

УДК 658.012.011.56

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ. I. КВАНТОВЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ И АЛГОРИТМ САМООРГАНИЗАЦИИ

© 2009 г. Л. В. Литвинцева, С. В. Ульянов

Москва, Дубна ООО “МКГ Квант”, Международный университет природы, общества и человека “Дубна”

Поступила в редакцию 25.04.09 г., после доработки 18.05.09 г.

Обсуждается роль и методология применения квантовых вычислений в задачах проектирования робастных интеллектуальных систем управления в условиях непредвиденных ситуаций управления. Разработан квантовый алгоритм управления самоорганизацией, содержащий как частный случай алгоритм управления самоорганизацией робастных баз знаний. Выполнение введенного термодинамического критерия (в виде минимума обобщенной энтропии в установленном соотношении между такими качественными характеристиками управления, как устойчивость, управляемость и робастность) является целью применения квантового алгоритма управления самоорганизацией баз знаний, используемого в контуре управления. На примере существенно нелинейного и глобально неустойчивого объекта управления рассмотрено применение квантового алгоритма управления самоорганизацией к решению задачи векторной оптимизации на основе принципа декомпозиции баз знаний.

Введение. Проблемы разработки интеллектуальных систем управления и цель работы. 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 [1]. 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 [2] разработанной системы (формы, вида и глубинного представления знаний [3]). Важную роль при формировании уровня интеллектуальности САУ играет выбор используемого инструментария технологии интеллектуальных вычислений¹ для проектирования соответствующей базы знаний (БЗ) при заданной цели управления.

А. Роль ИСУ. Разработка ИСУ для традиционных систем автоматического управления (САУ) с

повышенной робастностью, способных поддерживать требуемые уровни точности и надежности в условиях непредвиденных ситуаций управления, стала объектом интеллектуальной собственности [5] и имеет существенное теоретическое, практическое и коммерческое значение. Программно-аппаратная поддержка ИСУ стала товаром при коммерциализации интеллектуального продукта в инженерном менеджменте, основанного на знаниях [6]. В частности, важным направлением прикладного применения ИСУ является повышение *робастности* традиционных (П/ПИ/ПД/ПИД)-регуляторов, используемых на нижнем уровне контуров управления.

Примечание 1. Согласно [5], 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, следуя [1, 7], выполняется принцип “*неразрушения исполнительского уровня*”, что приводит к дополнительному эффективному использованию существующих отлаженных технологических процессов и повышенному экономическому эффекту. Применение 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 [2].

В данной работе под термином БЗ понимается стандартное для теории НР определение БЗ [2, 4]

¹ Определение и термин “интеллектуальные вычисления” введены в середине 90-х годов прошлого столетия [4]. 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.

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. Структура нечеткого самоорганизующегося ПИД-регулятора с определенным уровнем интеллектуальности [2] была введена в [8] и используется в данной статье.

Примечание 2. Для полноты изложения предмета исследования ниже в разд. 4 приведен пример проектирования БЗ в виде продукционных правил “Если **A**, То **B**”, где **A** и **B** – лингвистические переменные с определенными функциями принадлежности, сформированные с помощью оптимизатора БЗ (ОБЗ) на мягких вычислениях для динамического ОУ “каровка 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) БЗ.

Б. Проблемы разработки ИСУ. Одной из трудностей разработки ИСУ для непредвиденных ситуаций управления является решение проблемы проектирования соответствующей робастной БЗ [1], 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 [9] и инструментария практической реализации процесса извлечения, обработки и формирования объективных знаний без участия эксперта [4, 7]. Введение физических и информационных ограничений в формализованное описание модели ОУ [1, 9] 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 [10].

Поэтому одной из сложных и ключевых проблем разработки основы информационной технологии 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 [8].

В. Технология проектирования и структуры ИСУ. Рисунок 1, *a* показывает типовую структуру ИСУ и описывает рассматриваемую в данной статье проблему проектирования объективной БЗ.

Рисунок 1, *б* представляет структурную схему информационной технологии и этапы проектирования объективной БЗ для робастных ИСУ, основанных на новых видах интеллектуальных вычислений.

Отметим, что выходной сигнал из НР на рис. 1, *a* определяет вектор $K = \{k_p, k_D, k_I\}$ коэффициентов усиления ПИД-регулятора, а $\{k_p, k_D, k_I\}$ означает пропорциональный, дифференциальный и интегральный коэффициенты усиления соответственно. 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, *a*).

Примечание 3. Объективно измеренный сигнал X – исходная информация для эксперта, оценка которого экспертом при построении БЗ носит в общем случае (например, при большой размерности) субъективный характер. С помощью технологий интеллектуальных вычислений можно применять непосредственно результаты измерений и извлекать из них знания без субъективной интерпретации за счет функций пригодности в ГА. Подчеркнем, что в данной статье введены стандартные обозначения структурных схем ИСУ [1, 2, 7].

Поэтому задачей технологии проектирования (обозначенной на рис. 1, *a* и структурно представленной на рис. 1, *б*) является формирование объективных робастных БЗ в ИСУ для непредвиденных ситуаций управления.

Примечание 4. На рис. 1 (и ниже на рис. 2), а также далее по тексту введены следующие обозначения: $z.c.$ – задающий сигнал (цель управления); $u(t)$ – управляющая сила; $m(t)$ – случайные шумы (возмущения на ОУ), воспроизводимые формирующими фильтрами [7]; 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. Пунктирная рамка блока “Закон управления” не охватывает ПИД-регулятор, хотя управляющий сигнал и формируется именно этим устройством (рис. 1, *a*).

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-ре-

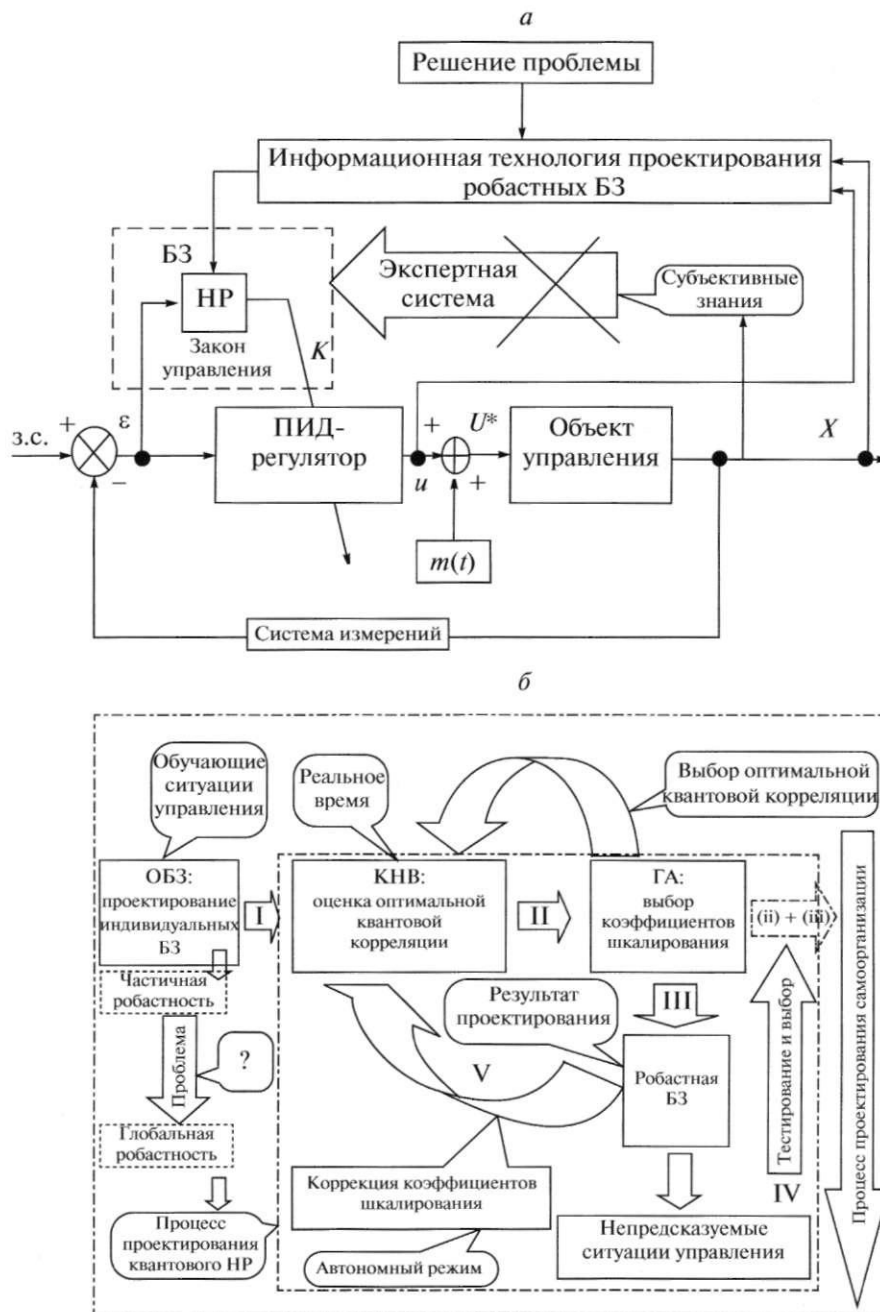


Рис. 1. Проектирование робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления: *a* – проблема проектирования БЗ; *б* – структура технологии и этапы проектирования

гуляторов, несмотря на достаточно большое количество публикаций результатов (известно более 85 патентов по формированию законов управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора).

Поэтому методологически в данной статье в силу интенсивного применения в качестве исходного 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 статьи и показано [11], что они также эффективно проектируются разработанной технологией, представленной на рис. 1. Простота физической реализации спроектированных законов управления для исполнительского уровня совместно с повышенным “уровнем интеллектуальности” и дает необходимый технический эффект [10, 11]: не разрушение исполнительского уровня

с гарантированной эффективностью и надежностью управления за счет повышения уровня его интеллектуальности.

Отметим и кратко опишем основные этапы информационной технологии проектирования робастных БЗ, представленной на рис. 1, б.

На этапе I проектирования с помощью технологии мягких вычислений (блок ОБЗ) формируется конечное множество БЗ для конкретных ситуаций управления, отмеченные на рис. 1, б выноской “Обучающие ситуации управления”. На данном этапе, как показано в [7, 8], 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, б выноской вопроса) составляет проблему, которую решает данная информационная технология проектирования.

Последовательный переход (от частичной к глобальной робастности) приводит к процессу проектирования квантового НР с использованием квантовых стратегий в нечетком логическом выводе (в виде КНВ, обозначенный соответствующей выноской на рис. 1, б). Реализация данного перехода осуществляется на этапах II–IV соответственно. После получения результатов работы КНВ блок ГА формирует коэффициенты шкалирования для обобщенных коэффициентов усиления ПИД-регулятора. Результаты (ii) \in этапу II и (iii) \in этапу III. Остальные подэтапы процесса проектирования показаны соответствующими выносками на рис. 1, б, 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, б), приведены на рис. 2.

Отметим некоторые особенности обозначений на рис. 2.

Двусторонняя стрелка “Производство энтропии” на рис. 2, б означает процесс вычисления производства энтропии сигналами X и u , что эквивалентно наличию блока вычисления “Производство энтропии” в обеих связях. Этот процесс подробно описан в [2, 7, 8]. Производство энтропии рассматривается в ГА как одна из компонент функции пригодности (критерий минимума обобщенной энтропии, см. ниже рис. 6, а) и является термодинамической величиной. Поэтому в сумматоре на рис. 2 выполняется корректная операция с физически однородными переменными (в соответствии с законами термодинамики открытых систем). Пример применения данной операции рассмотрен ниже в разд. 4.

В модели КНВ на рис. 2, б осуществляется извлечение квантовых знаний, которые скрыты 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. 13 и 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 ПИД-регулятора, включающих отмеченные особенности.

В качестве инструментария моделирования продукционных правил БЗ используются технологии мягких и квантовых вычислений [4, 12–15].

Г. Цель работы. В данной публикации, состоящей из двух взаимосвязанных частей, рассматриваются решения двух проблем. В ч. I представлен КА управления самоорганизацией знаний и роль аналогов физических (квантовых и термодинамических) эффектов в реализации процесса гарантированного достижения качества управления. При этом основное внимание уделяется качественным особенностям биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации, основные компоненты которой описываются квантовыми операторами и составляют содержание разработанной модели КА управления процессом самоорганизации. Рассматривается задача робастного управления в непредвиденных ситуациях на основе квантовых стратегий принятия решений в виде инструментария КНВ как частного случая разработанного обобщенного КА управления самоорганизацией. В ч. II демонстрируются результаты применения технологии проектирования робастных БЗ в структуре ИСУ (см. рис. 1, б и 2, б).

Д. Прикладные аспекты. Разработанный программный инструментарий новых интеллектуальных вычислений (unconventional computational intelligence [15]) включает 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 статье 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 статье в качестве примера (Benchmark) эффективного использования разработанной информационной технологии проектирования.

Ниже, в разд. 4, иллюстрируется возможность эффективного применения технологии кванто-

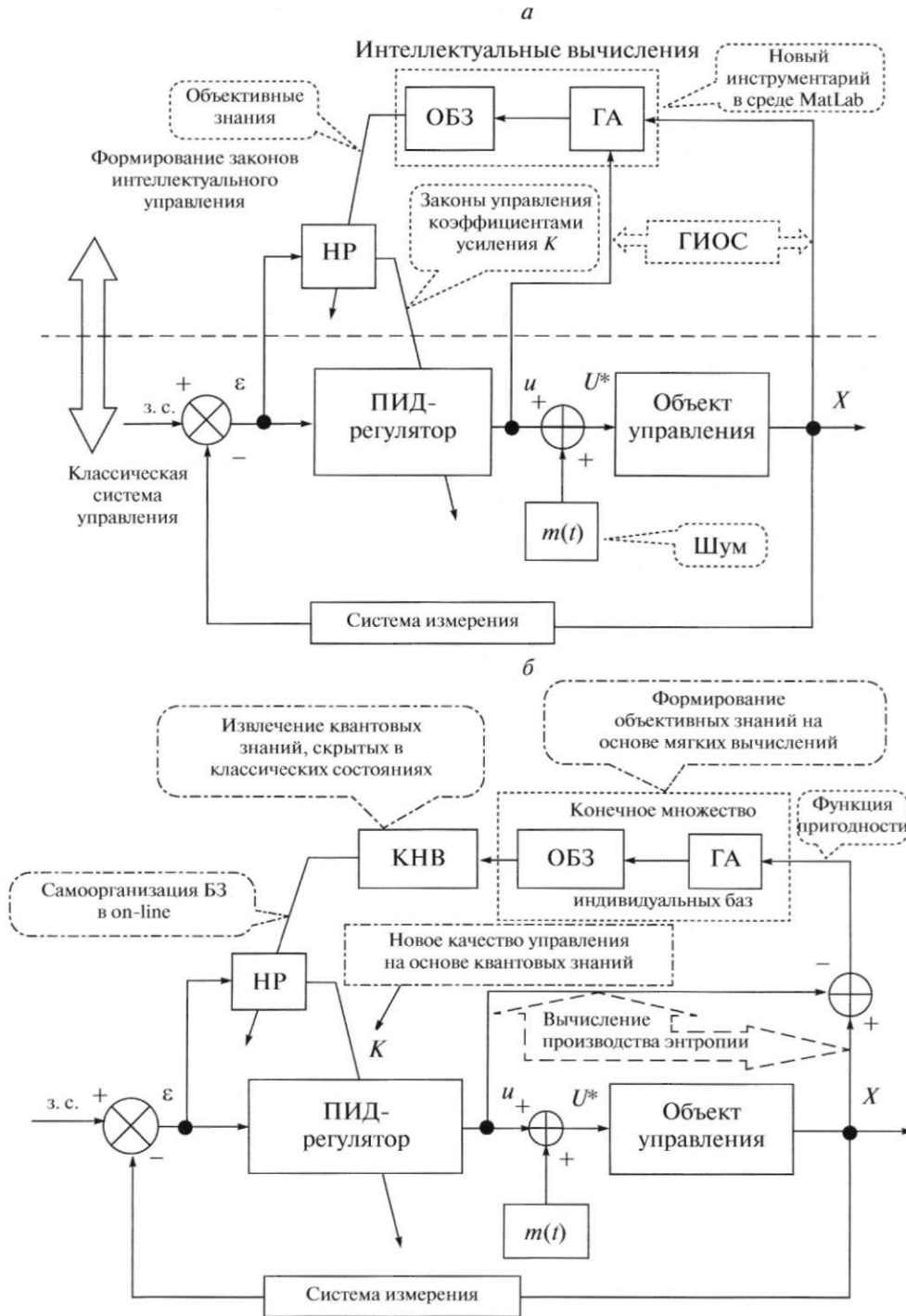


Рис. 2. Структуры ИСУ с оптимизаторами БЗ (ОБЗ) на интеллектуальных вычислениях: *a* – структура ИСУ с ОБЗ на мягких вычислениях; *б* – структура ИСУ с ОБЗ на квантовых вычислениях; ГИОС – глобальная интеллектуальная обратная связь

вых вычислений, в частности, для решения таких алгоритмически неразрешимых задач классическими методами, как проектирование глобальной робастности ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления [10, 16]. Под классическими методами подразумеваются методы рекуррент-

ной стохастической оптимизации и другие, входящие, например, в промышленное программное обеспечение поддержки системы инженерных расчетов типа МатЛаб/Симулинк.

1. Роль и принципы технологий интеллектуальных вычислений в процессах проектирования ИСУ.

В традиционных исчислениях по количественному результату численного алгоритма происходит соответствующая оценка качественного свойства исследуемого объекта. Логическая оценка качества в общем случае может быть сделана только в конце количественных вычислений, а для алгоритмически неразрешимых численных проблем (сложность алгоритма по Колмогорову [9]) часто искомая оценка не достижима.

Основой интеллектуальных вычислений являются не только числовые шкалы (как в традиционных вычислениях), но и качественные характеристики исследуемого объекта. Цель и возможность интеллектуальных вычислений — непосредственное определение качественных характеристик объекта, алгоритмически оперируя последними так же, 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 [11–15].

Так, например, для вычисления качественной характеристики функции (постоянная или балансирующая для четырех значений аргумента) в традиционном подходе требуется четыре шага численных операций, в то же время КА 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. Полное описание указанных КА дано в [11–14].

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

Нестандартные логики, используемые в основе интеллектуальных вычислений, 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 интеллектуальных вычислений относятся мягкие и кван-

товые вычисления, используемые в данной работе для проектирования робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления. Применение новых технологий в инженерной практике теории и систем управления 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 [1].

Рассмотрим кратко методологические особенности применения технологий мягких и квантовых вычислений.

1.1. Технология мягких вычислений и й. 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 осреднения 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 [1].

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 ГА в задачах много-

критериального управления и наличии ограничений на параметры ОУ и др.

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе ОБЗ с применением технологии мягких вычислений. Разработанный интеллектуальный инструментальный позволил проектировать робастные БЗ при решении одной из алгоритмически трудно решаемых задач теории искусственного интеллекта – извлечение, обработка и формирование объективных знаний без использования экспертных оценок. Данная задача подробно была рассмотрена в [7], в которой приведены описание структуры ОБЗ, решаемые задачи оптимизации и дана постановка задачи. Согласно рис. 1, б, выходные данные из ОБЗ на этапе I являются входными данными для этапа II, использующего КНВ для проектирования робастных БЗ.

Отметим некоторые особенности ОБЗ на этапе I. В приведенном оптимизаторе используются три ГА. Физически первый ГА осуществляет оптимизацию лингвистических переменных в левой части продукционного правила типа “Если А...” (см. ниже рис. 3), устраняет избыточность информации в обучаемом сигнале и реализует выбор оптимальной мощности терм-множеств лингвистических переменных компонент в обучаемом сигнале. Второй ГА оптимизирует базы продукционных правил и реализует выбор оптимальных параметров правых частей продукционных правил типа “...ТО В”. Третий ГА настраивает БЗ. Применение данных ГА позволяет спроектировать, как следствие, оптимальную структуру ННС (вид функций принадлежности и их параметры, количество внутренних слоев и др.), аппроксимирующую ОС с требуемой ошибкой [7].

Рисунок 3 показывает результат применения второго ГА для оптимизации количества продукционных правил при аппроксимации сигнала обучения с заданной ошибкой аппроксимации.

Рисунок 4 демонстрирует результат работы второго ГА в ОБЗ при проектировании законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора, используемых в примере моделирования системы “каретка перемещения – перевернутый маятник” ниже в разд. 4.1.

Объединение методологий стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментари (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 [7, 8]. Данный эффект оформируется функциональной структурой ГА, в которой (по определению) пространство поиска решений фиксировано и задается экспертом, а также выбором функции пригодности,

рассматриваемой 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, оптимальное решение, найденное при помощи технологии мягких вычислений (на основе ГА), соответствует заданной ситуации управления, содержит (в неявном виде) субъективность исходной информации, а при неправильном определении пространства поиска и функции пригодности может быть неадекватным заданной ситуации управления.

Отметим, что решение задачи проектирования САУ для внештатных ситуаций с помощью дополнительных контуров управления восходит к середине 80-х годов прошлого столетия и приводит к появлению избыточности информации в контурах управления [17]. 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 (спинтроники), 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 интеллектуальных вычислений и является одним из возможных решений данных задач. Поэтому для поиска оптимальных решений для подобных ситуаций управления требуется привлечение новых технологий интеллектуальных вычислений, таких, как технологии интеллектуальных квантовых и мягких вычислений [10]. Следует отметить, что технология мягких вычислений уже эффективно применяется в задачах управления квантовыми ОУ [11]. 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 [13, 14] (введенного в начале 80-х годов прошлого столетия) о необходимости применения квантовых вычислений к решению только квантовых задач.

1.2. Технология квантовых вычислений. В квантовой логике технологии интеллектуальных квантовых вычислений и квантовой теории информации не выполняется классический закон дистрибутивности, что отражает новые (необычные) явления типа некоммутативности переменных, неопределенности и невозможности одновременного точного измерения наблюдаемых в квантовой механике. В результате необычные явления для классической физики, такие, как запутанные состояния (entanglement), телепортация, сверхплотное кодирование, при-

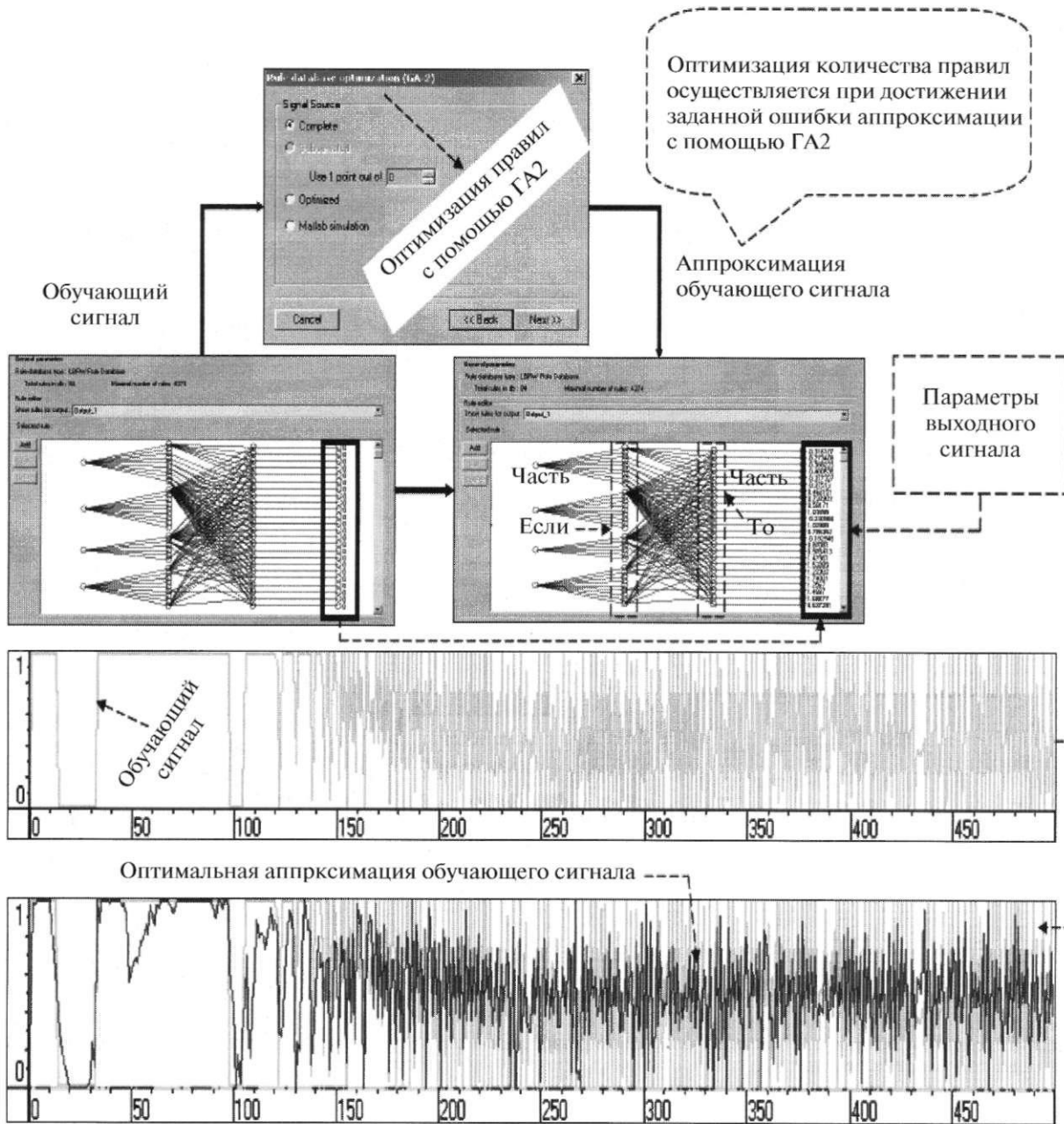


Рис. 3. Пример оптимизации количества продукционных правил при аппроксимации сигнала обучения с заданной ошибкой аппроксимации

водят 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 страте-

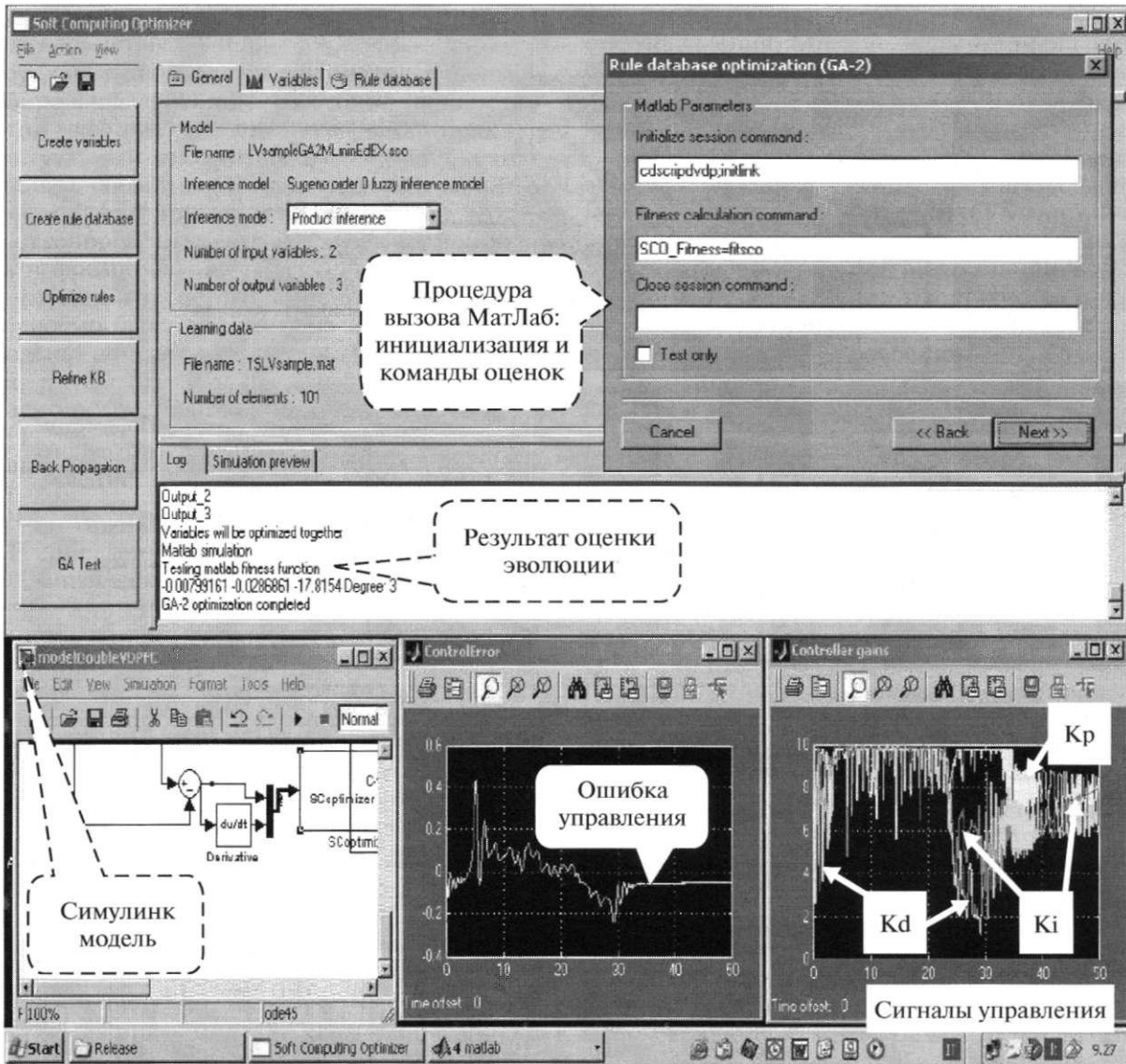


Рис. 4. Пример проектирования законов управления коэффициентами усиления нечеткого ПИД-регулятора с заданной ошибкой аппроксимации ОС

гий выигрыша в данной игровой ситуации, сформировать игрока-победителя ("Паррondo" эффект), использующего квантовый подход к решению задачи [10–14].

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 [12–14].

Рисунок 5 демонстрирует физическое различие в определении вычислительного базиса мягких и квантовых вычислений.

Определение понятия вычислительного базиса в теории квантовых вычислениях кратко приведено в Приложении.

Из рис. 5, 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

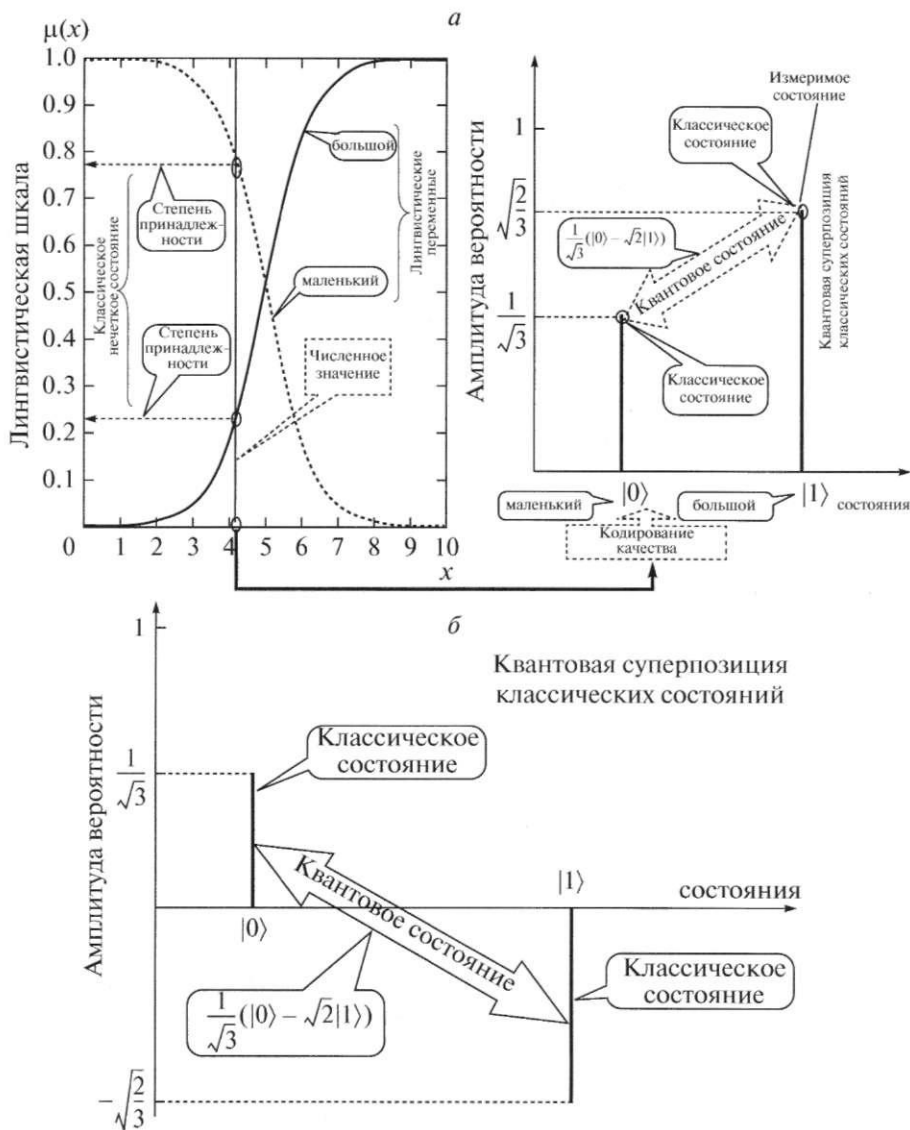


Рис. 5. Физическое различие между нечетким и квантовым состояниями: а – сравнение нечеткого состояния и квантовой суперпозиции; б – состояния квантовой суперпозиции с отрицательной амплитудой вероятности

значения амплитуды вероятности (рис. 5, 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 [12].

Возможность совместного использования вычислительных базисов, проиллюстрированных на рис. 5, приводит к новому виду интеллектуальных

вычислений – квантовым мягким вычислениям [15, 16, 18–21].

Положительные результаты применения классических технологий интеллектуальных вычислений (типа мягких вычислений) совместно с аппаратом квантовых вычислений привело к новому альтернативному подходу – применению технологии квантовых интеллектуальных вычислений в задачах оптимизации процессов управления классическими ОУ (физический аналог применения обратного метода исследования “квантовая система управления – классический ОУ”) [16, 19, 20]. Такой подход существенно расширяет возможности самих интеллектуальных вычислений [11].

2. Постановка задачи и особенности метода решения. В статье рассмотрена следующая задача:

разработать методологию и основу информационной технологии проектирования самоорганизующихся ИСУ. Алгоритмический базис такой технологии составляет квантовый алгоритм управления самоорганизацией БЗ.

Примечание 5. Под процессом самоорганизации робастных БЗ понимается процесс проектирования НР, формирующий на выходе робастные сигналы адаптивного управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств, которые задают 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.

КНВ, разработанный на основе четырех фактов из квантовой теории информации в [10, 16, 18–20], является частным случаем алгоритма самоорганизации [15, 18]. 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. 13 и 18).

Таким образом, с помощью алгоритма управления самоорганизацией БЗ извлекается скрытая дополнительная квантовая информация из классической информации, содержащейся в реакции классических состояний сигналов управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств, спроектированных ранее для конечного числа ситуаций обучения [18]. При этом осуществляется редукция избыточной информации в классических состояниях сигналов управления [17, 20]. Результатом работы алгоритма управления является самоорганизация БЗ, с помощью которой выбираются подходящие коэффициенты усиления ПИД-регулятора. Таким образом, формируется (в реальном времени) робастный сигнал 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 [11, 22–24] “самосборка” и “самоорганизация”

являются разными понятиями. Процесс “самосборка” отличается от “самоорганизации” отсутствием в общем виде в процессе “самосборка” предварительного выбора типа корреляции между невязанными элементами (“строительными блоками”), и процесс осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий [22]. Управление выбором (типа и вида) квантовой корреляции между “строительными блоками” в процессе “самосборка” определяет вид синергетической кооперации в формируемой за счет самоорганизации структуре [24–26]. Поэтому введение управления выбором корреляции позволяет учитывать в формируемых структурах синергетику целенаправленных кооперативных эффектов из ограниченного числа “строительных блоков” и составляет основу процесса самоорганизации [23, 25, 26].

Дополнительные физические аспекты самоорганизации, детали и технические подробности управления самоорганизацией читатель может найти в [15, 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, б, 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 I – формирование конечного множества индивидуальных БЗ в конкретных ситуациях управления с обучением). Использование в разработанном алгоритме *квантовых стратегий управления самоорганизацией* знаний составляет сущность этапа II, на котором на основе 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 [16]. Показано [19, 20], что для гарантированного достижения цели управления законы управления изменением коэффициентов усиления (coefficient gain schedule) нечеткого ПИД-регулятора должны проектироваться на основе дополнительно извлеченных знаний, позволяющих распознавать физические особенности и информацион-

ные 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 информационной технологии эффективно реализуется новый принцип [16] проектирования робастных структур ИСУ: *проектирование простого по структуре и в практической реализации НР с повышенным уровнем интеллектуальности (wise controller) для эффективного управления сложными ОУ.*

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 [22]. 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 служит ее проявление за счет рандомизации, флуктуаций или шумов. Третий фактор – проявление стабилизирующих эффектов гибких структур в контурах обратных связей.

Рассмотрим общие характеристики (биологически воспроизводимой в естественной природе) процессов самоорганизации, которые составляют основу инженерии проектирования (рис. 1, б), а также учитываются при разработке в структурах ИСУ модели квантового алгоритма управления самоорганизацией робастных БЗ (рис. 2, б).

3.1. Биологически воспроизводимый алгоритм самоорганизации. Рисунок 6 иллюстрирует структуру биологически воспроизводимого алгоритма самоорганизации, разработанного в [11, 15, 18] на основе анализа макро- и микромоделей самоорганизации.

А. Для анализа в качестве примеров были выбраны следующие информативно представительные модели из многоуровневой иерархической структуры процессов самоорганизации [11]: 1) поведение толпы людей в тоннеле [23]; 2) в экстремальных условиях (людей, колоний муравьев, при пожаре и т.п.) [23]; 3) движение автомобилей на скоростных трассах [23]; 4) на микроуровне (колонии муравьев при поиске пищи, интеллектуаль-

ные активные агенты с обменом информации, инженерия самоорганизации колоний бактерий) [24–26]; 5) квантовая кооперация насекомых [27], квантовая самоорганизация наноструктур (квантовые кораллы) за счет передачи информации на микроуровне [28] и изменения типа квантовой корреляции [29].

Отметим общие качественные особенности моделей процессов самоорганизации. 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; (iv) многократное (физическое и информационное) взаимодействие между компонентами.

Природная (биологически воспроизводимая) эволюция достижения самоорганизации динамической системы основана на следующих этапах (рис. 6): (i) формирование (задание) множества невзаимосвязанных элементов “строительных блоков” (templating) исходной структуры; (ii) самосборка (self-assembling) новой структуры; (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 невзаимосвязанными элементами, а сам процесс осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий [22–24]. Данные этапы отражены на рис. 6, а.

Рисунок 6, б демонстрирует наличие реальной квантовой самоорганизации в квантовой точечной структуре (quantum dot) [28] за счет наличия пространственно-временной корреляции, содержащейся изначально (закодированной) в структуре “строительных блоков”. Данный экспериментальный факт [29] является физической основой для построения математической модели КА самоорганизации.

Ниже на конкретном примере дано применение приведенных сведений в разработке математической модели и физической интерпретации КА самоорганизации на рис. 6.

Пример 1. Физическая интерпретация и математическая модель операторов КА самоорганизации. Рассмотрим общие свойства и признаки качественного описания квантовых эффектов в самоорганизации эволюционных процессов. Наглядно обсудим эволюционный процесс самоорганизации пешеходов в различных типах коридоров [23, 30].

На рис. 7, а показаны динамика движения пешеходов в ограниченном пространстве с различ-

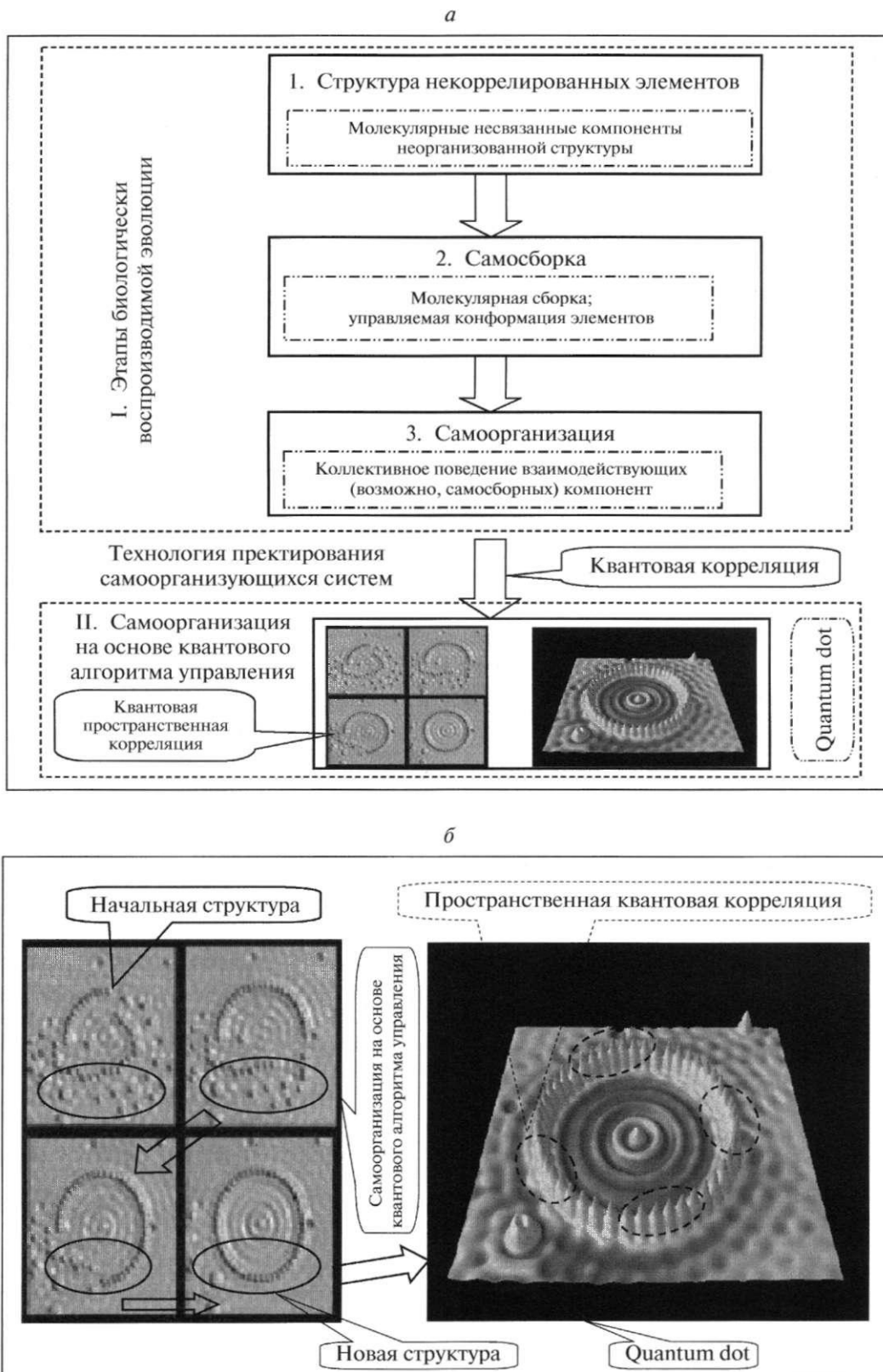


Рис. 6. Структура биологически воспроизводимого алгоритма самоорганизации: *a* – блок-схема КА самоорганизации; *б* – пример пространственно-временной квантовой корреляции при самоорганизации квантовой точечной структуры

ной геометрией и различные типы кооперативно-го поведения людей, возникающие в процессе самоорганизации толпы пешеходов.

Рисунок 7, б демонстрирует феноменологию возникновения различных типов квантовой корреляции (временной и пространственной), влияющей на вид самоорганизации при информационном взаимодействии потоков пешеходов. В частности, представлен процесс самоорганизации (позволяющий избегать столкновений) встречных потоков пешеходов при использовании суперпозиции в виде кооперации пар людей (блок 1 на рис. 7, а). Аналогично на микроуровне записан процесс обмена информацией между отдельными парами пешеходов с запутанными состояниями на встречных потоках пешеходов в геометрически разделенных перегородками пространствах (блок 2 на рис. 7, а). На рис. 7, б также показаны роль квантовой интерференции (блока 3 на рис. 7, а) и временная корреляция (блок 4 на рис. 7, а).

На рис. 8 приведена эволюция квантовых операторов, описывающих динамическое поведение пешеходов в перечисленных на рис. 7, а, б ситуациях.

Так, например, физически квантовая суперпозиция возникает в случае движения пешеходов в туннеле (рис. 8, а). На рис. 8, б показана эволюция квантовой корреляции (запутанных состояний) в зависимости от количества конфликтных столкновений пешеходов в ограниченном пространстве [31]. На рис. 8, в феноменология возникновения квантовой интерференции представлена в случае движения пешеходов по встречным потокам при сложной геометрии разделения потоков (при возникновении паники у пешеходов [30]).

Процесс самоорганизации, таким образом, может рассматриваться как макроскопический процесс, содержащий квантовые (скрытые) эффекты на микроуровне в информационно взаимодействующих компонентах [18, 32]. За счет эволюции локально-взаимодействующих (индивидуальных) суперпозиционных состояний, квантовой корреляции и интерференции осуществляется самоорганизация пешеходов, позволяющая избежать столкновений. Подробное описание физических свойств операторов, приведенных на рис. 8, дано в [18].

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 [32] 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 [11].

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 возрастания энтропии на микроуровне [32–34]; (ii) коммуникация и передача информации на микроуровне (явление “квантовый мираж” в квантовых кораллах, см. рис. 6, б) [28]; (iii) различные типы квантовой корреляции спинов (или запутанных состояний – entanglement), используемых при проектировании различных самоорганизующихся структур (например, в квантовых точечных структурах – quantum dot [29]); (iv) координированное управление за счет извлечения и обмена информацией (например, самоорганизация коллектива роботов [35] за счет информационно-энтропийного обмена между агентами [32] и уровнями организации [33]).

На рис. 6–8 отмечены перечисленные алгоритмические особенности моделей самоорганизации.

3.2. Структура обобщенного квантового алгоритма управления самоорганизации. Рассмотрим предварительно необходимые определения и факты из теории квантовых вычислений, квантовой теории информации и КА [12–14], используемых в структуре КА управления самоорганизации [11].

А. Структура и особенности квантовых алгоритмов. 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. 9 дано качественное сравнение структур КА и алгоритма самоорганизации, позволяющее наглядно представить квантовую природу алгоритма самоорганизации (рис. 6, а).

Прежде всего, отметим некоторые особенности КА. Рисунок 9, а показывает обобщенную структуру КА в теории квантовых вычислений. Согласно теории КА [13, 14], на первом этапе искомые каче-

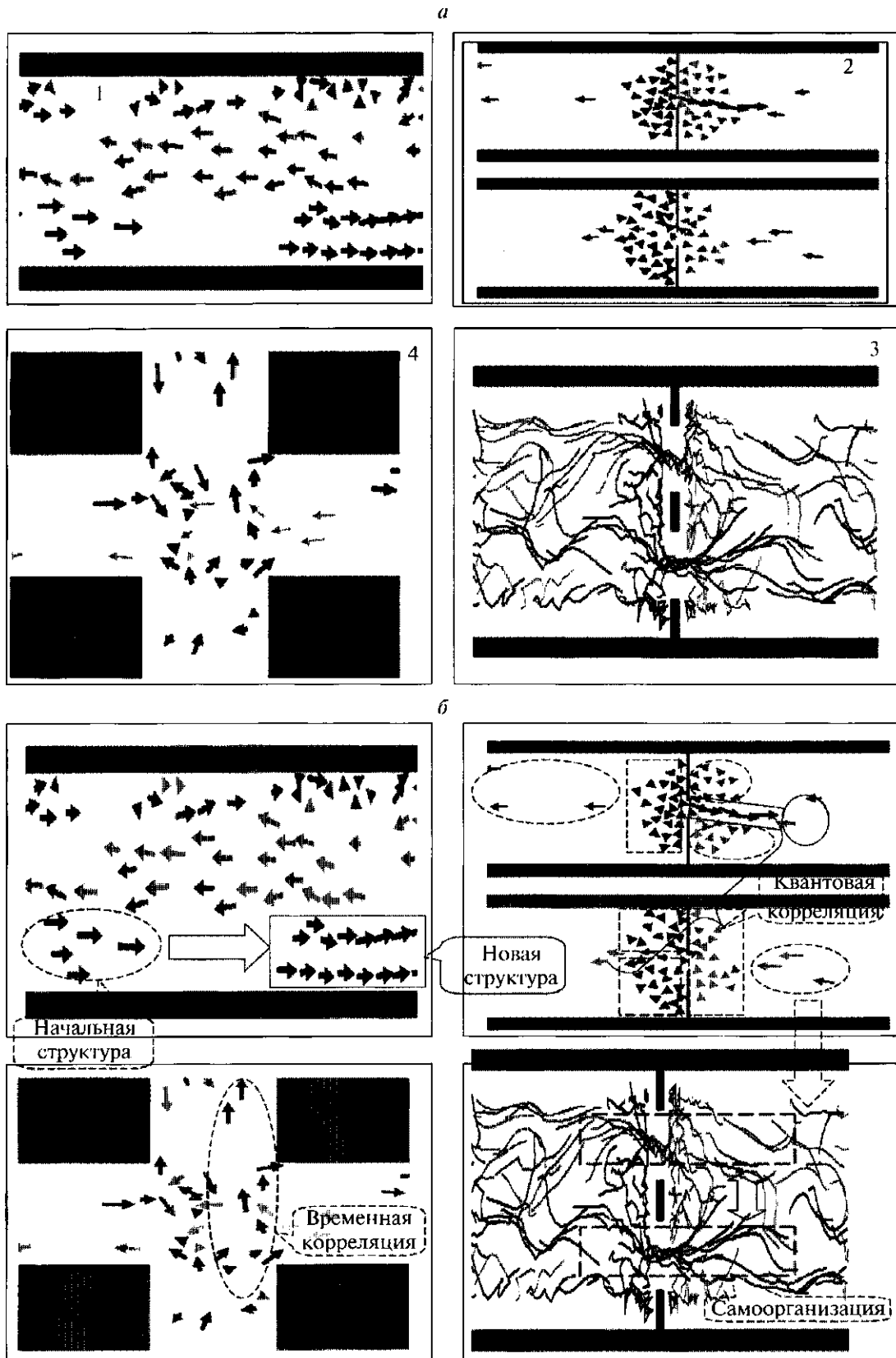


Рис. 7. Динамика движения пешеходов в ограниченном пространстве с различной геометрией и различными типами кооперативного поведения людей: *a* - примеры самоорганизации толпы пешеходов; *б* - феноменология возникновения различных типов квантовой корреляции

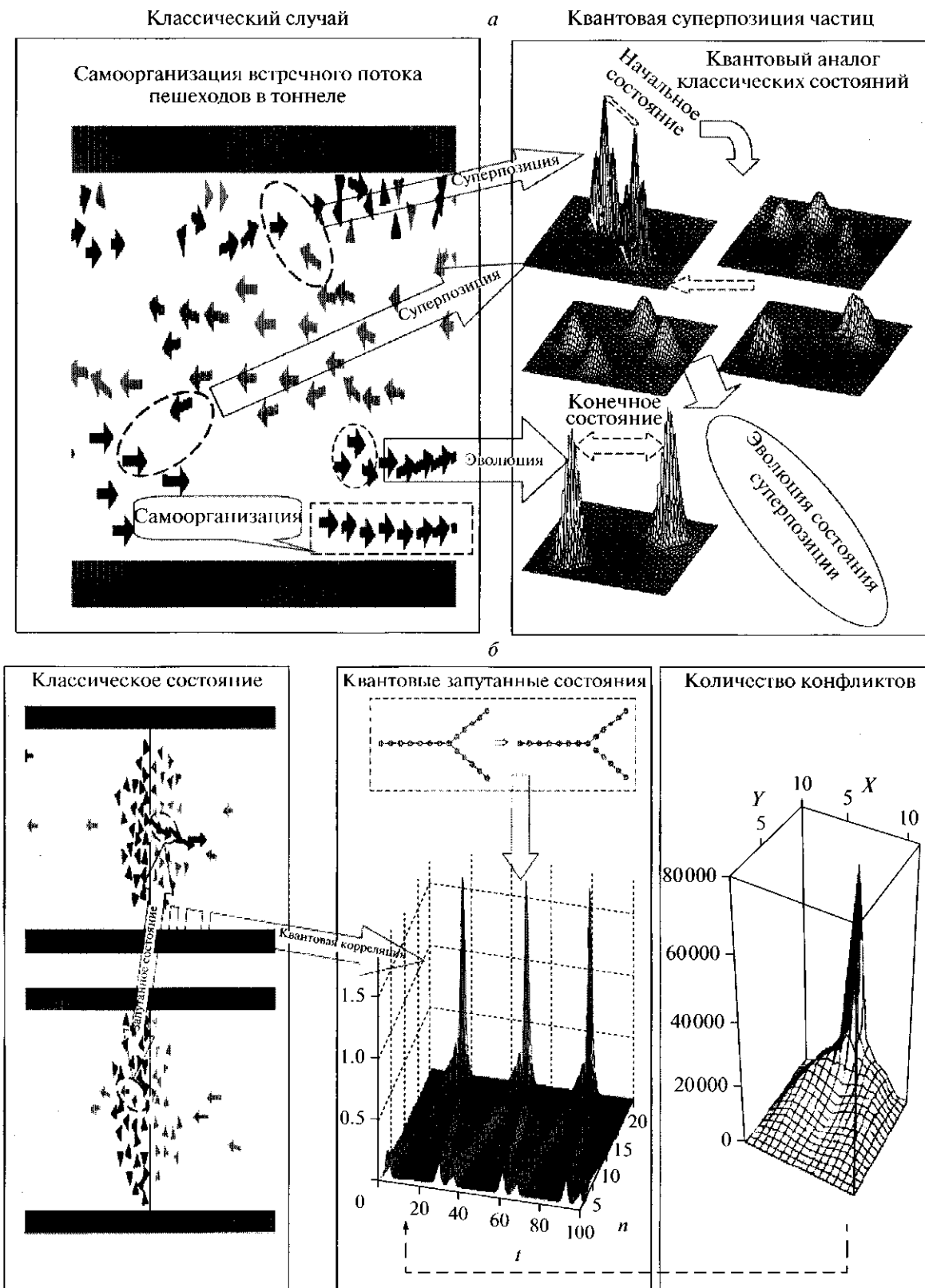


Рис. 8. Эволюция квантовых операторов, описывающих динамическое поведение пешеходов: а – квантовая суперпозиция; б – эволюция квантовой корреляции (запутанных состояний); в – феноменология возникновения квантовой интерференции; КАЯ – квантовая алгоритмическая ячейка

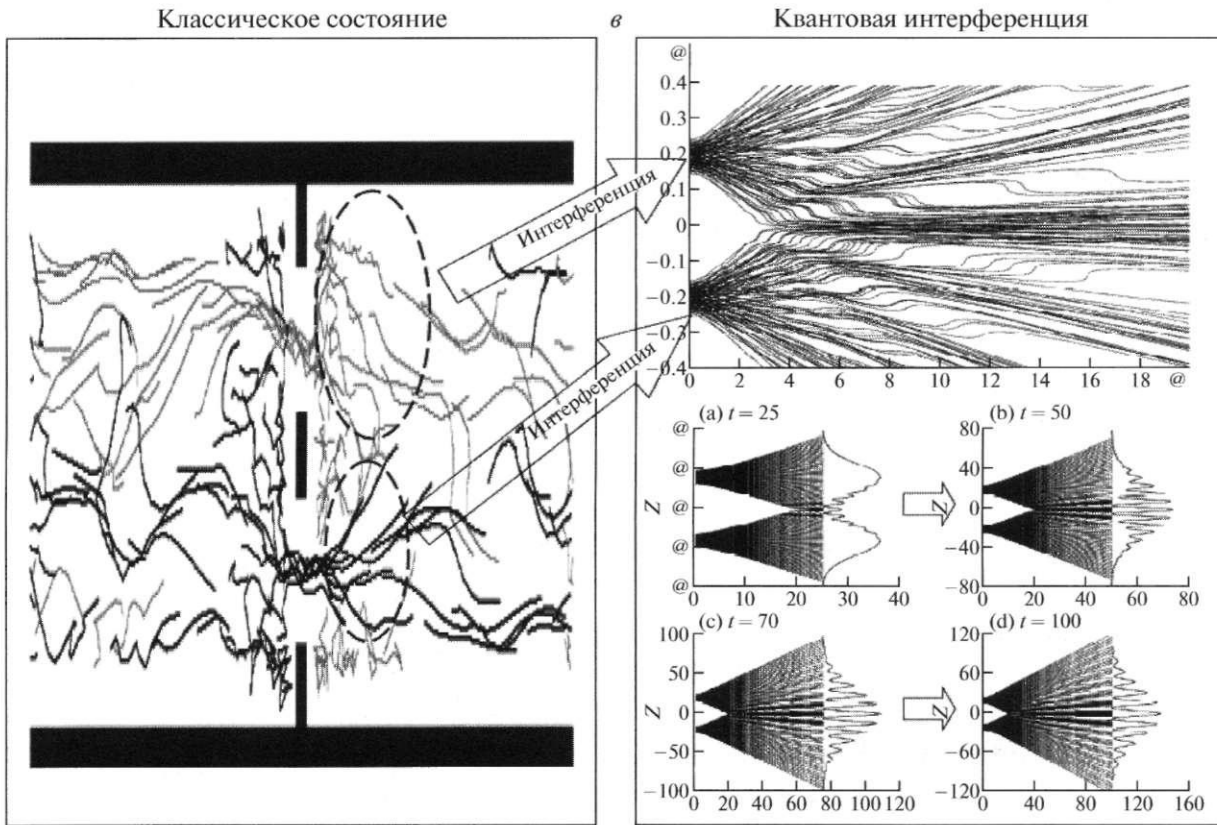


Рис. 8. Окончание

ственные свойства исследуемой функции кодируются в виде волновой функции, а оракул позволяет найти искомые свойства. Поэтому на рис. 9, а обозначен квантовый оператор, осуществляющий данный поиск. Вид оператора оракула определяет тип КА (поисковый или принятия решений).

Проектирование квантовой алгоритмической ячейки (КАЯ) [21] 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 [11, 14] состоит из пяти этапов: 1) приготовление начального (классического или квантового) состояния $|\psi_{in}\rangle$; 2) выполнение преобразования Адамара для начального состояния с целью подготовки состояния суперпозиции; 3) применение запутанного оператора или оператора квантовой корреляции (квантового оракула) к суперпозиционному состоянию; 4) исполнение оператора интерференции; 5) использование оператора измерения для извлечения результатов квантовых вычислений $|\psi_{fin}\rangle$ и $|\psi_{fin}\rangle = H|\psi_{in}\rangle$, где H — гамильтониан системы. Обозначения приведены в Приложении.

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 применяются 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 [12, 13].

Дополнительно к отмеченным ресурсам *квантовая корреляция* рассматривается как новый физический вычислительный ресурс, позволяющий резко увеличить успешный поиск решений алгоритмически неразрешимых проблем [9], ранее не задействованных 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* [10, 36].

Работа квантовых операторов обозначена выносками на рис. 9, а и осуществляется в итеративном режиме в зависимости от типа КА. Описание основных квантовых операторов приведено в



Рис. 9. Структура и основные операторы квантовых алгоритмов: *a* – структура и функциональные связи квантового алгоритма; *b* – структура и функциональные связи квантового алгоритма управления самоорганизацией

Приложении. Рассмотрим теперь особенности КА управления самоорганизацией, представленного на рис. 9, б.

Б. 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 (рис. 9, б): 1) пригото-

вление 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, рассматривается как дополнительный ресурс КА; 6) приме-

нение оператора конструктивной интерференции для извлечения искомого (найденного) решения; 7) эффект квантовых массивных параллельных вычислений; 8) усиление амплитуды вероятности искомого решения и решение классической алгоритмически не решаемой задачи на основе применения эффективных квантовых стратегий принятия решений [11].

Примечание 8. Для более наглядного восприятия результатов сравнения на рис. 9, б работа квантовых операторов (так же, как и на рис. 9, а) и процесс проектирования эффекта самоорганизации проблемно-ориентированными операторами обозначены выносками. Применение квантовых операторов осуществляется в итеративном

режиме в зависимости от типа КА. Перечисленные эффекты достигаются с помощью квантовых операторов, основные свойства которых приведены в Приложении.

Примечание 9. Выбор и определение (типа и вида) квантовой корреляции зависит от класса нелинейности ОУ. В Приложении рассмотрены вопросы вычисления “интеллектуального” состояния сигнала управления по критерию минимума информационной энтропии Шеннона.

В. Особенности математической модели КА управления самоорганизацией знаний. Математическая модель самоорганизации знаний, (рис. 9, б), описывается в виде следующего КА:

$$\begin{aligned}
 & \left\{ \begin{array}{l} \text{Конечное состояние (законы управления)} \\ \text{Самоорганизация робастной структуры БЗ} \end{array} \right\} \\
 = & \left[\begin{array}{l} \underbrace{\text{(Эволюция процесса)}}_{\text{Квантовый случайный поиск}} \cdot \underbrace{\text{(Квантовые вычисления)}}_{\text{Квантовые вычисления}} \cdot \underbrace{\text{Проблемная ориентация}}_{\text{(Тип корреляции)}} \\ \text{Классическая, квантовая, смешанная} \end{array} \right] \cdot \left\{ \begin{array}{l} \text{“Строительные” блоки} \\ \underbrace{\text{Начальное состояние}}_{\text{Био-инспирированные состояния}} \\ \text{(Воспроизводится ОБЗ)} \\ \text{на мягких вычислениях} \end{array} \right\} \quad (3.1)
 \end{aligned}$$

В (3.1) обозначение (\cdot) – применение соответствующего инструментария или операции.

На первом этапе алгоритма (3.1) 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), что является одним из эффективных методов алгоритмизации квантовых моделей описания коллективного поведения частиц (swarm method of collective particle behavior) [18]. При определенных предположениях swarm method имеет вычислительную сложность алгоритма моделирования [11] 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 коэффициентов усиления, траектории которых принадлежат множеству S_1 и S_2 . Согласно (3.1), суперпозиция классических состояний на множестве

$S = S_1 \cap S_2$ образует единое квантовое состояние в виде

$$|\psi_S\rangle = \sum_j \lambda_j |\psi_{S_1}^j\rangle \otimes |\psi_{S_2}^j\rangle, \quad (3.2)$$

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

Рисунок 10 показывает процесс обмена информацией по квантовым каналам связи [37] между частицами на траекториях $A_{ВХ} \in S_1$ и $B_{ВХ} \in S_2$.

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 – эффективный канал, который соединяет две различные части – источник сообщения A и получателя информации B . При этом A поддерживается квантовым регистром A и B соответственно. Квантовый регистр имеет частично упорядоченную память a_1, a_2, \dots . Источник A посылает сообщение B , которое хранится в квантовой памяти a_1, a_2, \dots, a_n , связанной с подсистемой M_A медиато-

ра M ; каждый элемент памяти контактирует с M_A один раз, следуя установленному на рис. 10 порядку (указано стрелой, т.е. первый a_1 , затем a_2 и т.д.). Получатель B , приняв 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. 10, на котором $A_{\text{вх}}, B_{\text{вх}}$ – входные порты устройств, используемые A и B для передачи кубитов при контакте с M . Аналогично $A_{\text{вых}}$ и $B_{\text{вых}}$ – выходные порты, из которых формируются кубиты после контакта с медиатором M .

В [37] показано, что состояние $|v\rangle$ такого квантового канала связи образует единое квантовое состояние с медиатором, а частным следом матрицы плотности $|v\rangle\langle v|$ (совместно с матрицами плотности источника A и получателя B) является суперпозиция (3.2) в виде декомпозиции Шмидта в вычислительном базисе $\{|0\rangle, |1\rangle\}$. При этом в квантовой теории информации [11] по квантовым каналам связи осуществляется передача суперпозиции сигналов (3.2) с сохранением различных видов корреляции между агентами.

В теории квантовых вычислений (см. Приложение) 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

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

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

В результате для (3.2) имеем $U_f|00\dots 0\rangle = |s_f\rangle$, где $|s_f\rangle$ – 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.

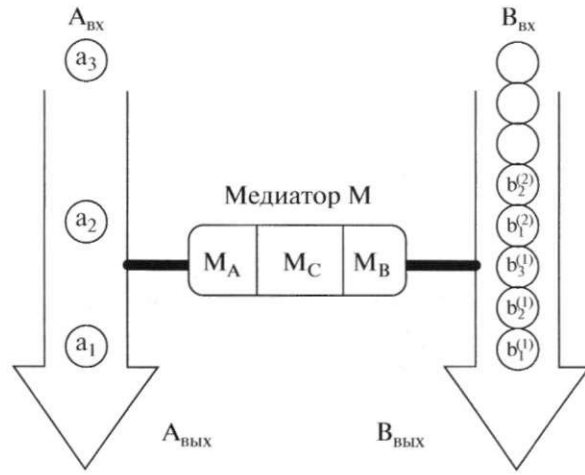


Рис. 10. Процесс обмена информацией по квантовым каналам связи

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 неподвижной ситуации управления не входили в задачу [10] и поэтому не были полностью раскрыты на содержательном физическом уровне.

Рисунок 11 показывает влияние типа квантовой корреляции между спинами на вид наноструктуры квантового “коралла” [29].

Изменение типа квантовой корреляции ($\mathcal{J}S_1S_2$) на ($\mathcal{J}S_1S_2 + \mathcal{J}S_1S_3$) в целевом Гамильтониане H_{target} взаимосвязанной цепочки спинов приводит к существенному изменению вида самоорганизующейся структуры квантового коралла.

Таким образом, существование и влияние типа квантовой корреляции на формирование самоорганизующейся структуры являются экспериментально установленными фактами, которые учитываются в блоке “Тип корреляции” КА (3.1) на основе модели обмена информацией по квантовым каналам связи (рис. 10). По максимуму амплитуды вероятности (минимум информационной энтропии Шеннона) из “интеллектуального” состояния (см. ниже рис. 12, б) извлекается корреляционное состояние с помощью оператора интерференции (в виде оператора идентичности) совместно с процедурой классического измерения (наблюдения). Отметим теперь некоторые особенности физической интерпретации представленного на рис. 6, а и 9, б КА управления самоорганизацией.

Г. Физическая интерпретация КА управления самоорганизацией. С точки зрения процесса биологически воспроизводимой эволюции самоорганизации (рис. 6, а и 9, б) оператор суперпозиции

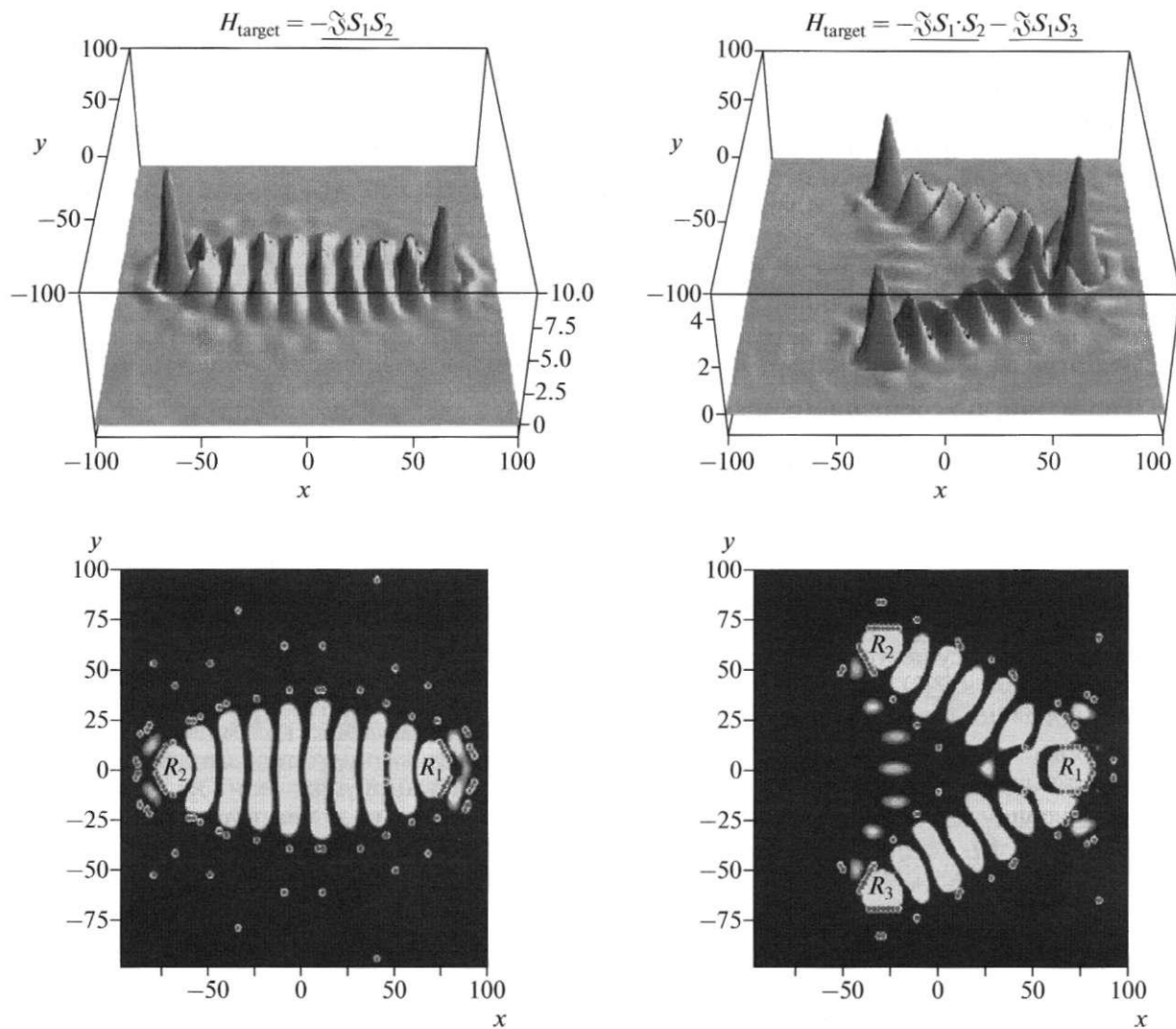


Рис. 11. Пример влияния типа квантовой корреляции между спинами на вид наноструктуры квантового “коралла”

на первом этапе применения КА в (3.1) реализует процедуру формирования множества невязанных элементов структуры в виде “строительных блоков” (*templating*) и осуществляет кодирование искомого решения (см., соответствующую выноску “Кодирование проблемы” на рис. 9, б). При этом формируется процедура взаимодействия элементов микро- и макроуровней с обменом информации активных агентов.

Примечание 10. Поясним, следуя понятиям и определениям теории самоорганизации [22, 23], что активными агентами макроуровня [32, 34] 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 прин-

ципа дополнительности 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 [32–34]. В этом случае тип корреляции определяет 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 знаний.

Конкретная модель КА управления самоорганизацией на основе квантового нечеткого вывода и ее применение в технологии проектирования

робастных БЗ рассмотрена в [18]. В частности, приведен 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.

Д. Цель применения КА управления самоорганизацией. Рисунок 12, а показывает основное термодинамическое соотношение качества робастного интеллектуального управления и критерий оптимизации, используемый в КА самоорганизации [20].

Примечание 11. На рис. 12 приняты следующие обозначения: V – функция Ляпунова; S_{OY}, S_P – производство энтропии в ОУ и регуляторе соответственно;

$$V = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n q_i^2 + \frac{1}{2} S^2; \quad S = S_{OY} - S_P; \quad \dot{q}_i = \varphi(q_i, u, t)$$

– уравнение движения ОУ; S^{vN} – квантовая энтропия фон Неймана; ψ – волновая функция; p_i – вероятность события. Вывод соотношений на рис. 12, а приведен в [2, 8].

Рисунок 12, б иллюстрирует детали вычислительного процесса выбора “интеллектуального” квантового состояния (см. Приложение, пример б) по принципу минимума информационной энтропии Шеннона (максимум амплитуды вероятностей). Как отмечалось в разд. 3.1, в процессе эволюции самоорганизации достигается сбалансированное соотношение между используемым и потенциальными ресурсами эволюции (информационно-термодинамического) поведения динамической системы [11].

Отметим следующие аспекты разработки модели самоорганизации: 1) целью разработанного КА управления самоорганизацией знаний является достижение термодинамического критерия (см. рис. 12, а) оптимального соотношения между устойчивостью, управляемостью и робастностью, используемого в контуре управления в реальном времени [16, 19]; 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 [8, 20].

Е. 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 кванто-

вой 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 (3.1) содержит физически обоснованные и экспериментально установленные квантовые операторы и относится к новому классу поисковых КА, зависящих от выбора типа и вида проблемной ориентации квантовой корреляции.

4. Структура самоорганизующейся ИСУ и декомпозиция задачи векторной оптимизации. Структура самоорганизующейся ИСУ, основанная на моделях ОБЗ [7, 38–40] и КНВ [10, 16, 19, 20], представлена на рис. 13. Выносками показаны основные непредвиденные ситуации управления и функциональные операции, поддерживающие процесс самоорганизации в реальном времени (рис. 13).

Как отмечалось выше в примечании 5, под самоорганизацией робастных БЗ понимается возможность формирования робастных сигналов управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств, формирующих управляющую силу ОУ на основе реакции продукционных правил ранее спроектированных робастных БЗ нечетких ПИД-регуляторов на ошибку управления в условиях неопределенности новой исходной информации или непредвиденных ситуаций управления.

Объединение спроектированных ранее конечного числа БЗ совместно с моделью КНВ в один блок “Квантовый НР” дает возможность формировать в реальном времени робастное управление на выходе ПИД-регулятора 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 [38], что и показано на рис. 13.

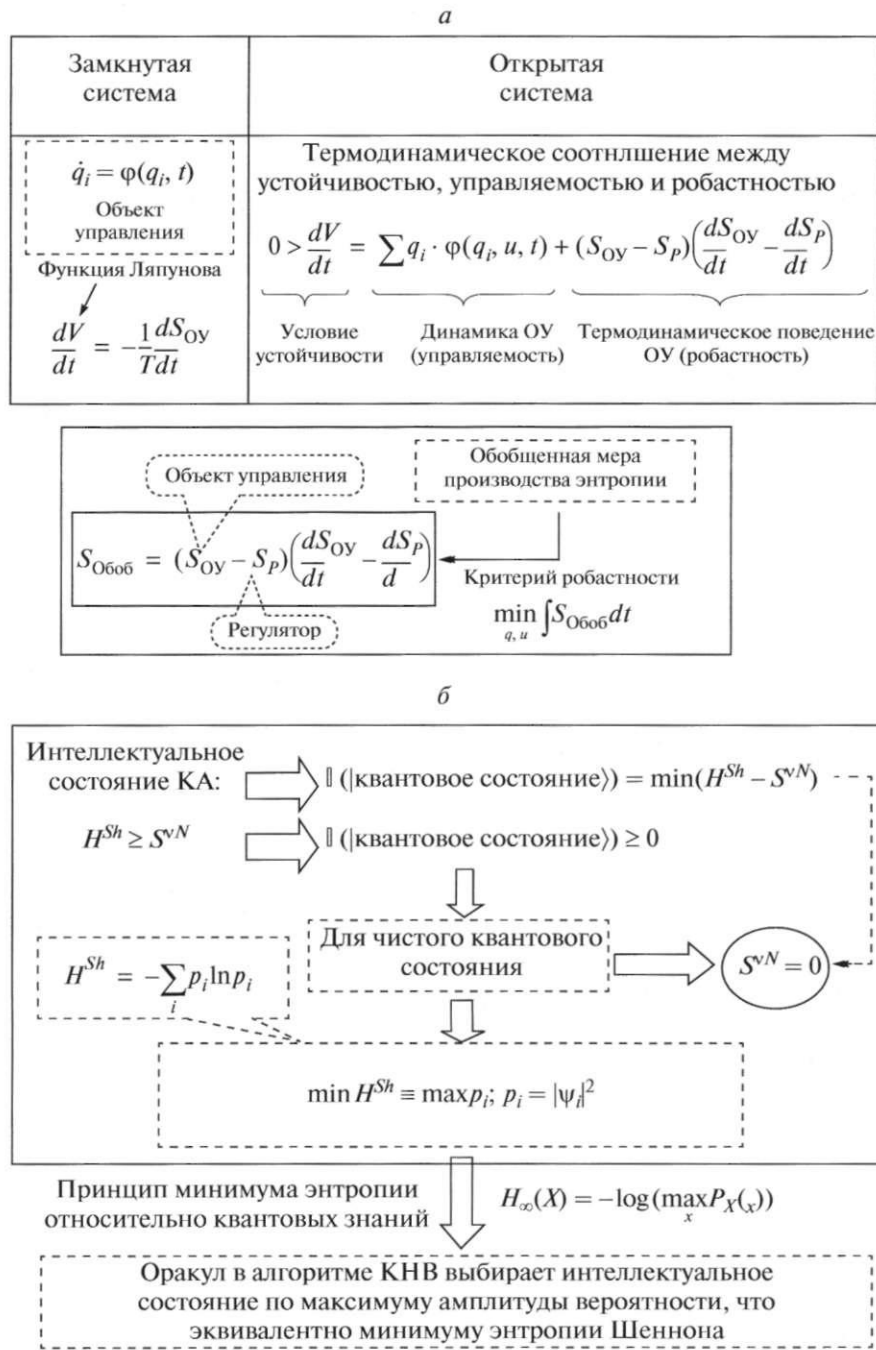


Рис. 12. Проектирование качества робастного управления: а – термодинамический критерий качества робастного управления; б – выбор “интеллектуального” квантового состояния

В этом преимуществе используемого принципа компенсации ошибки управления на основе глобальной отрицательной связи и введенной интеллектуальной обратной связи. Поэтому информации о реакции ОУ на непредвиденную ситуацию управления, содержащейся в новой ошибке управления, достаточно для реализации самоорганизации гибридного нечеткого ПИД-регулятора.

Примечание 12. На рис. 13 сигнал управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора вычисляется в реальном времени. Коррекция сигнала управляющей силы осуществляется через функцию пригодности в ОБЗ через интеллектуальную обратную связь. Данные операции представлены на рис. 13 “пронизывающими” сигналами соответствующих функциональных

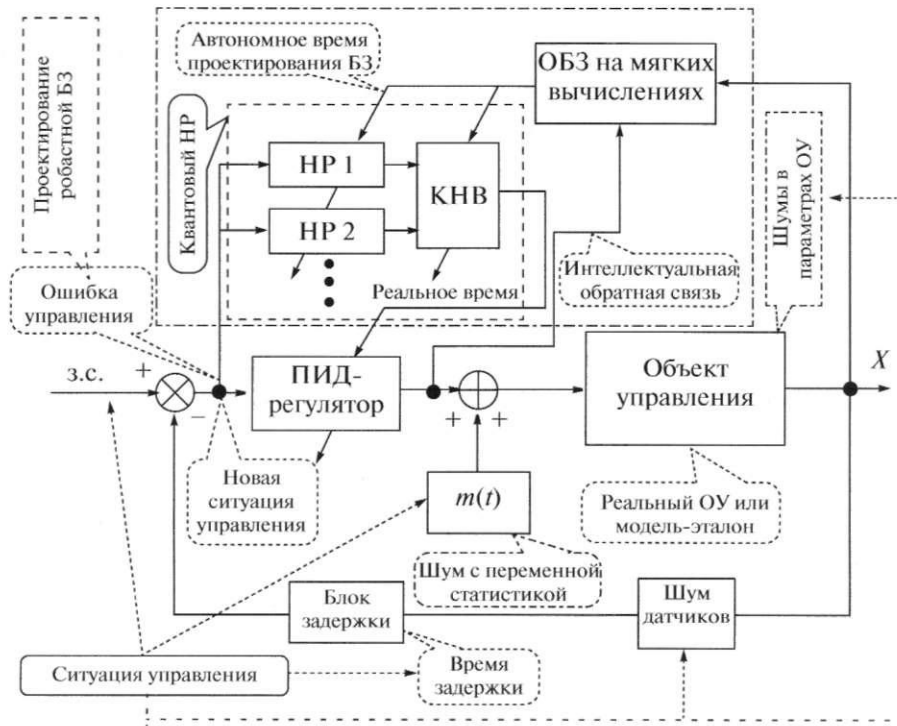


Рис. 13. Структура ИСУ с ОБЗ на мягких и квантовых вычислениях

блоков. На этом же рисунке представлены возможные непредвиденные ситуации управления и их сочетания: шум может задерживаться в канале измерения; блок “Шум датчиков” может быть после времени задержки и т.д. Конкретная ситуация управления и схема САУ определяют конкретное положение блоков.

Напомним, что в информационной технологии (рис. 1, б) проектируется конечное множество БЗ для заданных ситуаций управления (режим обучения без КНВ) в режиме off-line на основе ОБЗ на мягких вычислениях (рис. 2, а). Далее применяется модель КНВ в режиме on-line (рис. 2, б) и реализуется процесс самоорганизации БЗ по реакциям НР на непредвиденную ситуацию управления (см. ниже в разд. 4.2 пример применения КА управления самоорганизацией ИСУ к решению задачи многокритериальной оптимизации).

4.1. Особенности проектирования БЗ на основе ОБЗ. Для более полного восприятия результатов моделирования и проектирования НР отметим некоторые особенности программной поддержки ОБЗ (предварительно описанные в разд. 1.1) и технические характеристики спроектированных на его основе БЗ для НР.

На рис. 14 приведена общая структура моделирования основных блоков НР и структура основных блоков программной поддержки проектирования БЗ.

На этом же рис. 14 показан пример встроенно-

го в ОБЗ блока нечеткого вывода с использованием модели НР Сугено (нулевого порядка) и вид продукционного правила. Структурно ОБЗ имеет программный интерфейс сопряжения с МатЛаб и программно сопряжен с блоком КНВ через встроенный интерфейс (см. подробное описание в [7, 10]).

Рассмотрим кратко процесс проектирования ОС оптимального управления (аппроксимации ОС с заданной ошибкой) как выходного сигнала БЗ в НР на основе структурной схемы, представленной на рис. 2, а. В качестве ситуации обучения примем ситуацию обучения S1 для случайного гауссовского шума (см. рис. 15).

Критерий качества управления задан в виде минимума ошибки управления и рассматривается как функция пригодности ГА с пространством поиска коэффициентов усиления (0, 5). Для проектирования продукционных правил БЗ в заданной ситуации управления (см. рис. 14) задаются:

- 1) три входные переменные $\{e, \dot{e}, \int e dt\}$, 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 $7 \times 9 \times 9 = 567$;

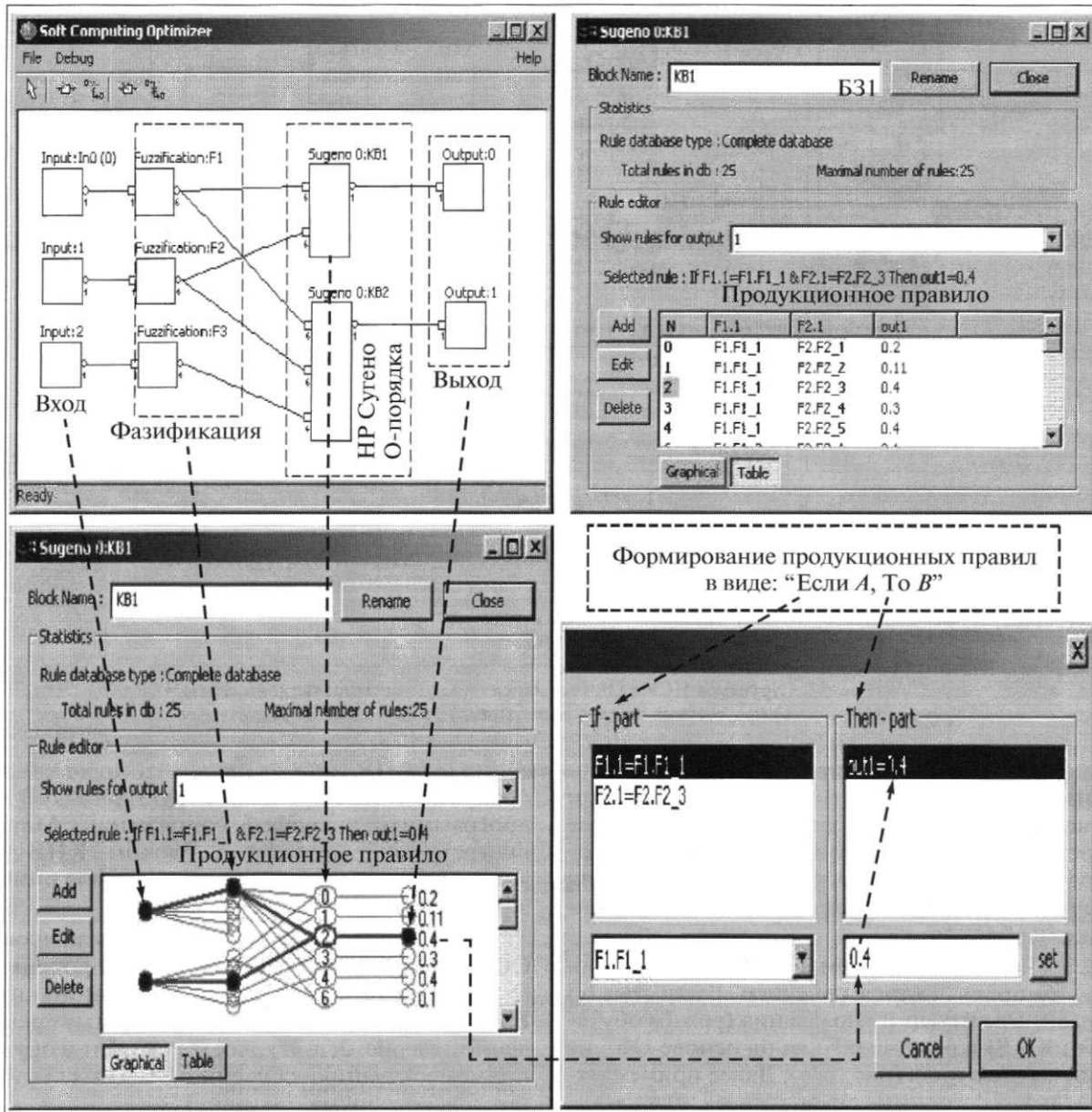


Рис. 14. Структура моделирования НР и программная поддержка проектирования БЗ

3) оптимальное число выбранных для БЗ продукционных правил по критерию частоты запроса из БЗ составило 25; 4) оптимальное число продукционных правил, отобранных ГА2, составило 25.

На рис. 16 представлен пример оптимального вида функций принадлежности для третьей выходной переменной k_I (коэффициент усиления интегральной ошибки) и результат аппроксимации (обозначен темной линией) по схеме на рис. 3, устраняющий избыточность информации в ОС.

Для сравнения приведем результаты работы с ННС типа AFM (Adaptive Fuzzy Module – разработка ST Microelectronics). Число заданных вруч-

ную функций принадлежности по каждой лингвистической переменной составил 5; полное число продукционных нечетких правил – 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 высокую робастность НР по сравнению с ННС (125 правил) и стандартным ПИД-регулятором с постоянными

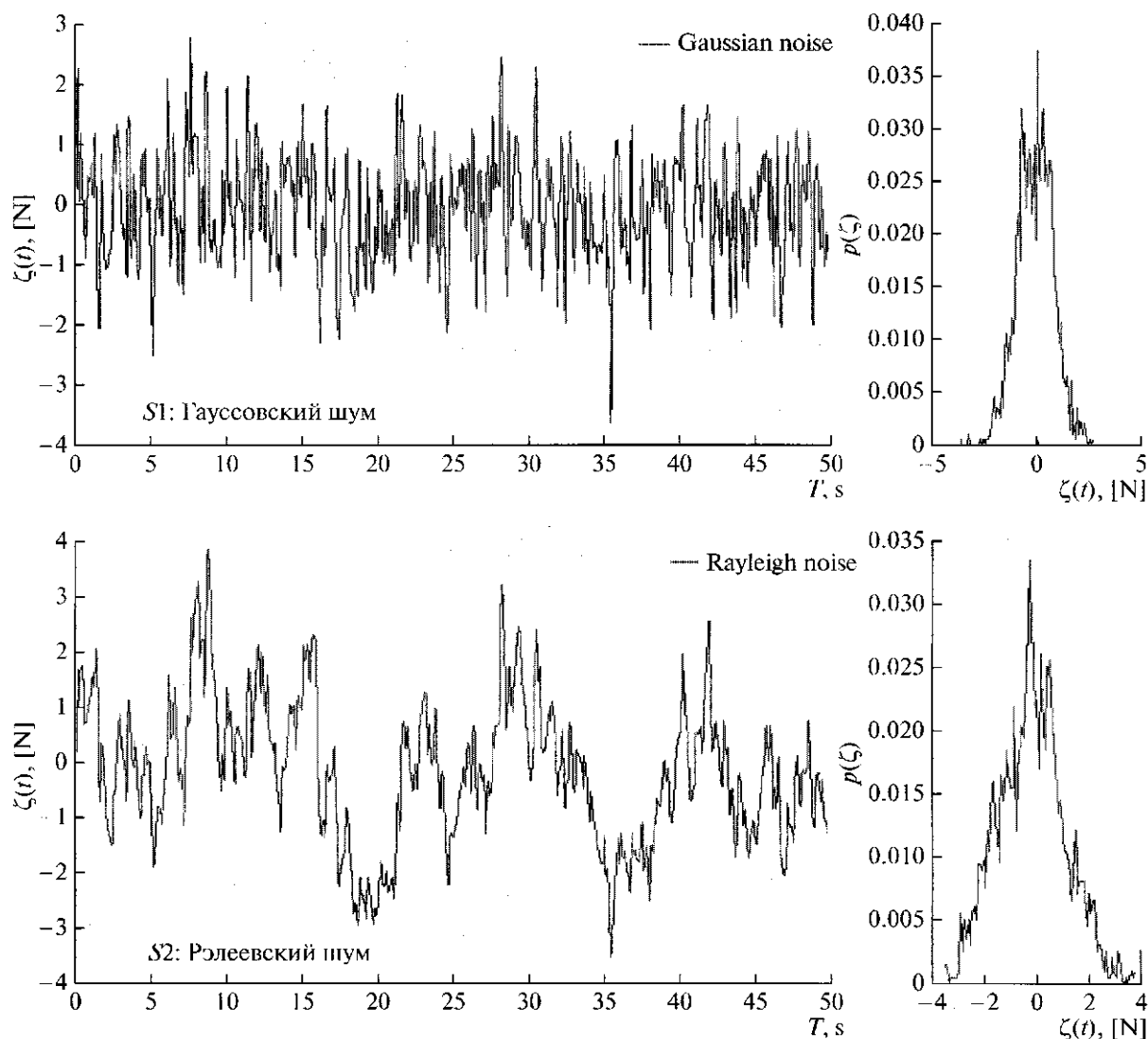


Рис. 15. Вид случайных шумов, используемых в ситуациях обучения (S1, S2)

параметрами (5, 5, 5) [7]. Структурная схема на рис. 13 может эффективно использоваться также для решения трудной задачи, такой, как декомпозиция многокритериальных задач оптимального управления (с векторным критерием качества) в условиях неопределенности ситуаций управления.

4.2. Декомпозиция многокритериальных задач оптимального управления. В этом случае БЗ индивидуального ИР 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 схеме на рис. 13 определяется реакция индивидуальных ИР 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 2. Решение задачи векторной оптимизации на основе декомпозиции БЗ. Рассмотрим динамическую модель системы “движущаяся

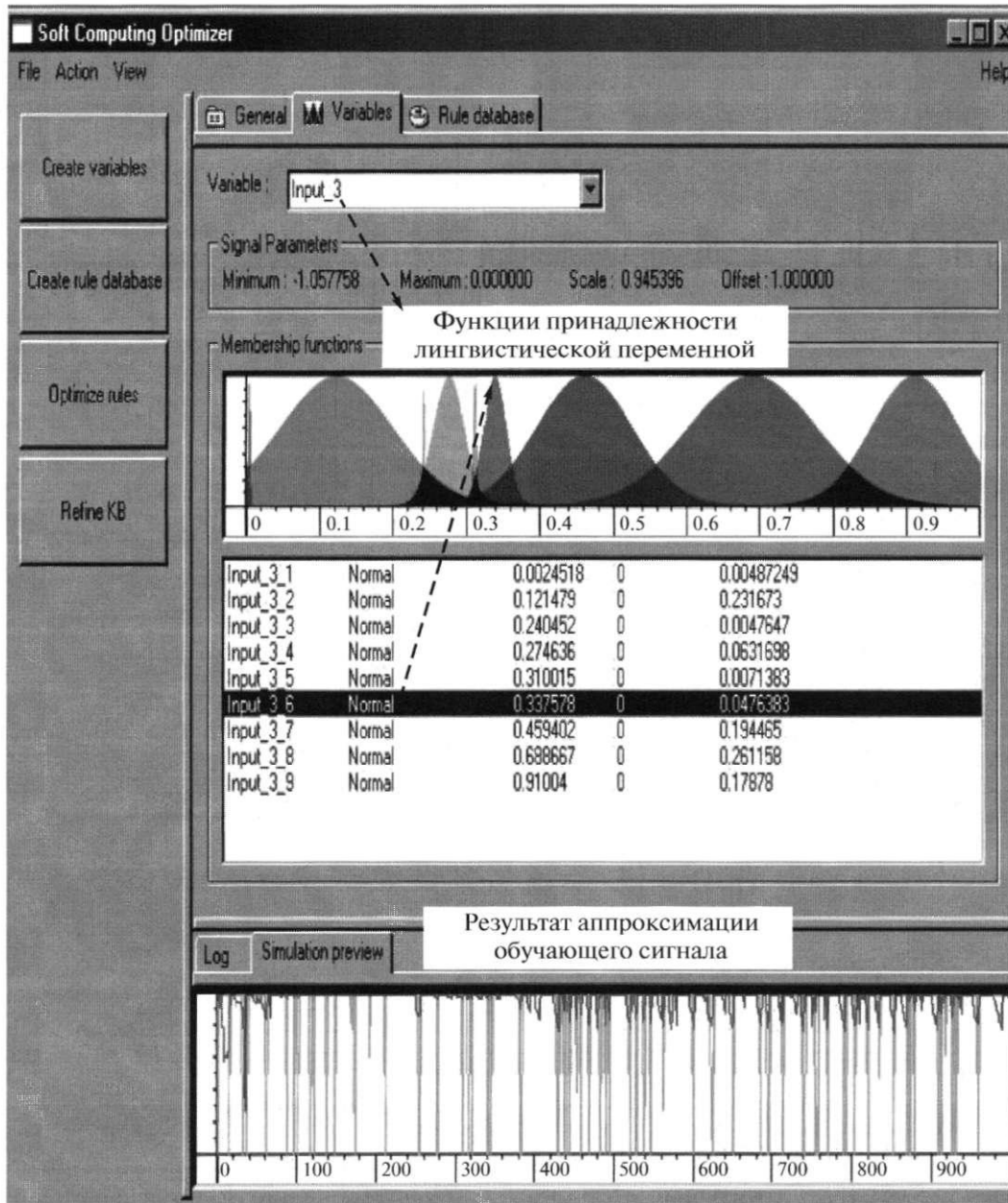


Рис. 16. Пример оптимального вида функций принадлежности для третьей выходной переменной k_I (коэффициент усиления интегральной ошибки)

каретка – перевернутый маятник”, управляемой нечетким ПИД-регулятором по структурной схеме на рис. 13.

Движение динамической системы “перевернутый маятник-каретка перемещения” описывается следующими уравнениями [41]:

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{u + \xi(t) + a_1 \dot{z} + a_2 z - ml \dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m} \right) - k \dot{\theta}}{I \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}, \quad (4.1)$$

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

где θ — угол отклонения маятника, град; z — перемещение каретки, м; g — ускорение свободного падения, 9.8 м/с^2 , m_c — масса каретки, кг, m — масса маятника, кг, l — половина длины маятника, м, $\xi(t)$ — стохастическое воздействие и u — управляющая сила, действующая на каретку, Н.

Уравнения для скорости производства энтропии в ОУ и ПИД-регуляторе имеют следующий вид [11]:

$$\frac{d}{dt}S_\theta = \frac{k\dot{\theta}^2 + \frac{m_l\dot{\theta}^3 \sin 2\theta}{m_c + m}}{l\left(\frac{4}{3} - \frac{m\cos^2\theta}{m_c + m}\right)}; \quad (4.2)$$

$$\frac{d}{dt}S_z = a_1\dot{z}^2; \quad \frac{d}{dt}S_u = k_d\dot{e}^2$$

соответственно.

На рис. 12, а показан закон сложения данных величин (4.2), используемых в структурной схеме рис. 2. 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: $-5.0 < u < 5.0$.

Особенностью задачи управления данным ОУ (4.1) 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.

Цель управления — 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 [41] между обобщенными координатами).

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

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

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 — рэлеевский шум, представленные на рис. 15 (ситуации обучения (S1, S2) соот-

ветственно). Физически первый критерий эквивалентен полной энергии перевернутого маятника, а второй критерий характеризует точность динамического поведения ОУ.

На рис. 17 показаны БЗ1 и БЗ2 с соответствующими активизированными количествами правил 22 и 33 при общем количестве правил 729.

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 с) 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 с) и сигнал шума в датчике измерения положения маятника (коэффициент усиления шума 0.01).

На рис. 18 показан пример работы КНВ по формированию робастного сигнала управления пропорциональным коэффициентом усиления k_p в непредвиденной ситуации управления S3.

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. 18 образуют блок самоорганизации БЗ в непредвиденной ситуации управления.

На рис. 19 представлены динамическое поведение исследуемой системы “движущаяся каретка — перевернутый маятник” и законы управления самоорганизующегося квантового регулятора (QFI), нечетких регуляторов НР1 и НР2.

Примечание 13. На рис. 19 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 с) 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 [7]. На рис. 19 приведена более сложная непредвиденная ситуация управления, когда другие законы управления не работают, но из них можно спроектировать робастный закон управления.

Результаты моделирования (рис. 19) показывают, что динамический ОУ в непредвиденных ситуациях управления (S3, S4) при управлении НР1 (НР2) теряет устойчивость, а при управлении

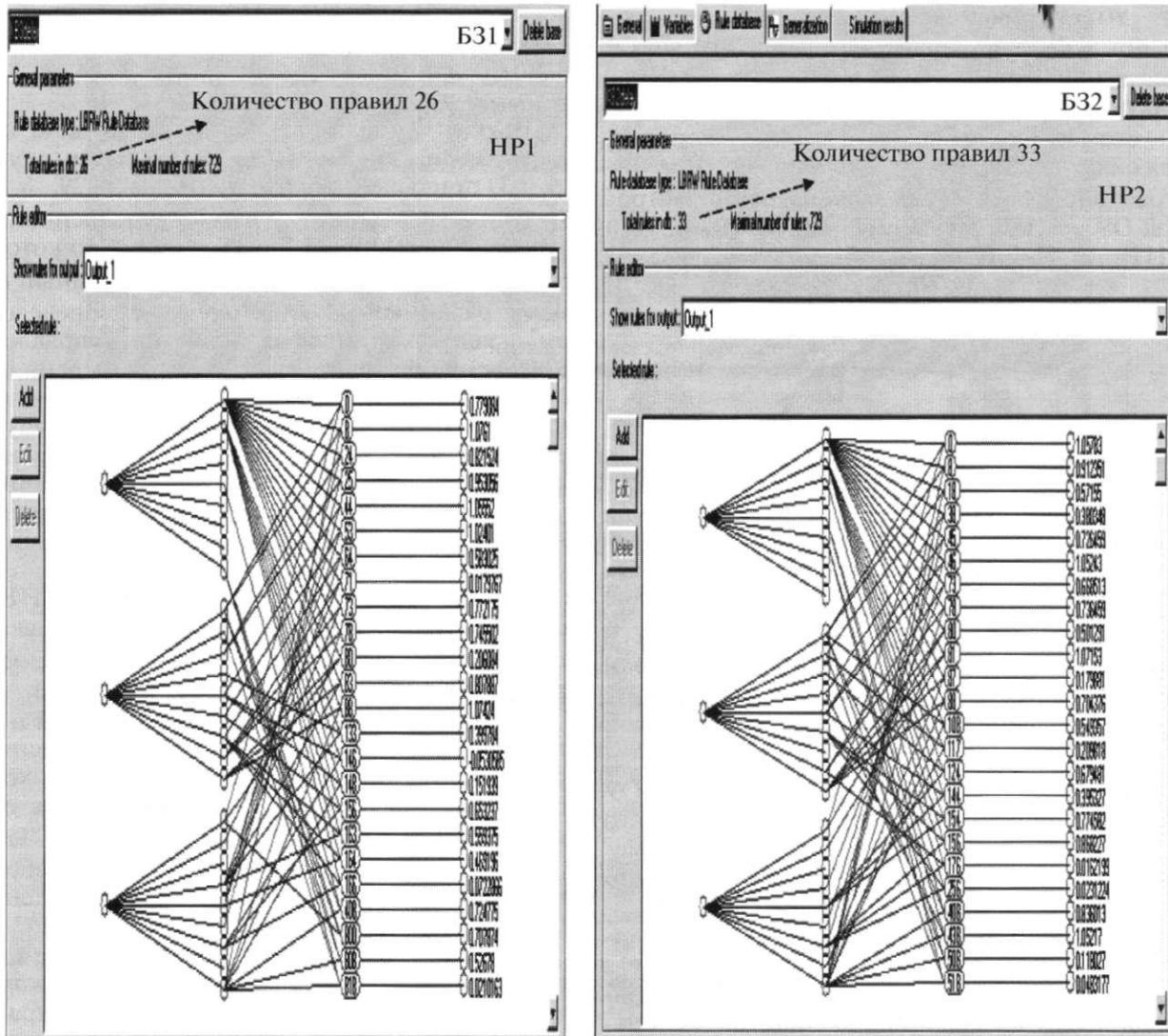


Рис. 17. Вид B31 и B32 с соответствующими активизированными продукционными правилами

квантовым НР (КНВ) система управления обладает свойством робастности и гарантированно достигается цель управления.

На рис. 20 показаны интегральные динамические характеристики ОУ и точности управления.

Согласно результатам моделирования (рис. 20), требуемое качество управления по приведенным критериям в непредвиденных ситуациях управления (S3, S4) при управлении НР1 и НР2 также не достигается, в то время как при управлении квантовым НР (КНВ) система управления обладает требуемым качеством управления. Отсюда следует, что из двух не робастных НР с помощью квантовой самоорганизации знаний можно спроектировать в реальном времени робастный НР, БЗ которого удовлетворяет обоим критериям качества.

Следовательно, декомпозиция решения отмеченной выше задачи многокритериальной опти-

мизации робастной БЗ в непредвиденной ситуации управления на частные решения подзадачи оптимизации физически может быть выполнена 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 про-

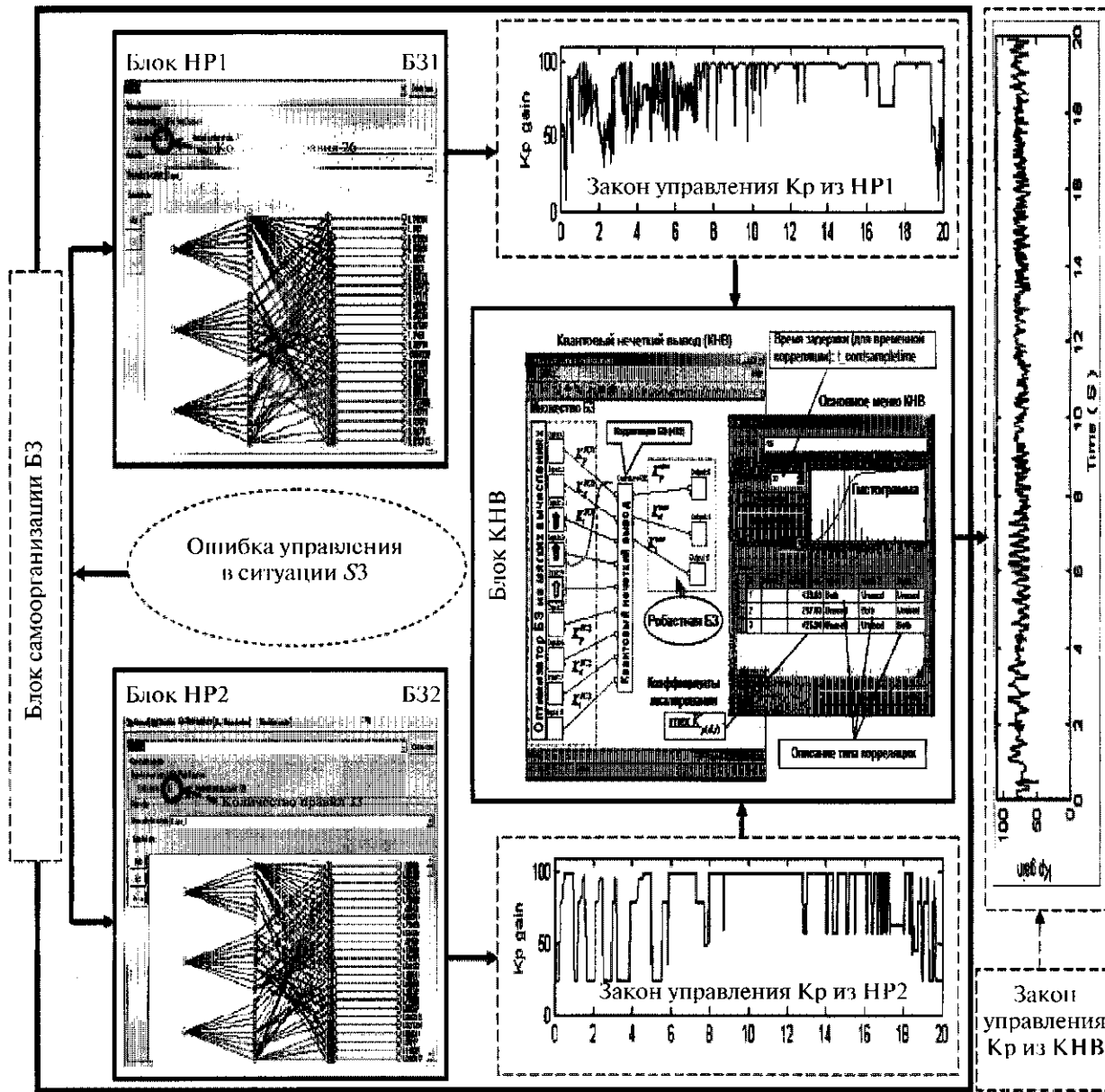


Рис. 18. Пример работы блока самоорганизации Б3 на основе КНВ

стую 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 (рис. 2, б) в задачах многокритериального управления ОУ со слабоформализованной структурой и большой размерностью фазового пространства управляемых параметров, применения экспериментальных данных в виде ОС без построения математической модели ОУ. Приведенные факты дают большое преимущество, которое выражается в виде возможности проектирования в реальном времени процессов управления с требуемой робастностью.

Заключение. Полученные результаты позволяют полнее и глубже понять решение следующей

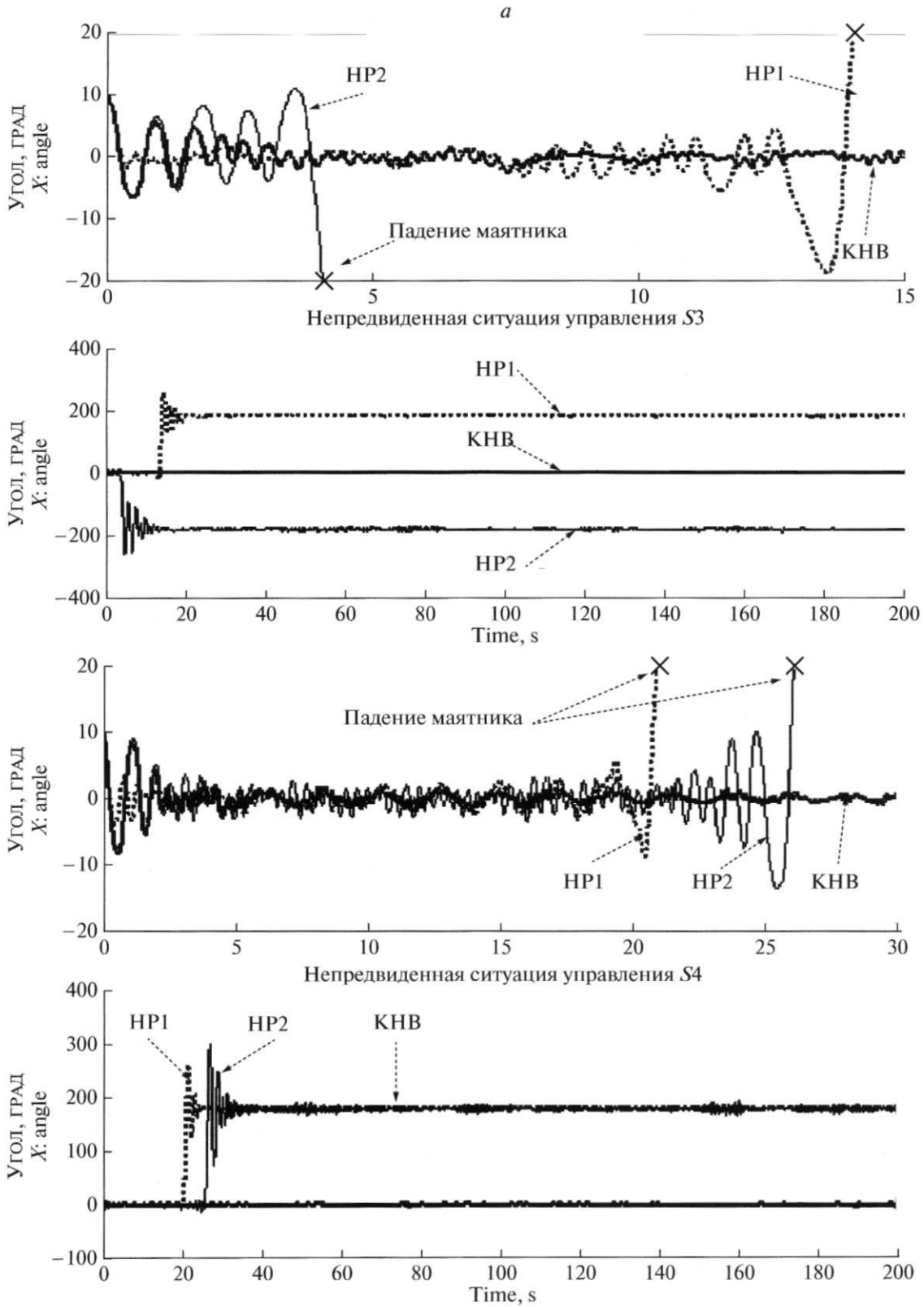


Рис. 19. Динамическое поведение ОУ и законы управления самоорганизующегося квантового регулятора (КНВ), нечетких регуляторов НР1 и НР2: *a* – угол отклонения маятника в ситуациях (S3, S4); *b* – перемещение каретки в ситуациях (S3, S4); *в* – законы управления коэффициентами усиления в ситуациях (S3, S4)

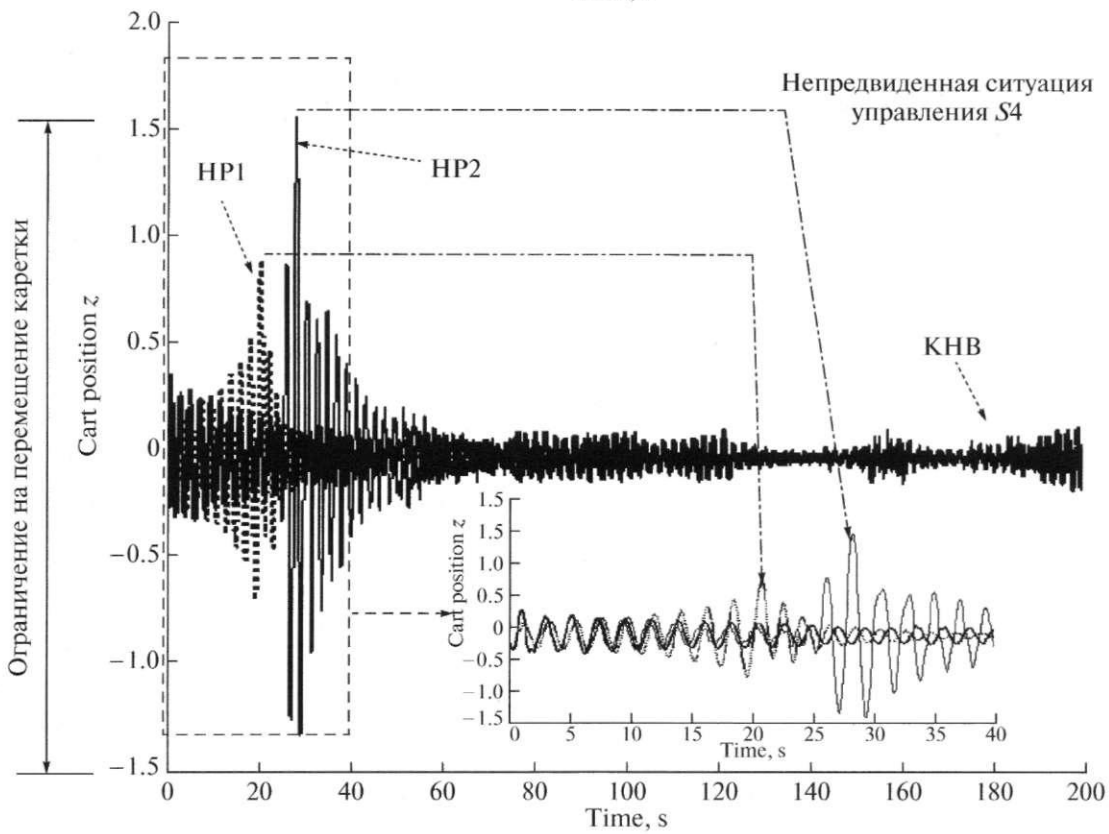
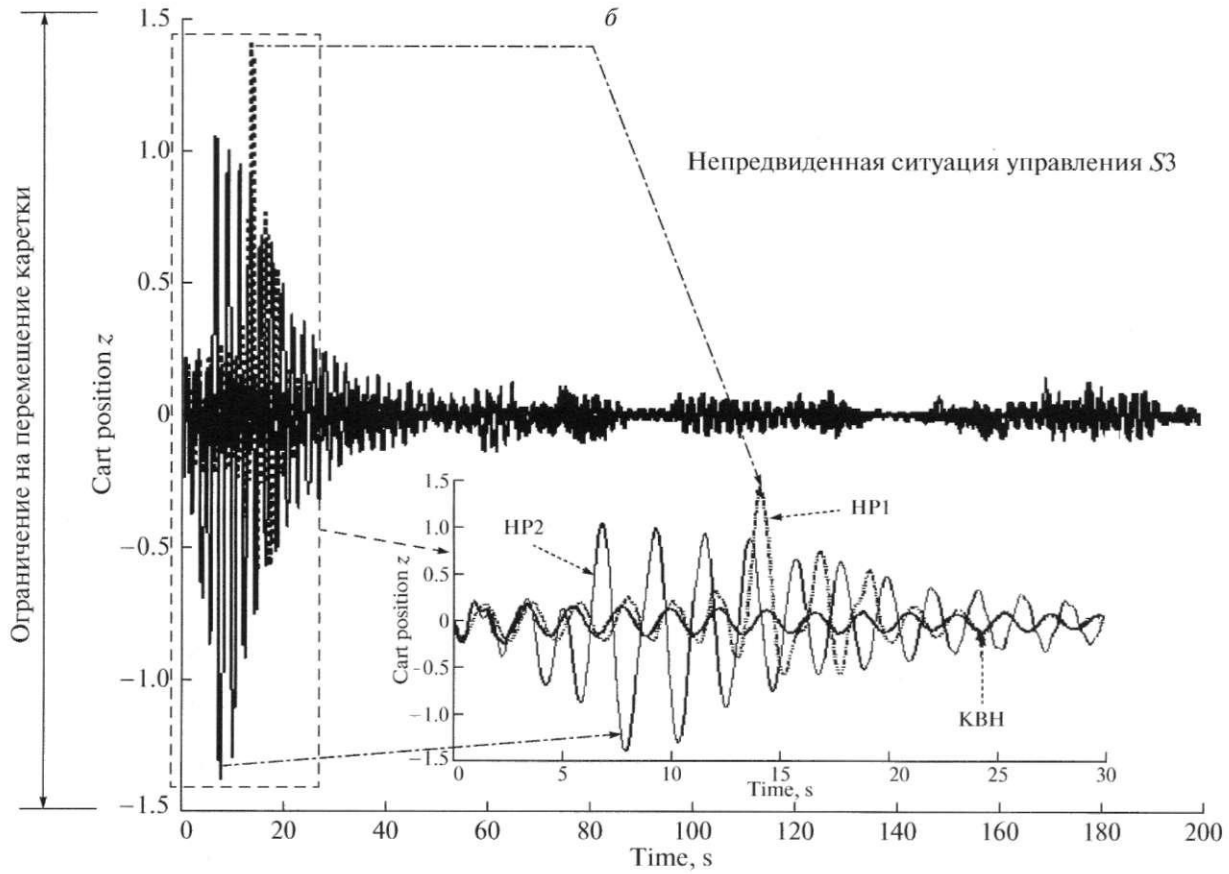


Рис. 19. Продолжение

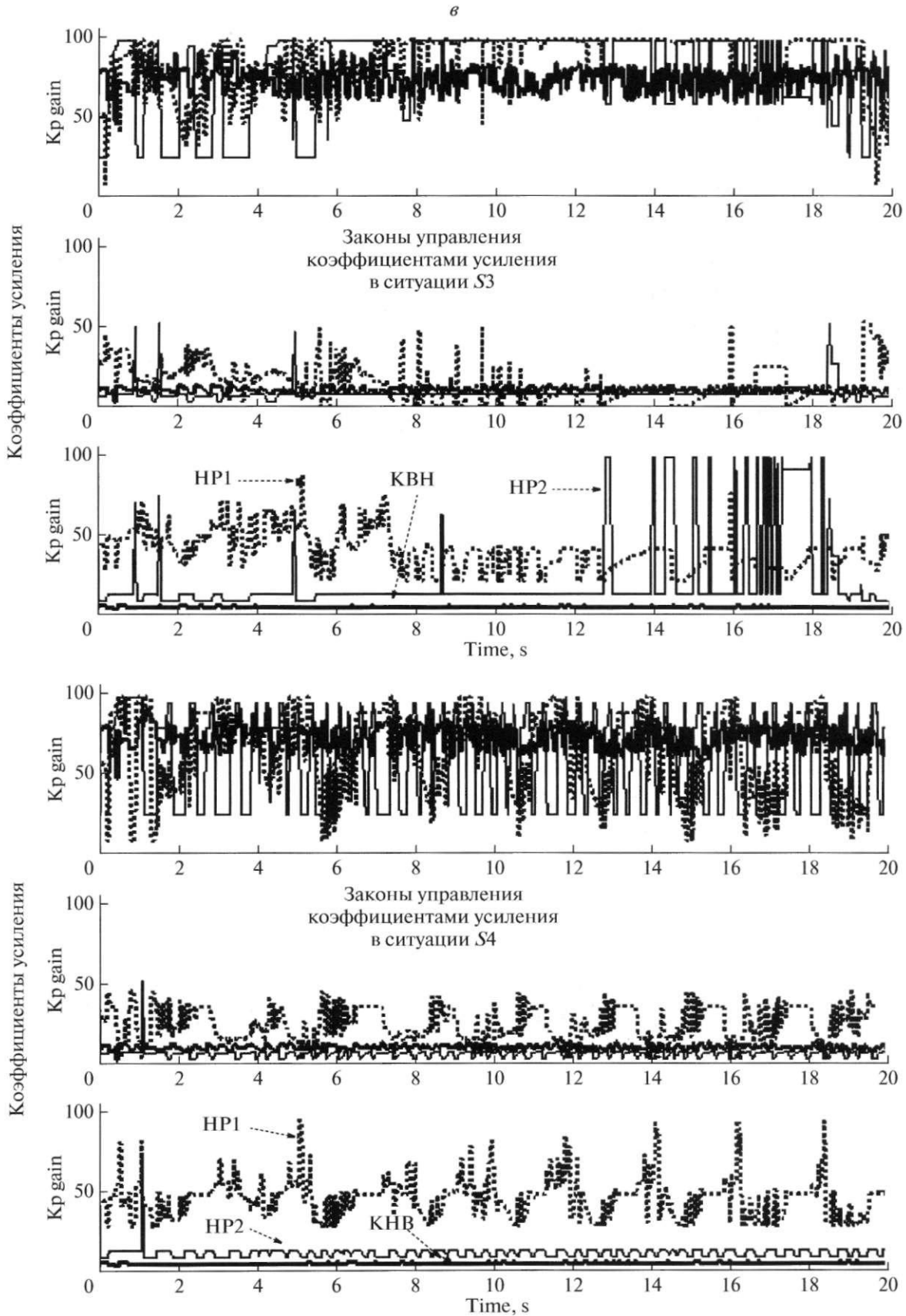


Рис. 19. Окончание

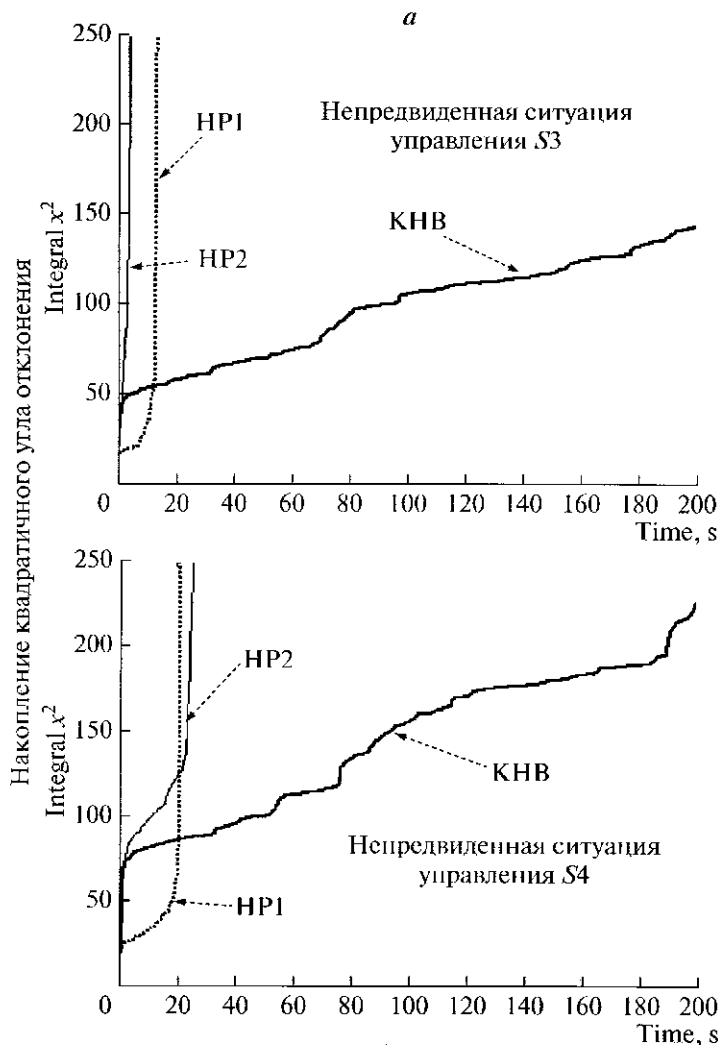


Рис. 20. Интегральные характеристики динамического поведения ОУ и точности управления: *a* – накопление квадратичной величины угла отклонения маятника в ситуациях (S3, S4); *b* – накопление абсолютной величины угла отклонения маятника в ситуациях (S3, S4); *в* – накопление величины квадратичной ошибки управления в ситуациях (S3, S4)

трудной и принципиально важной для теории и систем управления проблемы: определение роли и влияния аналогов квантовых эффектов на повышение робастности проектируемых интеллектуальных процессов управления. Модель КА 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 слабоформализованной структурой и большой размерностью фазового пространства

управляемых параметров. При этом возможно использовать экспериментальные данные в виде ОС без построения математической модели ОУ.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Описаны обозначения и необходимые результаты линейной алгебры, используемые в квантовых вычислениях, и основные операторы КА.

Обозначения и правила квантовых вычислений.

1. По определению если $Z = a + i \cdot b$, то Z^* является комплексно-сопряженным, $Z^* = a - ib$.

2. Вектор $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} c_1 \\ c_2 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix}$ называется кэт-вектором и

$\langle\psi| = [c_1^*, c_2^*, \dots, c_n^*]$ – бра-вектором.

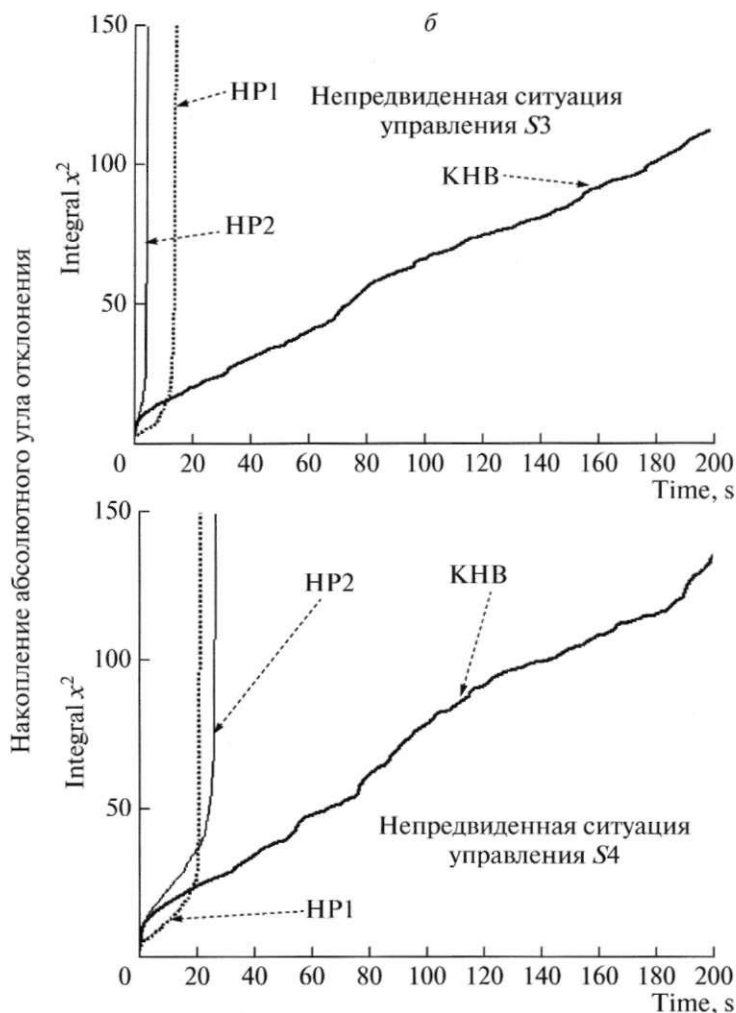


Рис. 20. Продолжение

3. Внутреннее произведение векторов $|\varphi\rangle$ и $|\psi\rangle - \langle\varphi|\psi\rangle$. При этом в квантовых вычислениях эта операция определена на комплексном пространстве \mathbb{C}^n , а не в пространстве \mathbb{R}^n действительных чисел.

Например, если $|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} 2 \\ 6i \end{bmatrix}$, $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix}$, то $\langle\varphi|\psi\rangle = [2, -6i] \begin{bmatrix} 3 \\ 5 \end{bmatrix} = 6 - 30i$.

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

$|\psi\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ ортогональны, т.е. выполняется следующее условие: $[1^*, 1^*] \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = 1 \times 1 + 1 \times (-1) = 0$.

5. Величина $|\varphi\rangle \otimes |\psi\rangle$ определяет тензорное произведение и часто записывается как $|\varphi\rangle|\psi\rangle$. Например,

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

Тензорное произведение является обобщением билинейной операции произведения матриц

$$A \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \times a & A \times b \\ A \times c & A \times d \end{pmatrix}$$

и имеет следующие свойства:

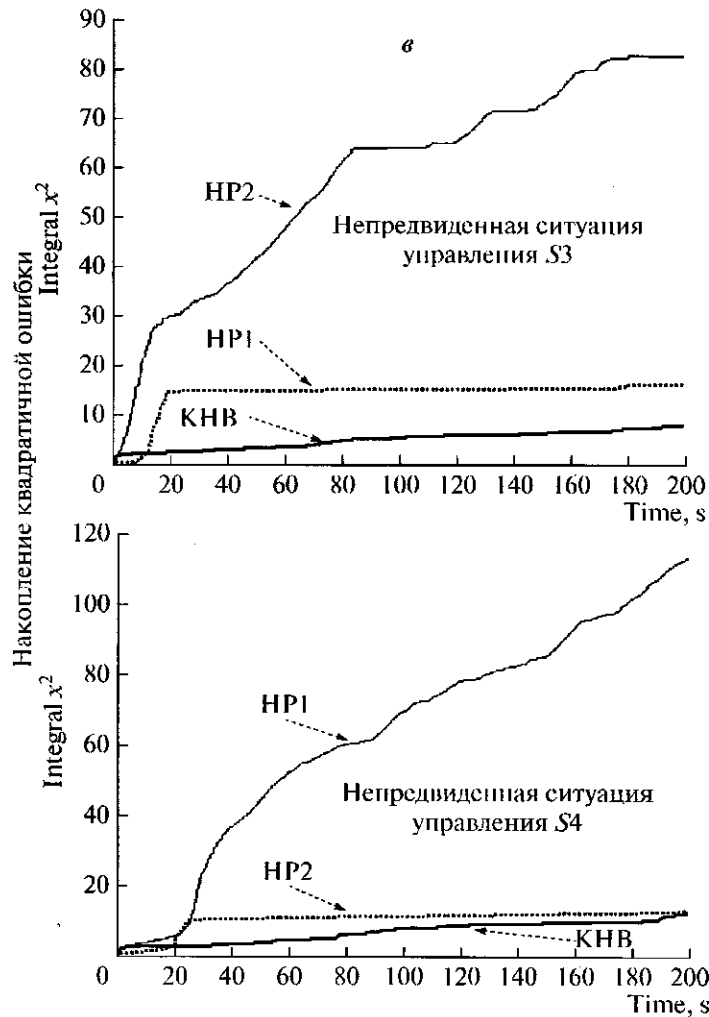


Рис. 20. Окончание

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

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

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

6. A^* – матрица, комплексно сопряженная матрице A . Например, если

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

7. A^T – матрица, транспонированная к матрице A . Например, если

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

8. A^\dagger – Эрмитова сопряженная матрица к матрице A . Отметим, что $A^\dagger = (A^T)^*$. Например, если

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

9. $\|\psi\|$ – норма вектора $|\psi\rangle$: $\|\psi\| = \sqrt{\langle\psi|\psi\rangle}$ и используется для нормирования $|\psi\rangle$.

10. $\langle\phi|A|\psi\rangle$ – внутреннее произведение $|\phi\rangle$ и $A|\psi\rangle$ или внутреннее произведение $A^*|\phi\rangle$ и $|\psi\rangle$.

11. $|\phi\rangle\langle\psi|$ – внешнее произведение $|\phi\rangle$ и $\langle\psi|$. Например,

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

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

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

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

Оператор P проектирует вектор из V в подпространство V_s . Проектор P представляется в виде внешнего произведения. В заданном подпространстве, натянутом на ортонормальные векторы $\{|u_1\rangle, |u_2\rangle, \dots, |u_n\rangle\}$, проектор запишется в виде суммы внешних произведений

$$P = \sum_{i=1}^n |u_i\rangle\langle u_i|.$$

Каждая компонента $|u\rangle\langle u|$ — Эрмитова и сам оператор P Эрмитов: $P^\dagger = P$, $P^2 = P$, а $Q = I - P$ называется ортогональным дополнением. Если использовать проектор $M_m = P$ для измерения, то вероятность результата измерения m определяется как $\text{pr}(m) = \langle \psi | M_m^\dagger M | \psi \rangle = \langle \psi | M | \psi \rangle$

13. Коммутатор и антикоммутатор, устанавливающие отношения между двумя операторами A и B , запишем как

$$[A, B] = AB - BA \text{ и } \{A, B\} = AB + BA$$

соответственно. Операторы A и B коммутируют (антикоммутируют), если $[A, B] = 0$ ($\{A, B\} = 0$).

Для понимания работы основных операторов КА приведем примеры.

Пример 3: Квантовый бит как квантовое состояние. Классический бит может находиться в одном из двух состояний: 0 или 1. Таким образом, его физическое состояние можно представить как $b = a_1|0\rangle + a_2|1\rangle$, которое имеет одну из форм: или $a_1 = 1$ и $a_2 = 0$, тогда $b = |0\rangle$, или $a_1 = 0$ и $a_2 = 1$, тогда $b = |1\rangle$. В противоположность состоянию квантового бита $|\psi\rangle$ задается вектором в двухмерном комплексном 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; $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ 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. Понятие амплитуды 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 двухквантовая бит-система задается как

$$|\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle = |\psi_1\psi_2\rangle = \alpha\gamma|00\rangle + \alpha\delta|01\rangle + \beta\gamma|10\rangle + \beta\delta|11\rangle.$$

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.

Пример 4: 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. Формирование супер-

позиции 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

$$H|x\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{z=0,1} (-1)^{x \cdot z} |z\rangle,$$

где $x \cdot z = x_1 z_1 + \dots + x_n z_n$ для $x = 0$ и $x = 1$.

Таким образом, состояние суперпозиции 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 состояние суперпозиции выступает как первый этап на пути организации *квантового параллелизма*.

Пример 5: Квантовый массивный параллелизм и модели вычислений с квантовым оракулом. Термин “квантовый массивный параллелизм” используется для описания потенциальной мощности квантовых вычислений на основе реализации параллельных вычислений, применяя архитектуру одного квантового компьютера. На интуитивном уровне реализация параллельных вычислений представляется возможной с помощью сети объединенных параллельных компьютеров. Более того, в классических вычислениях увеличение эффективности вычислений (в виде скорости

экспоненциального времени вычислений) требует экспоненциального увлечения числа процессоров или размерности физического пространства. Однако поскольку кубит может представлять суперпозицию двух различных состояний, то в квантовых вычислениях линейное увеличение размерности физического пространства приводит к экспоненциальному эффекту параллелизма вычислений и, следовательно, к экспоненциальной эффективности времени вычислений. Этот эффект известен как “квантовый массивный параллелизм”.

В классической физике, двумерные векторные объекты образуют $2n$ -мерное векторное пространство. Кубит является базисом в квантовых вычислениях и представляется в виде двумерного вектора. Поэтому в отличие от принципов классических вычислений, в силу квантового и параллелизма n кубит образуют 2^n -мерное векторное пространство за счет применения тензорного произведения. Такое экспоненциальное расширение возможного физического пространства по отношению к классическому компьютеру приводит к экспоненциальному увеличению скорости информационных процессах обработки данных в квантовом компьютере. Концепцию применения квантового массивного параллелизма к реализации параллельных вычислений проиллюстрируем на примере двух кубитовой системы. Множество входных кубитов в суперпозиции базисных состояний содержат все возможные в ней закодированные сигналы. Поэтому одноразовое действие преобразования T может быть использовано для порождения множества выходных кубитов в суперпозиции базисных состояний, которые представляют все возможные выходные сигналы. Тогда имеем

$$\begin{pmatrix} \delta_0 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{pmatrix} \otimes T = \begin{pmatrix} \delta_0 \otimes T \\ \delta_1 \otimes T \\ \delta_2 \otimes T \\ \delta_3 \otimes T \end{pmatrix}.$$

Все входы \otimes Одно преобразование = Все выходы

Следовательно, все выходные состояния могут быть вычислены одновременно, а использование вероятности измерения в квантовом компьютере дает результат параллельного вычисления в виде одиночного сигнала подобно вычислению на классическом компьютере. Все выходы получаются с помощью только *одного* преобразования, но только один выходной результат из суперпозиции возможных результатов извлекается при измерении.

Более того, частный извлеченный результат носит вероятностный характер. Таким образом, квантовый алгоритм должен использовать квантовый массивный параллелизм так, чтобы при измерении извлекался проектируемый результат. Этот факт представляет трудную задачу, не решаемую техникой классического программирования.

Известны два подхода к решению данной задачи: 1) измеряются все взаимные свойства выходных сигналов, используется в алгоритме Шора факторизации при измерении периода выходных

сигналов; 2) техника увеличения амплитуд базисных состояний для извлечения искомого решения с высокой вероятностью, применяется в квантовом поисковом алгоритме Гровера.

Пример 6: 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 состояния 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 нем 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:

$$\mathbb{I}(|\text{Квантовое состояние}\rangle) = \min(H^{Sh} - S^{vN}), \quad (\text{П.1})$$

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

$$H^{Sh} \geq S^{vN},$$

$$\text{т.е. } \mathbb{I}(|\text{Квантовое состояние}\rangle) \geq 0. \quad (\text{П.2})$$

Напомним, что квадрат амплитуды вероятностей состояния в квантовой механике равен классической вероятности нахождения квантовой системы в данном состоянии (постулат Бора, 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 вычисление 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ульянов С.В.* Нечеткие модели интеллектуальных систем управления: Теоретические и прикладные аспекты // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1991. № 3. С. 3–29.
2. *Захаров В.Н., Ульянов С.В.* Нечеткие модели интеллектуальных промышленных регуляторов и систем управления. II. Эволюция и принципы проектирования // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1993. № 4. С. 189–205.
3. *Лупина Н.В., Слепченко А.Н., Ульянов С.В. и др.* Гибридная экспертная система с глубинным представлением знаний для проектирования и диагностики биотехнических изделий // Изв. АН СССР. Техн. кибернетика. 1991. № 5. С. 152–175.
4. *Kaynak O., Zadeh L.A., Turksen B.* Computational intelligence. N.Y.: Springer-Verlag, 1998.
5. *Li Y., Ang K.H., Chong G.C.Y.* Patents, software and hardware for PID control: an overview and analysis of the current art // IEEE Control System Magazine. 2006. V. 26. № 1. P. 42–54.
6. *Ulyanov S. S.* Engineering management in the field of high information technology of fuzzy control system's design: Methods of intellectual property protection and business models of intelligent control systems // Proc. of the 7th ICAFS. Siegen, 2006. P. 218–239.
7. *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. 69–97.
8. *Ulyanov S.V.* Self-organized intelligent control system // US patent No 6, 411, 944 B1. 2002.
9. *Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В.* Сложность конечных объектов и информационная теория управления // Итоги науки и техники. Сер. Техн. кибернетика. Т. 11. М.: ВИНТИ АН СССР, 1979. С. 77–147.
10. *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.
11. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S.* Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum optimal control and quantum filtering – Stability, robustness, and self-organization models in nanotechnologies. Milan: Note del Polo (Ricerca), Università degli Studi di Milano, 2008. V. 82; 86.
12. *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. Milan: Note del Polo

- (Ricerca), Universita degli Studia di Milano, 2005. V. 83.
13. *Benenti G., Casati G., Strini G.* Principles of quantum computation and information. Singapore: World Scientific, 2004. V. I; 2007. V. II.
 14. *Nielsen M.A., Chuang I.L.* Quantum computation and quantum information. Cambridge: University Press, 2000.
 15. <http://www.qcoptimizer.com/>
 16. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Hagiwara T.* Design of self-organized intelligent control systems based on quantum fuzzy inference: Intelligent system of systems engineering approach // Proc. IEEE Intern. Conf. SMC'2005. V. 4. Hawaii, 2005. P. 3835–3840.
 17. *Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В.* Информационно-семантические проблемы в процессах управления и организации. М.: Наука, 1977.
 18. *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. of the 7th ICAFS. Siegen, 2006. P. 10–19.
 19. *Litvintseva L.V., Ulyanov S.V., Takahashi K.* Design of self-organized robust wise control systems based on quantum fuzzy inference // Proc. World Congress WAC'2006. V. 5. Budapest, 2006. P. 234–239.
 20. *Ulyanov S.V.* Self-organization of robust intelligent controller using quantum fuzzy inference // Proc. IEEE Intern. Conf. ISKE'2008. Xiamen, 2008.
 21. *Ulyanov S.V.* System and method for control using quantum soft computing // US patent No 6,578,018 B1. 2003.
 22. *Camazine S.* Self-organization in biological systems. Princeton: Univ. Press, 2003.
 23. *Helbing D.* Traffic and related self-driven many-particle systems // Reviews of Modern Physics. 2001. V. 73. № 4. P. 1067–1141.
 24. *Mamei M., Menezes R., Tolksdorf R.* Case studies for self-organization in computer science // J. Systems Architecture. 2006. V. 52. № 8/9. P. 443–460.
 25. *Detrain C., Deneubourg J.-L.* Self-organized structures in a superorganism: do ants “behave” like molecules? // Physics of Life Reviews. 2006. V. 3. № 3.
 26. *Ben-Jacob E., Levine H.* Self-engineering capabilities of bacteria // J. R. Soc. Interface. 2006. V. 3. № 2. P. 197–214.
 27. *Summhammer J.* Quantum cooperation of two insects // LANL E-print arXiv: quant-ph / 0503136v2. 2006. 23p. (доступно <http://xxx.lanl.gov>)
 28. *Eigler D. M., Lutz C. P., Crommie M. F.* Information transport and computation in nanometre-scale structures // Phil. Trans. R. Soc. Lond. 2004. V. A362. P. 1135–1147.
 29. *Correa A.A., Reboredo F.A., Balseiro C.A.* Quantum coral wave-function engineering // Physical Review B. 2005. V. B71. № 3. P.035418.
 30. *Castllano C., Fortunato S., Loreto V.* Statistical physics of social dynamics // Review of Modern Physics. 2009. V. 81. № 2. P. 591–646.
 31. *Yanagisawa D., Kimura A., Tomoeda A. et al.* Introduction of frictional function for pedestrian outflow with an obstacle // LANL E-print arXiv: physics.soc – ph / 0906.0224v1.2009. 16p. (доступно <http://xxx.lanl.gov>).
 32. *Parunak H., Brueckner S.* Entropy and self-organization in multi-agent systems // Proc. 5th Intern. Conf. on Autonomous Agents. Montreal, 2001. P. 124–130.
 33. *Adami Ch.* Information theory in molecular biology // Physics of Life Reviews. 2004. V. 1. № 1. P. 3–22.
 34. *Guerin S., Kunkle D.* Emergence of constraint in self-organizing systems // Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences. 2004. V. 8. № 2.
 35. *Baldassarre G., Trianni V., Dorigo M.* Self-organized coordinated motion in groups of physically connected robots // IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics. 2007. V. B–37. № 1. P. 224–239.
 36. *Dalla Chiara M.L., Guintini R., Greechie R.* Reasoning in quantum theory: Sharp and unsharp quantum logic. Holland: Kluwer Acad. Publ., 2004.
 37. *Giovannetti V., Burgarth D., Mancini S.* Communication through a quantum link // Physical Review. 2009. V. A79. № 1. P. 012311.
 38. *Ульянов С.В.* Робастные интеллектуальные системы управления: Системный и структурный анализ // Нечеткие системы и мягкие вычисления. 2008. № 2.
 39. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V.* Soft computing optimizer of intelligent control system structures // US patent No 7,219,087 B2.2007.
 40. *Ulyanov S.V., Litvintseva L.V.* System for soft computing simulation // US patent No 20060218108 A1. 2006.
 41. *Николаенко Н.А., Ульянов С.В.* Статистическая динамика машиностроительных конструкций. М.: Машиностроение, 1977.