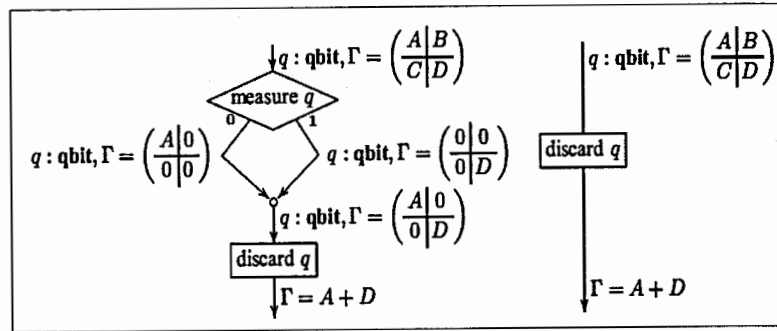
- механизм пошагового уточнения программы для вывода и проверки (доказательство корректности)

- формальная семантика: пред- и постусловия распространяются на пред-и пост-ожидания

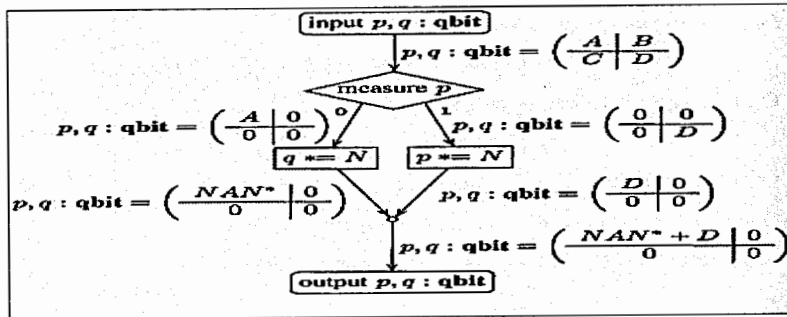
- включает в себя три квантовых примитива на высоком уровне: состояние подготовки, эволюции, наблюдения

- универсальный язык

Блок-схема QPL (Квантовая блок-схема). Квантовая блок-схема практически не отличается от классической, только в квантовой блок-схеме добавляется новый тип переменной, названный qbit, а также возникают новые операции: унитарные преобразования и измерения (см. рис. П2.14 (а, б)).



(а)



(б)

Рис. П2.14. Квантовая блок-схема

▪ Правила для квантовых блок-схем

При составлении квантовых блок-схем используются некоторые правила, представленные на рис. П2.15:

- ◇ выделение бита (Allocatebit),
- ◇ отменить бит (Discardbit),
- ◇ унитарное преобразование (Unitary transformation),
- ◇ слияние (Merge),
- ◇ перестановка (Permutation)
- ◇ измерение (Measurement)
- ◇ перестановка (Permutation)

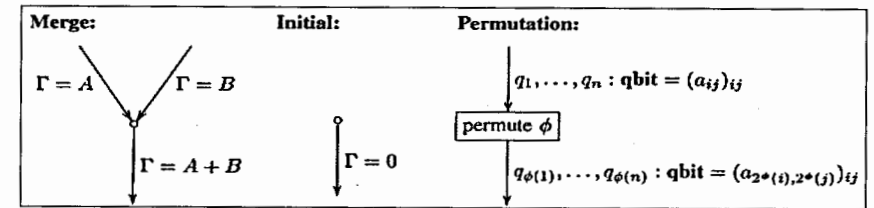
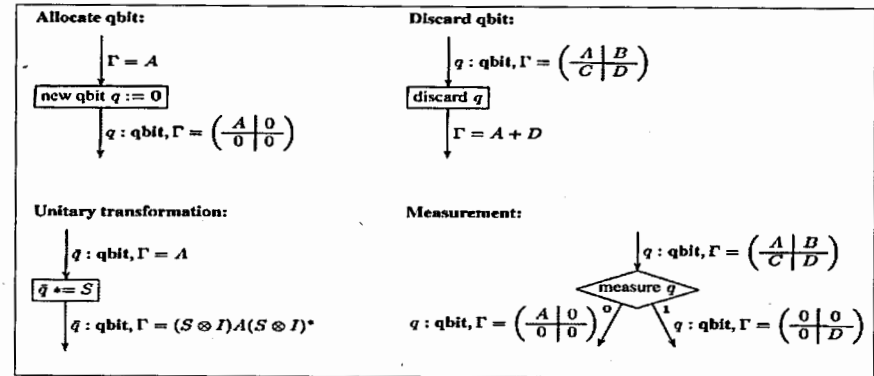
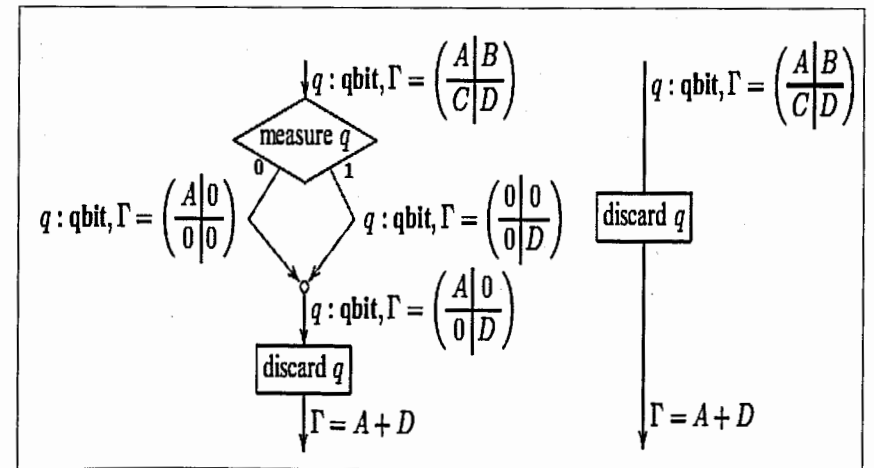


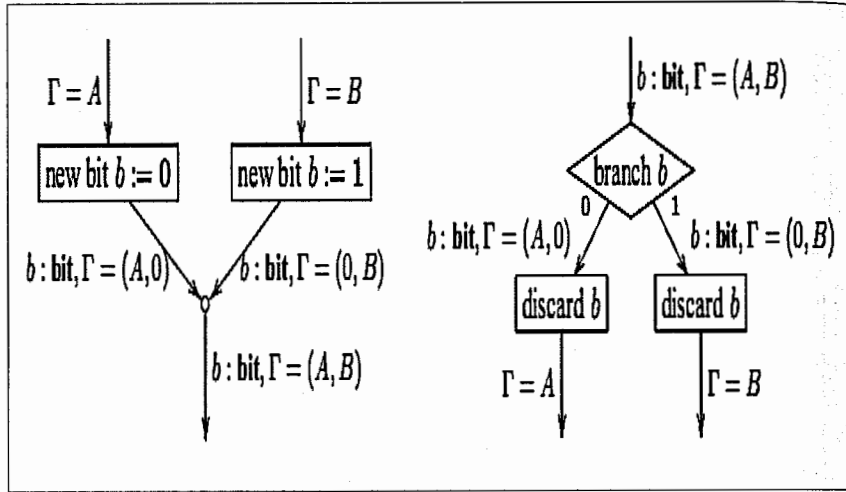
Рис. П2.15. Правила преобразований в квантовых блок-схемах

- Примеры
- Пример 20: Показывает правильность преобразования программы: измерение, сопровождаемое перемещением

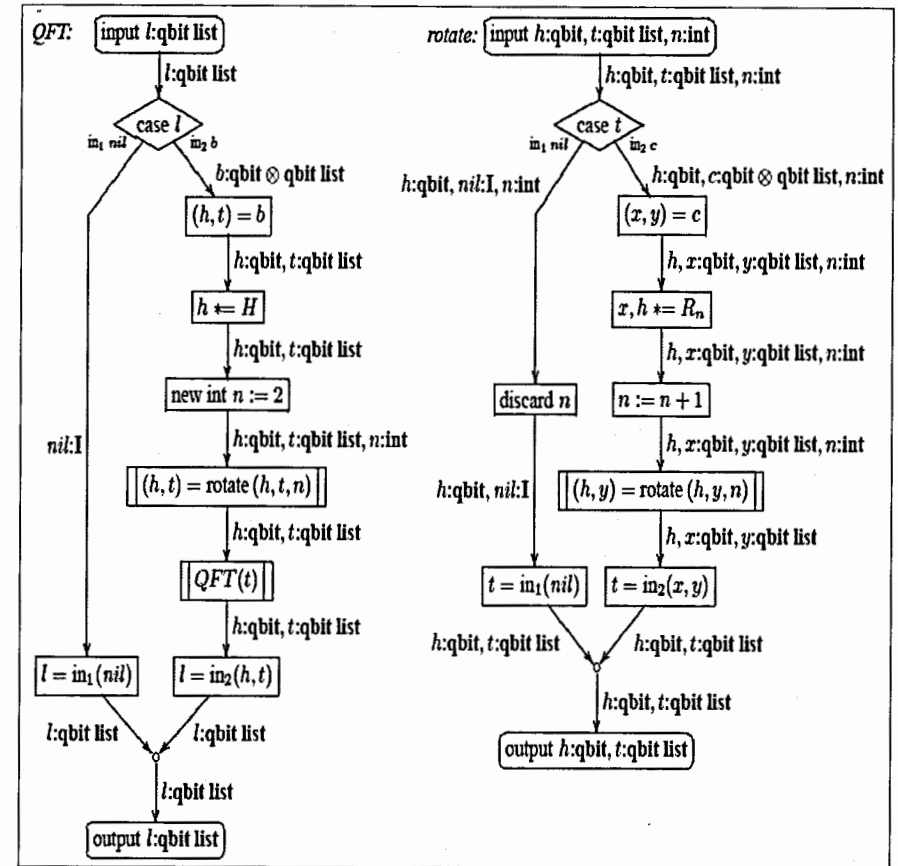


Правильность этого преобразования в программе состоит в том, что операция "отбрасывания" уже встраивает неявное измерение в программу.

- Пример 21: Следующие две схемы являются взаимно обратными:



- Пример 22: Схема квантового преобразования Фурье приведена ниже.



Обсудим кратко основные свойства мер количества классической и квантовой информации, применяемых в задачах проектирования интеллектуального управления и квантового алгоритма самоорганизации баз знаний.

П2.3. Элементы квантовой теории информации

П2.3.1. Меры квантовой информации и законы квантовой теории информации

Информационная энтропия Шеннона определяется как $H(p) = -\sum_i p_i \log p_i$.

Энтропия фон Неймана имеет следующий вид: $S^{vN}(\rho) = -Tr(\rho \log \rho)$. В частном случае, когда матрица ρ диагональна, наблюдается тождественное равенство

энтропийных мер Шеннона и фон Неймана. Однако законы и следствия квантовой теории информации имеют ряд принципиальных отличий при квантовом обобщении классической теории информации Шеннона.

В табл. П2.1 приведены основные свойства классической и квантовой мер информации, применяемых в решении задач информационного анализа и проектирования квантовой эволюции.

Таблица П2.2
Свойства классической и квантовой информации

Теории информации	
Классическая	Квантовая
Энтропия Шеннона: $H(X) = -\sum_x p_x \log p_x$	Энтропия фон Неймана: $S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log \rho)$
Различимость и доступность информации	
Знаки алфавита различимы: $N = X $	Граница Холево - Левитина: $H(X:Y) \leq S(\rho) - \sum_x p_x S(\rho_x), \rho = \sum_x p_x \rho_x$
Информационно – теоретические отношения	
Неравенство Фано: $H(p_e) + p_e \log(X -1) \geq H(X Y)$	Квантовое неравенство Фано: $H(F(\rho, E)) + (1-F(\rho, E)) \log(d^2-1) \geq S(\rho, E)$
Взаимная информация: $H(X:Y) = H(Y) - H(Y X)$	Когерентная информация: $I(\rho, E) = S(E(\rho)) - S(\rho, E)$
Неравенство цепи обработки данных: $X \rightarrow Y \rightarrow Z$ $H(X) \geq H(X:Y) \geq H(X:Z)$	Квантовое неравенство цепи обработки данных: $\rho \rightarrow \mathcal{E}_1(\rho) \rightarrow (\mathcal{E}_2 \circ \mathcal{E}_1)(\rho)$ $S(\rho) \geq I(\rho, \mathcal{E}_1) \geq I(\rho, \mathcal{E}_2 \circ \mathcal{E}_1)$
Кодирование канала передачи данных без шума	
Теорема Шеннона: $n_{\text{bits}} = H(X)$	Теорема Шумахера: $n_{\text{qubits}} = S\left(\sum_x p_x \rho_x\right)$
Пропускная способность каналов связи с шумом для классической информации	
Теорема Шеннона кодирования канала связи с шумом: $C(\mathcal{N}) = \max_{\rho(x)} H(X:Y)$	Теорема Holevo-Schumacher-Westmoreland: $C^{(1)}(\mathcal{E}) = \max_{\{\rho_i, p_i\}} \left[S(\rho') - \sum_x p_x S(\rho'_x) \right],$ $\rho'_x = \mathcal{E}(\rho_x), \rho' = \sum_x p_x \rho'_x$

Одними из основных проблем квантовой теории информации, решение которых важно для исследования квантовой эволюции динамических систем, являются следующие:

- Классическая, квантовая и полная корреляции: Взаимосвязь с мерами запутанных состояний;
- Доступная информация и информационно-теоретические модели квантовых измерений;
- Извлечение информации эффективными измерениями и границы взаимной информации

Исследуем кратко на примерах некоторые из этих особенностей, используемые в моделях квантового нечеткого вывода (КНВ).

Пример 23: Рассмотрим особенности описания и информационного анализа запутанных состояний Белла: $|\Psi_Q\rangle = \frac{|0_1 0_0\rangle - |1_1 1_0\rangle}{\sqrt{2}}$. Так как состояние Белла с оператором плотности (П2.4) чистое, то ρ_Q представляет чистый ансамбль. Поэтому неопределенность квантового состояния отсутствует, т.е. энтропия фон Неймана $S^{vN}(\rho_Q) = 0$.

Редуцированный оператор плотности ρ_0 для квантового бита $|0_0\rangle$ есть частный след над системой Q , т.е. $\rho_0 = \text{Tr}_1(\rho_Q) = \frac{1}{2}(|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|) = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. Следовательно, квантовая неопределенность в состоянии $|0_0\rangle$ определяется энтропией фон Неймана как $S^{vN}(\rho_Q) = 1$.

Таким образом, информационный анализ неопределенности в состоянии составной квантовой системы позволяет четко разъяснить наличие необычных (неклассических) свойств: игнорирование в ней части информации о состоянии подсистемы приводит к увеличению квантовой неопределенности. В результате квантовая неопределенность Q_0 в «части» (подсистеме) больше, чем в «полной» (составной) квантовой системе Q . Такой эффект отсутствует в классических системах в силу свойств меры информационной энтропии Шеннона.

Пример 24: Рассмотрим состояние Белла: $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$ в Гильбертовом пространстве $\mathcal{H}_{AB} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$, где $\mathcal{H}_A = \mathcal{H}_B = \mathcal{H}_2$. Матрицы плотности $\rho_{AB} = |\psi\rangle\langle\psi|$, ρ_A и $\rho_{A|B}$ определяются в виде:

$$\rho_A = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}, \rho_{A|B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \rho_{AB} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & 0 & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}.$$

Матрица условной плотности имеет вид: $\rho_{A|B} = \rho_{AB}(\mathbf{I}_A \otimes \rho_B)^{-1}$ (в этом случае взаимная ρ_{AB} и маргинальная $\mathbf{I}_A \otimes \rho_B$ матрицы плотности коммутируют). Из определения энтропии фон Неймана следует: $S^{vN}(A) = S^{vN}(B) = 1$. Тогда:

$$S(AB) = S(B) + S(A|B) = 1 - 1 = 0, \quad \text{так как } S(A|B) = -1.$$

Следовательно, в отличие от классической теории информации Шеннона квантовая условная энтропия фон Неймана может принимать отрицательные значения, когда рассматриваются запутанные состояния. Этот факт непосредственно связан с квантовой неразделимостью запутанных состояний, а сами они интерпретируются как гигантским образом (супер-) коррелированные состояния. Таким образом, отрицательность условной энтропии указывает на наличие запутанных состояний в составной квантовой системе и определяет нижнюю границу их корреляции.

Существование данного факта установлено также в квантовых поисковых алгоритмах Шора и Гровера и используется в решении проблемы эффективного останова КА.

Отметим также, что не все базовые классические соотношения и неравенства имеют квантовые аналоги. Так, например, в классическом случае имеет место неравенство:

$$I(x : y) \leq \min[H(x), H(y)].$$

В то же время в квантовом случае верхняя граница задается неравенством:

$$S(X : Y) \leq 2 \min[S(X), S(Y)].$$

Квантовая теория информации имеет строго обоснованные правила, как извлекать информацию из неизвестного квантового состояния. Оптимальный квантовый процесс извлечения ценной информации из индивидуальных БЗ, спроектированных для фиксированных ситуаций управления на основе мягких вычислений, основан на четырех фактах квантовой теории информации, приведенных ниже.

В частности, доказано, что существует:

- эффективное квантовое сжатие данных;
- «сцепление» классической и квантовых частей информации в квантовом состоянии;
- полная корреляция в квантовом состоянии является «смесью» классической и квантовой корреляций;
- наличие скрытой (наблюдаемой) классической корреляции в квантовом состоянии.

Далее кратко рассмотрим физический смысл перечисленных фактов и их роль в процессах проектирования оптимальных процессов и сигналов управления на основе КНВ.

Факт 1. Эффективное квантовое сжатие данных. В классической теории информации Шеннон показал, насколько (при заданной точности) предельно можно сжать сообщение, состоящее из N независимых знаков (x_a), где каждый знак появляется в сообщении с априорной вероятностью p_a , используя понятие информационной энтропии. Информационная энтропия Шеннона $H(p_a)$ определяется как $H(p_a) = -\sum_a p_a \log_2 p_a$. Было доказано следующее утверждение: блок кодов длиной NH битов достаточен для кодирования всех типовых (наиболее часто появляющихся) последовательностей без учета способов кодирования нетипичных последовательностей сообщений. При этом вероятность ошибки кодирования (потери информации) не превосходит заданный порог ε . В квантовой теории информации знаками являются матрицы плотности. Возможны два варианта, когда матрицы плотности соответствуют ансамблю чистых состояний $|\phi_a\rangle$ или когда ансамбль формируется матрицами плотности ρ_a с вероятностью p_a . Рассмотрим ансамбль состояний для второго варианта. В этом случае матрица плотности сообщений, состоящих из N знаков, описывается как $\rho^{(N)} = \rho \otimes \rho \otimes \dots \otimes \rho$, где $\rho = \sum_a p_a |\phi_a\rangle\langle\phi_a|$.

Энтропия сообщений фон Неймана $S = -\text{Tr}(\rho \ln \rho)$ имеет простое соотношение с энтропией ансамбля: $S(\rho^{(N)}) = NS(\rho)$. Известно следующее неравенство между Шенноновской информационной энтропией и энтропией фон Неймана: $H(p) \geq S(\rho)$, т.е. значение информационной энтропии Шеннона превышает значение энтропии фон

Неймана. Это означает, что применение квантовой теории информации позволяет осуществить более глубокое сжатие классической информации.

Факт 2. Сцепление (разделение) информации в квантовом состоянии в виде классической и квантовых частей. Рассмотрим модель обобщенного измерения (см. разд. 2) на состоянии $A_i A_i^\dagger$, для которой матрица плотности имеет следующее

определение:

$$\rho_B^i = \frac{A_i \rho_B A_i^\dagger}{\text{Tr}(A_i \rho_B A_i^\dagger)}.$$

Конечное состояние подсистемы B будет тогда: $\sum_i A_i \rho_B A_i^\dagger = \sum_i p_i \rho_B^i$. Энтропия редуцированного состояния равна $\sum_i p_i S(\rho_B^i)$. Количество классической информации, полученной на измерении i с вероятностью p_i , выражается как информационная энтропия Шеннона $H(p)$. Если квантовые состояния ρ_B^i принадлежат ортогональным подпространствам, то энтропия конечного состояния (после измерения) есть сумма редуцированной квантовой энтропии $\sum_i p_i S(\rho_B^i)$ и классической информации:

$$S\left(\sum_i p_i \rho_B^i\right) = \underbrace{H(p)}_{\text{Классическая}} + \underbrace{\sum_i p_i S(\rho_B^i)}_{\text{Квантовая}}.$$

Таким образом, количество информации, содержащейся в квантовом состоянии, может быть разделено (сцеплено в виде) на квантовую и классическую части.

Поэтому при моделировании робастных структур ИСУ с помощью ОБЗ моделируется классическая часть информации, а ее дефицит может быть определен следующим образом: $\Delta I = \underbrace{S\left(\sum_i p_i \rho_B^i\right)}_{\text{Полная}} - \underbrace{\sum_i p_i S(\rho_B^i)}_{\text{Квантовая}} = \underbrace{H(p)}_{\text{Классическая}}$.

Можно извлечь, следовательно, дополнительное количество ценной квантовой информации из индивидуальных БЗ для последующего использования при проектировании интеллектуального управления повышенного уровня. При этом применяются квантовые процедуры сжатия и редукции избыточной информации, содержащейся в классических сигналах управления (привлекая соответствующие модели квантовой корреляции в квантовом алгоритме КНВ).

Факт 3. Количества полной, классической и квантовой корреляций. Запутанные состояния и, в общем виде, квантовая корреляция являются типичными физическими ресурсами квантовых вычислений. Однако, не все виды корреляций имеют чисто квантовую природу. Иными словами, полные корреляции представляют собой «смеси» классической и квантовой корреляций [41]. Для оптимального проектирования (эффективно моделируемых на классических компьютерах) заданного класса КА важно знать тип и вид необходимой классической корреляции. Так, например, если возможно определить классическую часть корреляций, то, используя оптимальные ПООЗ-меры измерения, допустимо извлечь максимальное количество информации в классической форме, содержащейся в квантовом состоянии, с минимумом возрастания энтропии [42,43]. Количество полной корреляции может быть разделено на классическую и квантовую части. Данная мера эквивалентна мере максимальной классической/квантовой взаимной информации $I(A:B)$, сохраняя непосредственно прямую физическую интерпретацию взаимоотношений между соответствующими мерами [44].

Факт 4. Скрытая (наблюдаемая) классическая корреляция в квантовом состоянии. В квантовой теории информации установлен следующий неожиданный факт. Условие пропорционального увеличения количества информации $[I_{Cl}(\rho) = \max_{M_A \otimes M_B} I(A:B)]$,

определенного локальными измерениями $[M_A \otimes M_B]$ на состоянии ρ_{AB} , может быть нарушено при некоторых экстремальных ограничениях на начальное смешанное состояние ρ . Так, например, начальный объем информации в виде одного классического бита информации, посланного от A к B , может увеличиться на этапе приема на определенную величину в количественной мере $I_{Cl}(\rho)$. Этот факт объясняется с позиции феномена наблюдения классической корреляции в квантовом состоянии ρ . Так как пропорциональное увеличение количества информации $I_{Cl}(\rho)$ выполняется на классическом уровне, то феномен наблюдения корреляции является чисто квантовым эффектом, возникающим вследствие неразличимости квантовых не ортогональных состояний.

Поэтому существуют квантовые двухчастичные состояния, которые содержат большое количество классической корреляции, ненаблюдаемой на классическом уровне из-за диспропорционально малого для ее наблюдения необходимого количества классической информации в канале передачи (ограниченная способность передачи информации).

Существует $2n+1$ квантовых битов, с помощью которых однобитовое сообщение вдвое увеличивает оптимальное количество классической взаимной информации как результат измерений между подсистемами. В общем случае для посланных $n/2$ битов происходит увеличение указанного количества информации до n битов. Получить указанный эффект на классическом уровне невозможно в силу законов классической физики. При этом замечателен следующий факт: состояния, поддерживающие указанный эффект, не обязательно должны быть запутанными и соответствующий классический канал обмена данными можно реализовать с помощью преобразования Адамара.

Приведенные факты составляют информационный ресурс основы КНВ, используемый при моделировании робастных БЗ для интеллектуальных НР.

о *Полная корреляция и скрытая (наблюдаемая) корреляция в квантовых состояниях.*

Существует уверенность, что ожидаемая вычислительная мощность квантовых вычислений исходит из существования квантового ресурса. Запутанные состояния, или квантовая корреляция в общем случае, являются яркими тому примерами. Однако, как упоминалось в разд. 3, не все виды корреляции имеют чисто квантовую природу, т.е. полная корреляция «представляет «смесь» классической и квантовой корреляций». Важным моментом является знание о том, как и где, используется классическая корреляция в КА. Например, если возможно определить и выделить классическую часть корреляции, то с помощью оптимального измерения можно извлечь некоторое дополнительное количество информации в классической форме, скрытое в квантовом состоянии, с минимальным возрастанием энтропии.

Физически перечисленные виды корреляции характеризуются количеством работы (шумом), которое необходимо совершить для устранения (разрушения) корреляций: для полной корреляции требуется количество работы до полного разрушения, для квантовой корреляции достаточно количество работы до разрушения на разделимые состояния. Однако и в случае классической корреляции максимальная корреляция разрушается после устранения квантовой корреляции. Полное количество корреляции, измеряемое минимальным производством рандомизации и эквивалентное требованию

полного разрушения всех видов корреляций в состоянии ρ_{AB} , эквивалентно квантовому количеству взаимной информации.

■ *Классическая и квантовая корреляции.* Классическую взаимную информацию, содержащуюся в квантовом состоянии ρ_{AB} (до его измерения), можно оценить естественным образом как максимальную взаимную информацию, которую можно извлечь путем локальных измерений $M_A \otimes M_B$ на состоянии ρ_{AB} :

$$I_{Cl}(\rho) = \max_{M_A \otimes M_B} I(A:B). \text{ Здесь } I(A:B) - \text{ классическая взаимная информация,}$$

$$\text{определяемая в виде: } I(A:B) \equiv H(p_A) + H(p_B) - H(p_{AB}),$$

где H - информационная энтропия и p_{AB}, p_A, p_B - функции плотности распределения вероятностей взаимного и индивидуального результатов, полученных локальными измерениями $M_A \otimes M_B$ на состоянии ρ .

Пример 25: *Взаимная информация и классическая корреляция.* Для понимания роли классической корреляции, а также ее взаимосвязи с понятием взаимной информации, определим квантовую взаимную информацию для двухчастичного состояния ρ_{AB} квантовой системы в форме Стратоновича:

$$I(A:B) = S(\rho_A) + S(\rho_B) - S(\rho_{AB}).$$

Рассмотрим составную систему AB в состоянии ρ_{AB} , способную пребывать в состоянии ρ_A с вероятностью p и с вероятностью $(1-p)$ - в другом состоянии ρ_B .

Для данного случая составной системы AB взаимная информация может быть вычислена в следующем виде:

$$I(A:B) = 2H\left(\frac{1}{2}\left[1 + \sqrt{p^2 + (1-p)^2}\right]\right) - H\left(\frac{1}{2}\left[1 + \sqrt{1 + 3p^2 - 3p}\right]\right). \quad (П2.5)$$

Если ρ_{AB} - разделимое состояние, то его относительная энтропия в запутанном состоянии равна нулю. Физическая интерпретация значения $I_{Cl}(\rho)$ многозначна [45,48]:

- $I_{Cl}(\rho)$ выступает максимальной классической корреляцией, извлекаемой чисто локальной процедурой измерения из состояния ρ ;
- $I_{Cl}(\rho)$ соответствует классическому определению, когда состояние ρ - «классическое», т.е. диагональное в некотором (локально используемом) вычислительном базисе и отвечает классическому распределению;
- если ρ - чистое состояние, то $I_{Cl}(\rho)$ задает корреляцию, определенную базисом Шмидта и эквивалентную мере перепутанных чистых состояний;
- $I_{Cl}(\rho) = 0$, если и только если $\rho_{AB} = \rho_A \otimes \rho_B$.

Известно, что некоторые подходящие меры квантовой корреляции должны удовлетворять некоторым аксиоматическим свойствам:

- 1) квантовая корреляция является нелокальной и не может возрастать при локальных процедурах измерений (свойство монотонности);
- 2) полная пропорциональность;
- 3) приращение пропорциональности;
- 4) непрерывность по ρ .

Физически свойство (2) означает, что протокол состояний, составленный из некоррелированного начального состояния, использующий l квантовых битов или $2l$ классических битов (для передачи сообщений по квантовому каналу связи) и применяющий локальные операции, не может породить более чем $2l$ битов корреляции. Свойство (3) предполагает, что при передаче сообщения возрастает и не превышает величины $2l$ битов.

Свойства (1) – (4) выполняются полностью для ряда известных мер корреляции. Эти свойства справедливы, в частности, для классической взаимной информации $I(A:B)$, когда передача сообщений осуществляется классическим способом. Так, например, свойства полной и приращения пропорциональности $I(A:B)$ для классического случая следуют из факта, что имеет место неравенство: $\max(H(p_A), H(p_B)) \leq H(p_{AB}) \leq H(p_A) + H(p_B)$, так что, когда A посылает классическую систему A' к B , имеем $I_{Cl}(\rho) = I(A; BA') \leq I(AA'; B) + H(p_{A'})$.

Тогда свойство полной пропорциональности следует из свойства приращения пропорциональности. Это же выполняется для квантовой взаимной информации:

$$I_Q(A:B) = S(\rho_A) + S(\rho_B) - S(\rho_{AB}).$$

Неожиданным оказалось то, что свойство приращения пропорциональности нарушается для $I_{Cl}(\rho)$ экстремальным образом в случае смешанных начальных состояний ρ : простой классический бит, посланный от A к B , может в результате привести к увеличению $I_{Cl}(\rho)$ до некоторого большого значения.

Данный феномен рассматриваем как возможность наблюдения классической корреляции в квантовом состоянии ρ . Если свойство приращения пропорциональности $I_{Cl}(\rho)$ имеет место на классическом уровне, то феномен наблюдаемой классической корреляции является чисто квантовым эффектом. Этот результат непосредственно следует из неразличимости не ортогональных квантовых состояний.

Пример 26. Допустим, что задано начальное состояние ρ , тип передачи сообщения и соответствующее количество передаваемой информации. Возрастание корреляции можно охарактеризовать следующими функциями:

$$I_{Cl}^{(l)} = \max_{\Lambda^{(l)}} I_{Cl}(\Lambda^{(l)}(\rho)) \quad (\text{одностороннее классическое сообщение});$$

$$I_{Cl}^{[l]} = \max_{\Lambda^{[l]}} I_{Cl}(\Lambda^{[l]}(\rho)) \quad (\text{двухстороннее классическое сообщение}).$$

Оператор Λ - операция над двухчастичным состоянием, которая состоит из локальных операций и содержит не более чем $2l$ классических или l квантовых битов в сообщении. Это отражено в соответствующих верхних индексах (l) или $[l]$. Через ρ и ρ' обозначены состояния до и после проведения операций с обменом сообщениями, $\rho' = \Lambda(\rho)$. Количество, скрытой (ненаблюдаемой) корреляции в состоянии с l квантовыми битами при одностороннем обмене сообщениями, может быть ограничено следующим условием: $I_{Cl}^{(l)}(\rho) - I_{Cl}(\rho) \leq l + (2^l - 1)I_{Cl}(\rho)$. Для малых значений $I_{Cl}(\rho)$, количество скрытой (ненаблюдаемой) корреляции при двустороннем обмене сообщениями ограничено сверху:

$$I_{Cl}^{[l]}(\rho) - I_{Cl}(\rho) \leq 2l + O(d^2 \sqrt{I_{Cl}(\rho)} \log I_{Cl}(\rho)).$$

■ *Скрытая (наблюдаемая) классическая корреляция в квантовом состоянии.* Обсудим ситуацию, в которой некоторое количество корреляции не доступно наблюдению при одностороннем обмене сообщениями. Начальное состояние определяется подсистемами A и B на соответствующих подпространствах размерностью $2d$ и d в виде:

$$\rho = \frac{1}{2d} \sum_{k=0}^{d-1} \sum_{t=0}^{d-1} (|k\rangle\langle k| \otimes |t\rangle\langle t|)_A \otimes (U_t |k\rangle\langle k| U_t^\dagger)_B, \quad (\text{П2.6})$$

где операторы $U_0 = I$ и U_1 меняют исходный вычислительный базис на объединенный как $|\langle i|U_t|k\rangle| = \frac{1}{\sqrt{d}} \quad \forall i, k$. Тогда B выбирает случайным образом состояние $|k\rangle$ из d

состояний в двух возможных рандомизированных базисах (в зависимости от случая, когда $t = 0$ или 1 в (П2.6)). В то же время наблюдатель A имеет полную информацию о квантовом состоянии наблюдателя B . Получив необходимое количество информации в виде $I_{Cl}^{(l)}(\rho) = \log d + 1$, A посылает значение t к B , который в свою очередь применяет оператор U_t к своему состоянию и измеряет значение k в вычислительном базисе. В результате A и B имеют измерение k и t , что дает $I_{Cl}^{(l)}(\rho) = \log d + 1$ бит

корреляции. Состояние ρ эволюционирует по следующему сценарию. Пусть $d = 2^n$. Тогда A выбирает случайным образом k длиной в n битов и посылает к B сообщение о состоянии $|k\rangle$ или $H^{\otimes n}|k\rangle$ в зависимости от случайного значения бита $t = 0$ или 1 .

Здесь H - преобразование Адамара; A посылает t к B и позже наблюдает созданную корреляцию. Экспериментально установлено, что применения преобразования Адамара и измерения состояния квантовых битов достаточно, чтобы реализовать процедуру приготовления состояния ρ и затем извлечь скрытую в состоянии ρ' классическую

корреляцию. Начальная корреляция является малой величиной: $I_{Cl}^{(l)}(\rho) = \frac{1}{2} \log d$. После

полного измерения M_A при одностороннем обмене сообщениями конечное значение количества информации в квантовом состоянии определяется как

$$I_{Cl}(\rho') = I_{Cl}^{(l)}(\rho) = \log d + 1, \text{ т.е. количество доступной информации увеличивается.}$$

Примечание 26. Отметим, что полное измерение M_A в базисе $\{|k\rangle \otimes |t\rangle\}$ оптимально

для системы A . Выходное значение результата измерения точно дает информацию о том, какое чистое состояние из ансамбля выбрано. Поэтому имеется возможность применить классический, локальный процесс обработки (результата измерения) для получения информации о распределении результатов других измерений. Выбор оптимального измерения для системы A позволяет извлечь из $I_{Cl}(\rho)$ для системы B

доступное количество информации I_{Acc} об ансамбле равномерно распределенных состояний $\{|k\rangle, (U_1 = H)|k\rangle\}_{k=0, \dots, d-1}$.

■ *Доступная информация об ансамбле смешанных состояний.* В общем случае доступная информация об ансамбле смешанных состояний $\mathcal{E} = \{p_i, \eta_i\}$ определяется как максимальная взаимная информация между измеряемым состоянием с индексом i и результатом его измерения. Количество доступной информации $I_{Acc}(\mathcal{E})$ можно

охарактеризовать как максимальное значение информации, извлекаемое из квантового состояния с помощью ПООЗ-измерений (разд.2) с элементами только ранга 1.

Допустим, что $M = \{\alpha_j |\phi_j\rangle\langle\phi_j|\}$ означает ПООЗ-измерение с элементами ранга 1, где каждое состояние $|\phi_j\rangle$ нормализовано и $\alpha_j > 0$. Тогда $I_{Acc}(\mathcal{E})$ можно вычислить следующим образом:

$$I_{Acc}(\mathcal{E}) = \max_M \left[\underbrace{-\sum_i p_i \log p_i}_{\text{Классическая часть}} + \underbrace{\sum_i \sum_j p_i \alpha_j \langle\phi_j|\eta_i|\phi_j\rangle \log \frac{p_i \langle\phi_j|\eta_i|\phi_j\rangle}{\langle\phi_j|\mu|\phi_j\rangle}}_{\text{Квантовая часть}} \right], \quad (\text{П2.7})$$

где $\mu = \sum_i p_i \eta_i$. Применим теперь выражение (П2.7) к решению вышеупомянутой проблемы. Ансамбль состояний задается как $\left\{ \frac{1}{2d}, U_i |k\rangle \right\}_{k,t}$ при следующих значениях

$i = k, t; p_{k,t} = \frac{1}{2d}, \mu = \frac{I}{2}$ и $\langle\phi_j|\mu|\phi_j\rangle = \frac{1}{d}$. Подставляя все из приведенных выражений в формулу (П2.7) для $I_{Acc}(\mathcal{E})$, получим:

$$I_{Cl}(\mathcal{E}) = \max_M \left[\underbrace{\log 2d}_{\text{Классическая часть}} + \underbrace{\sum_{j,k,t} \frac{\alpha_j}{2d} |\langle\phi_j|U_i|k\rangle|^2 \log \frac{|\langle\phi_j|U_i|k\rangle|^2}{2}}_{\text{Квантовая часть}} \right]$$

$$= \max_M \left[\underbrace{\log d}_{\text{Классическая часть}} + \underbrace{\sum_j \frac{\alpha_j}{d} \left(\frac{1}{2} \sum_{k,t} |\langle\phi_j|U_i|k\rangle|^2 \log |\langle\phi_j|U_i|k\rangle|^2 \right)}_{\text{Квантовая часть}} \right],$$

где использованы следующие обозначения: $\sum_j \alpha_j = d$ и $\forall j, t \sum_k |\langle\phi_j|U_i|k\rangle|^2 = 1$.

Так как выполняется соотношение $\sum_j \frac{\alpha_j}{d} = 1$, то второе выражение является выпуклой комбинацией и может быть ограничено сверху путем операции максимизации по первому члену в виде

$$I_{Cl}(\mathcal{E}) \leq \log d + \max_{\{\phi\}} \frac{1}{2} \sum_{k,t} |\langle\phi|U_i|k\rangle|^2 \log |\langle\phi|U_i|k\rangle|^2.$$

Отметим, что член $-\sum_{k,t} |\langle\phi|U_i|k\rangle|^2 \log |\langle\phi|U_i|k\rangle|^2$ представляет сумму энтропийных мер измеряемого состояния $|\phi\rangle$ в вычислительном и в обобщенном базисах. Такая сумма энтропий ограничена величиной $\log d$. Нижние границы подобного типа в теории квантовых измерений называются *неравенствами энтропийной*

неопределенности (EUI), которые количественно определяют невозможность одновременного извлечения вектора $|\phi\rangle$ из двух обобщенных (совместных) базисов.

Из приведенных соотношений следует, что $I_{Cl}(\rho) \leq \frac{1}{2} \log d$. Равенство можно достигнуть, если B измеряется в вычислительном базисе

$$I_{Cl}(\rho) = \frac{1}{2} \log d, \quad I_{Cl}^{(U)}(\rho) - I_{Cl}(\rho) = 1 + \frac{1}{2} \log d.$$

Отметим, что свойство приращения пропорциональности выполняется для многократных копий состояния ρ . Wootters показал [8], что доступная информация из m независимых копий ансамбля \mathcal{E} разделенных состояний аддитивна, $I_{Acc}(\mathcal{E}^{\otimes m}) = m I_{Acc}(\mathcal{E})$. Отсюда следует, что для рассматриваемого случая имеем: $I_{Cl}(\rho^{\otimes m}) = m I_{Cl}(\rho)$.

Пример 27. Пусть задано двух частичное состояние ρ_{AB} . Определим возможную меру классической корреляции между подсистемами A и B следующим образом:

$$Cor_B(\rho_{AB}) = \max_B \left[S(\rho_A) - \sum_i p_i S(\rho_A^i) \right], \quad (\text{П2.8})$$

где $\rho_A = Tr_B(\rho_{AB})$ - редуцированная матрица плотности. Энтропия фон Неймана имеет вид: $S(\rho) = -Tr(\rho \log \rho)$. Условная матрица плотности ρ_A^i определяется через матрицы плотности состояния A после реализации измерения B , над состоянием B в виде:

$$\rho_A^i = \frac{Tr_B(B_i \rho_{AB})}{Tr_{AB}(B_i \rho_{AB})}.$$

Вероятность определить A в состоянии ρ_A^i есть $p_i = Tr_{AB}(B_i \rho_{AB})$. Мера корреляции (П2.8) имеет простую физическую интерпретацию: если A и B не коррелированы, то маргинальное значение энтропии $[S(\rho_A)]$ состояния A и взвешенное усредненное значение энтропии A после ПООЗ-измерения $\left[\sum_i p_i S(\rho_A^i) \right]$ над состоянием B дает как

следствие $Cor_B(\rho_{AB}) = 0$, так как для некоррелированной системы AB состояние A не зависит от действия ПООЗ - измерения состояния B . Более того, отметим, что имеет место соотношение $\rho_A = \sum_i p_i \rho_A^i$; тогда для данного ПООЗ-измерения над системой B

выражение $\left[S(\rho_A) - \sum_i p_i S(\rho_A^i) \right]$ задает дефект энтропии, определение которого дано в [49]. Следовательно, классическую корреляцию $Cor_B(\rho_{AB})$ можно рассматривать как максимальное осредненное возрастание энтропии системы A , когда состояние ρ_A^i (после завершения измерения B , над системой B) является специфически сравнимым с ситуацией, в которой известны только смешанные состояния ρ_A .

Классическая корреляция устанавливает меру силы корреляции двух подсистем без указания приоритета подсистемы, используемой для извлечения данной корреляции.

Количество квантовой взаимной информации $I(A:B)$ двухчастичной составной системы AB можно декомпозировать на дефицит информации (или работы) Δ и дефицит классической информации Δ_{cl} в виде $I = \Delta_{cl} + \Delta$. Это приводит к естественной аналогии с процессом декомпозиции для случая количества взаимной информации, используемой при описании различных мер классической корреляции. Количество оцененной классической корреляции и относительной энтропии (E_{REN}) в запутанных состояниях также не превышает в сумме количества взаимной информации фон Неймана между двумя подсистемами, т.е. : $I(\rho_{AB}) > [C_B(\rho_{AB})]_{opt} + E_{REN}$.

Физически это означает, что выбор неоптимального ПООЗ-измерения может разрушить полную корреляцию. Естественно, что при рассмотрении всех возможных ПООЗ-измерений для данного состояния оптимальный класс ПООЗ-измерений не может устранить полную корреляцию. Другой альтернативой, которая делает совместимыми понятия классической корреляции и взаимной информации, является возможность различных определений мер квантовых корреляций, отличных от представления последних в виде (E_{REN}).

Одним из возможных кандидатов служит квантовый беспорядок.

Пример 28: *Взаимная информация и квантовый беспорядок*. В противоположность к определению классической условной энтропии квантовая условная энтропия является зависимой величиной от процедуры измерения, проводимой над исследуемой системой.

Мерой квантового беспорядка выступает: $\delta(A:B) = I(A:B) - J(A:B)_{\{\Pi_i^B\}}$.

Величина J задает информацию о системе B по результатам серии измерений $\{\Pi_i^B\}$:

$$J(A:B)_{\{\Pi_i^B\}} = S(A) - S(A|\{\Pi_i^B\}) = S(A) - \sum_i p_i S(*\rho_i^A),$$

где $*p_i$ и $*\rho_i^A$ изначально выбраны как специальные случаи p_i и ρ_i^A , когда множества измерений формируются как ограниченные одномерные проекции Π_i^B .

Приведенное определение квантового беспорядка четко описывает неразделимую зависимость квантовой условной энтропии от процедуры измерения. Мера квантового беспорядка равна нулю, если существует такое (хотя бы одно) измерение, для которого эта мера принимает нулевое значение. Поэтому минимальному значению меры квантового беспорядка сопоставляют квантовую корреляцию. При выборе соответствующего множества измерений над системой B , определенного как множество одномерных проекций, нетрудно проверить, что множество измерений, при которых минимизируется квантовый беспорядок, т.е. максимизируется величина J , эквивалентно ПООЗ-измерениям, оптимизирующим меру классических корреляций бинарных состояний. Данный результат следует из определения этих количественных мер и результата оптимизации классических корреляций при использовании только проективных измерений.

Следовательно, имеем: $\max [J(A:B)_{\{\Pi_i^B\}}] = Cor_B(\rho_{AB})$.

Поэтому, $I(A:B) = Cor_B + \min_{\{\Pi_i^B\}} \delta(A:B)$, т.е. для бинарных состояний классическая корреляция и квантовый беспорядок выступают составными компонентами в оценке взаимной информации. Поэтому не существует измерения, извлекающего

классическую корреляцию и способного изменить значение взаимной информации между двумя подсистемами при добавлении классической корреляции к относительной энтропии.

Это подтверждает утверждение, что удобнее использовать понятие квантового беспорядка в качестве квантовой составной части для классической корреляции вместо относительной энтропии.

Рекомендуемая литература к Приложению П2

1. Kitaev A.Yu., Shen A.H., Vyaly M.N. Classical and quantum computation. – N.Y.: AMS. – 2002.
2. Brylinski F.K. and Chen G. (Eds). Mathematics of quantum computation. – Computational Mathematics Series. – CRC Press Co. – 2002.
3. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S. and Ulyanov S.S. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum decision making and search algorithms. – Note del Polo Ricerca, Università degli Studi di Milano (Polo Didattico e di Ricerca di Crema). – Vols. 84 & 85. – Milan. – 2005.
4. Stenholm S. and Suominen K.-A. Quantum approach to informatics. – Wiley- Interscience. J. Wiley&Sons, Inc. – 2005.
5. Marinescu D.C. and Marinescu G.M. Approaching quantum computing. – Pearson Prentice Hall, New Jersey. – 2005.
6. Benenti G., Casati G., Strini G. Principles of quantum computation and information. – Singapore: World Scientific. – V. I. 2004; V. II 2007.
7. Janzing D. Computer science approach to quantum control. – Habilitation: Univ. Karlsruhe (TH) Publ. Germany. – 2006.
8. Jaeger G. Quantum Information: An overview. – N.Y.: Springer Verlag. – 2007.
9. Kaye P., Laflamme R. and Mosca M. An introduction to quantum computing. – N.Y.: Oxford University Press. – 2007.
10. McMahon D. Quantum computing explained. – Wiley Interscience. A J. Wiley Sons, Inc. – 2008.
11. Lanzagorta M. and Uhlmann J. Quantum computer science. – Morgan & Claypool Publ. – Series: SYNTHESIS LECTURES ON QUANTUM COMPUTING (Lecture #2). – 2009.
12. Nakahara M. and Ohmi T. Quantum computing: From Linear Algebra to Physical Realizations. – Taylor & Francis. – 2008.
13. Chen G., Kauffman L., and Lomonaco S. J. Mathematics of Quantum Computation and Quantum Technology. – N.Y.: Chapman Hall/CRC (Applied Mathematics and Nonlinear Science Series). – 2008.
14. Chen G., Church D.A., Englert B.-G., Henkel C., Rohwedder B., Scully M.O. and Zubairy M.S. Quantum Computing Devices: Principles, Designs, and Analysis. – N.Y.: Chapman Hall/CRC (Applied Mathematics and Nonlinear Science Series). – 2008.
15. McMahon D. Quantum computing explained. – N.J.: John Wiley & Sons. – 2008.
16. Yanofsky N.S. and Mannucci M.A. Quantum Computing for Computer Scientists. – Cambridge University Press. – 2008.
17. Chen G. and Diao C. Mathematical Theory of Quantum Computation. – N.Y.: Chapman Hall/CRC (Applied Mathematics and Nonlinear Science Series). – 2009.
18. Kholevo A.S. Quantum systems, channels, and information. – M.: МЦНМО. – 2010 (in Russian).

19. Batty M., Braunstein S.L., Duncan A.J. and Rees S. Quantum algorithms in group theory // [http:// arXiv: quant-ph/0310133v1](http://arXiv:quant-ph/0310133v1), 21 Oct 2003, 52 p.
20. Quantum Algorithms: Shor's algorithm, Grover's algorithm, Quantum logic, Quantum algorithm, Quantum Fourier transform, Deutsch-Jozsa algorithms. – Books LLC. – 2010.
21. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S.et all. Quantum information and quantum computational intelligence: Applied quantum soft computing in AI, computer science, quantum games and self-organization, informatics and design of intelligent wise robust control. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. V. 86. 2007. (<http://www.qcoptimizer.com/>)
22. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S.et all. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum feedback control models – Physical limits, information bounds, and information-disturbance trade-off. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. V. 81. 2006. (<http://www.qcoptimizer.com/>)
23. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S.et all. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum optimal control and filtering – Stability, robustness, and self-organization models in nanotechnologies. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. V. 82. 2007. (<http://www.qcoptimizer.com/>)
24. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum computation and quantum information. Cambridge: University Press, 2000.
25. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum probability, physics of quantum information and information geometry, quantum computational logic and quantum complexity Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. V. 83. 2005. (<http://www.qcoptimizer.com/>)
26. Benenti G., Casati G., Strini G. Principles of quantum computation and information. Singapore: World Scientific, V. I. 2004; V. II 2007.
27. Janzing D. Computer science approach to quantum control. Habilitation: Univ. Karlsruhe (TH) Publ. Germany. 2006.
28. Selinger P. Towards a quantum programming language // Math. Struct. In Comp. Science. – 2004. – Vol. 14. Pp. 527 – 586.
29. Bettelli S., Calarco T., Serafini L. Toward an architecture for quantum programming // arXiv:cs/0103009v3 [cs.PL] 27 Mar 2003.
30. Mauerer W. Semantics and simulation of communication in quantum programming. - Diploma Thesis. – 2005. – University Erlangen Nuremberg, May 2005.
31. Tafliovich A. Predicative Quantum Programming. - A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Doctor of Philosophy Graduate Department of Computer Science University of Toronto. – 2010.
32. Chakraborty A. QuECT: A new quantum programming paradigm // [arXiv: 1104.0497v1](http://arXiv:1104.0497v1) [quant-ph] 4 Apr 2011.
33. Gawron P, Klamka J., Miszczak J.A., Winiarczyk R. Extending scientific computing system with structural quantum programming capabilities // BULLETIN OF THE POLISH ACADEMY OF SCIENCES TECHNICAL SCIENCES. – 2010. – VOL. 58, – No. 1.
34. Green A.S., Lumsdaine P., Ross N.J. Quipper: A scalable quantum programming language // [arXiv: 1304.3390 v1](http://arXiv:1304.3390v1) [cs.PL] 11 Apr 2013.