

ТЕХНОЛОГИИ КВАНТОВЫХ И МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ПРОЦЕССАХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ¹

Добрынин Владимир Николаевич¹, Решетников Геннадий Павлович²,
Сахаров Юрий Серафимович³, Ульянов Сергей Викторович⁴

¹Кандидат технических наук, с.н.с., профессор Институт системного анализа и управления;
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: arbatsolo@yandex.ru.

²Кандидат физико-математических наук, с.н.с., доцент Институт системного анализа и управления;
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: Reshetnikov@JINR.ru.

³Доктор технических наук, профессор;
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: persona@uni-dubna.ru.

⁴Доктор физико-математических наук, профессор;
ГОУ ВПО «Международный Университет природы, общества и человека «Дубна»,
Институт системного анализа и управления;
141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.

Рассмотрены основные принципы и фундаментальные физические эффекты квантовых и мягких вычислений. Отмеченные эффекты используются в эффективном решении задач системного анализа и интеллектуального управления слабо формализованными системами, ранее не решаемые эффективно классическими вычислениями.

Ключевые слова: квантовые мягкие вычисления, интеллектуальное управление, информационные технологии.

QUANTUM AND SOFT COMPUTATIONAL INTELLIGENCE TECHNOLOGIES IN INTELLIGENT CONTROL PROCESSES DESIGN¹

Dobrynin Vladimir¹, Reshetnikov Gennadiy²,
Sacharov Yuriy³, Ulyanov Sergey¹

¹ Candidate of Science in Engineering, professor of Institute of system analysis and management;
Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: arbatsolo@yandex.ru.

² Candidate of Science in Physics and Mathematics, associate professor of Institute of system analysis and management;
Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: Reshetnikov@JINR.ru.

¹ Данная статья является журнальным вариантом доклада авторов на 10-й Международной практической конференции «ИТ искусственного интеллекта в экономике - 2009», Дубна, 2009.

³ *Doctor of Science in Engineering, professor;
Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: persona@uni-dubna.ru.*

⁴ *Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;
Dubna International University of Nature, Society, and Man,
Institute of system analysis and management;
141980, Dubna, Moscow reg., Universitetskaya str., 19;
e-mail: ulyanovsv@mail.ru.*

Main principles and fundamental physical effects of quantum and soft computing are described. These effects are used in effective problem's solutions of system analysis and intelligent control of ill-defined systems that early does not effective solved with classical computing methods.

Keywords: quantum soft computing, intelligent control, information technology.

Введение

Определение и термин «интеллектуальные вычисления» введены в середине 90-х прошлого столетия, а такие (слабо известные) исчисления как дробное (fractional calculus), известно более чем 200 лет и нашло только в конце 20 века применение в науке и технике, в частности в проектировании дробных (noninteger order) ПИД-регуляторов. Требования практики и последующее развитие технологии интеллектуальных вычислений нашло свое отражение в новых видах вычислений. В общем виде к таким исчислениям относятся следующие виды: (1) эволюционное программирование; (2) алгоритмы оптимизации типа иммунных алгоритмов; (3) алгоритмы оптимизации на основе поведенческих реакций и обмена информацией активных агентов (самоорганизация целенаправленного и оптимального поведения людей в тоннеле, колоний муравьев, стай птиц и рыб, животных и т.п. – swarm intelligence, active agents optimization); (4) квантовые и генетические алгоритмы для глобальной оптимизации; (5) квантовые нейронные сети обучения и мн. др. [1, 2]. Сами виды и типы интеллектуальных вычислений (алгоритмы и программные инструментари) стали рассматриваться только в конце 20-го столетия как объекты интеллектуальной собственности (ОИС), что позволило малому и среднему бизнесу интенсивно развивать коммерциализацию разработанного интеллектуального продукта [3]. Многообразие подходов и проблемная ориентация разработанного инструментария привели к многочисленным дискуссиям и разнообразию прикладного инструментария. При этом выбор эффективного инструментария исследования для конкретной проблемно-ориентированной области вызывает определенные трудности (или интуитивное противоречие) среди инженеров-исследований и разработчиков новых высоких наукоемких информационных технологий (ИТ).

Прежде чем охарактеризовать представленные в данной статье направления работ, рассмотрим некоторые особенности технологии интеллектуальных вычислений. Мы остановимся, в частности, на наиболее проработанных для практики методах мягких вычислений и перспективных квантовых вычислениях, симбиоз которых породил новое направление – квантовые мягкие вычисления [4]. Такой подход позволяет эффективно решать классические алгоритмически неразрешимые задачи, в частности задачи проектирования робастных интеллектуальных систем управления (ИСУ) в непредвиденных ситуациях управления.

В данной работе представлены конкретные результаты, отражающие развитие теории и приложений мягких и квантовых вычислений, а также исследования, стимулирующие поиск решения отмеченных проблем.

Роль и принципы технологий интеллектуальных вычислений

В традиционных исчислениях по количественному результату численного алгоритма осуществляется соответствующая оценка качественного свойства исследуемого объекта. Логическая оценка качества в общем случае может быть осуществлена только в конце количественных вычислений, а

для алгоритмически неразрешимых численных проблем (в виде мер сложности алгоритма по Колмогорову), часто искомая оценка достигнута быть не может [5]. Основой интеллектуальных вычислений являются не только числовые шкалы (как в традиционных вычислениях), но и качественные характеристики исследуемого объекта. Целью и новой возможностью интеллектуальных вычислений является непосредственное определение качественных характеристик объекта, алгоритмически оперируя последними также как на числовых шкалах. Количественные оценки объекта можно получить из качественных оценок обратным отображением шкал (в общем случае неоднозначно). Мягкие и квантовые вычисления являются примерами таких исчислений.

При этом многие классические задачи могут быть решены с экспоненциальным ускорением или решены алгоритмически неразрешимые задачи. Так, например, для определения качественной характеристики функции (постоянная или балансирующая для четырех аргументов) в традиционном подходе требуется четыре шага численных операций, в тоже время квантовый алгоритм Дейча (опубликованный в 1985г.) определяет данное качество исследуемой функции за один шаг. Алгоритм Шора (1994г.) решает задачу факторизации заданного числа с экспоненциальной скоростью по отношению к лучшему известному алгоритму, а при увеличении длины решает алгоритмически неразрешимую задачу с полиномиальной сложностью. Алгоритм Гровера (1996г.) осуществляет поиск решения в неструктурированных данных с квадратичной скоростью.

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

Отметим, однако, что сам термин «нестандартная» логика уже включает такую ситуацию, а его введение обосновано стремлением решать задачи, не решаемые существующими технологиями вычислений. К таким технологиям интеллектуальных вычислений относятся мягкие и квантовые вычисления, используемые, например, для проектирования робастных баз знаний (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 прошлого столетия при внедрении в инженерную практику идей мягких вычислений на основе теории нечетких множеств и нечетких систем управления (один из авторов сталкивался регулярно с подобными проблемами [6]).

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

Технология мягких вычислений

Обобщение понятия числа за счет введения субъективной качественной шкалы (и отображения в нее в виде лингвистической аппроксимации его количественной характеристики) привело к 30-летней дискуссии в первую очередь с представителями научной школы теории вероятностей. В теории вероятностей понятие функции распределения вероятностей имело четкое и строгое определение, а аксиоматика позволяла ввести физическую интерпретацию случайных процессов. Поскольку в теории случайных процессов по динамическим характеристикам объекта управления и функции распределения вероятностей входного сигнала с помощью уравнения Колмогорова можно определить функцию распределения вероятностей выходного сигнала, то аналогичные операции в теории нечетких систем вызвали определенные логические трудности. К таким трудностям относится, например, корректное определение понятий 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 систем автоматизированного управления (САУ) классическими объектами управления (ОУ) разъяснило и сняло разногласия и трудности в определениях индивидуальных и массовых событий, операции осреднения и извлечения информации и т.п. В результате нечеткие модели логического вывода на фазовом пространстве лингвистических переменных позволили разработать нечеткие ИСУ, эффективно решающие задачи управления в условиях существенной неопределенности исходной информации, слабой формализации описания ОУ, нечеткости целей управления, и т.п.

Одной из основных проблем 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 с требуемой ошибкой и с минимальным количеством продукционных правил в БЗ); (в) применение генетического алгоритма (ГА) в задачах многокритериального управления при наличии дискретных ограничений на параметры объекта управления и др.

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе оптимизатора БЗ (ОБЗ) с применением технологии мягких вычислений. Разработанный интеллектуальный инструментальный позволил проектировать робастные БЗ на основе решения одной из алгоритмически трудно решаемых задач теории искусственного интеллекта – извлечения, обработки и формирования объективных знаний без использования экспертных оценок. В данном оптимизаторе используются три ГА, которые позволяют спроектировать, как следствие, оптимальную структуру ННС (вид функций принадлежности и их параметры, количество внутренних слоев и др.), аппроксимирующей обучающий сигнал с требуемой ошибкой [7].

Объединение методологий стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментарии разработанного ОБЗ позволило повысить уровень робастности проектируемых БЗ и решать сложные задачи формирования объективных знаний. Однако, при существенном изменении или непредвиденных ситуациях управления, спроектированные законы управления, не всегда удовлетворяют условиям робастности. Данный эффект определяется функциональной структурой ГА, в которой (по определению) пространство поиска решений фиксировано и задается экспертом, а также выбором функции пригодности, которая рассматривается как критерий оптимального управления. Таким образом, найденное технологией мягких вычислений (на основе ГА) оптимальное решение соответствует заданной ситуации управления, содержит (в неявном виде) субъективность исходной информации, а при неправильном определении пространства поиска найденное решение может неадекватно соответствовать ситуации управления. Для такого рода ситуации управления требуется привлечение новых технологий интеллектуальных вычислений, такой как технология интеллектуальных квантовых вычислений.

Следует отметить, что технология мягких вычислений уже эффективно применяется в задачах управления квантовыми ОУ. Однако до настоящего времени применение квантовых вычислений для эффективного решения классических алгоритмически неразрешимых задач теории и систем управления сталкивалось с утверждением Ю. Манина и Р. Фейнмана (введенного в начале 80-х прошлого столетия) о необходимости применения квантовых вычислений к решению квантовых задач.

В данной работе показано, что алгоритмически неразрешимые классические задачи можно эффективно решать на классическом компьютере с помощью квантовых стратегий [8, 9].

Технология квантовых вычислений

В *квантовой логике*, как основы технологии интеллектуальных квантовых вычислений и квантовой теории информации, классический закон *дистрибутивности* не выполняется. Данное свойство отражает новые (необычные) явления в квантовой механике типа некоммутативности переменных, неопределенности и невозможности одновременного точного измерения наблюдаемых и др. В результате необычные явления для классической физики, такие как запутанные состояния (entanglement), телепортация, сверхплотное кодирование, квантовая криптография, приводят к «парадоксам» и трудностям физической интерпретации с позиции логики классической физики. Отметим некоторые из необычных физических явлений, включающих в себя синергетический эффект:

- Две подсистемы, каждая из которых находится в смешанном хаотическом состоянии (и с отличной от нуля энтропией), при слиянии в единую систему образуют чистое (с нулевой энтропией) состояние, обладающее высшим уровнем порядка (эффект квантовой самоорганизации). При этом количество информации в целой системе меньше, чем в каждой из её составляющих подсистем, а взаимная энтропия имеет *отрицательное* значение.
- Квантовая суперпозиция, состоящая из двух классических *взаимоисключающих* логических состояний, позволяет образовать одно единое состояние, содержащее, например, логически противоречащие «да» и «нет» (кот Шрёдингера).
- Из двух классических однобитовых состояний с помощью квантовой корреляции (которая выше классической) возможно дополнительно (в зависимости от вида квантовой коммуникации) извлечь более одного бита.
- Квантовые стратегии принятия решений позволяют из двух классических игроков, не имеющих стратегий выигрыша в данной игровой ситуации, сформировать игрока-победителя («Ларрондо» эффект), использующего квантовый подход к решению задачи.

Рассмотрим пример о взаимодействии классических и квантовых операторов, поясняющий наличие квантовых эффектов в классических операторах.

Пример 1: Квантовый эффект в операции $\sqrt{I^{(n)}}$ (корень квадратный из оператора идентичности)

Для заданного $n \geq 1$ корень квадратный из оператора идентичности на пространстве $\otimes^n \mathbb{C}^2$ является линейным оператором $\sqrt{I^{(n)}}$ таким, что для любого элемента $|x_1, \dots, x_n\rangle$ в вычислительном базисе $V^{(n)}$ выполняется следующее условие:

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

Основным свойством оператора $\sqrt{I^{(n)}}$ является следующее:

для каждого $|\psi\rangle \in \otimes^n \mathbb{C}^2$, $\sqrt{I^{(n)}} \left(\sqrt{I^{(n)}} |\psi\rangle \right) = |\psi\rangle$.

Очевидно, что

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

Таким образом, операция $\sqrt{I} = \sqrt{\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}}$ порождает *квантовый оператор Адамара H*, применение которого, например к $|x_1\rangle = |0\rangle$, порождает квантовую суперпозицию $H|0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)$ с действительными значениями амплитуд вероятности.

Следовательно, оператор $\sqrt{I^{(n)}}$, как и в случае $\sqrt{\text{not}^{(n)}}$ (пример Р. Фейнмана), может интерпретироваться как «возможная частная формулировка (tentative partial assertion)», преобразующая точную определенную информацию в максимально неопределенную информацию.

Очевидно, что применение $\sqrt{I^{(n)}}$ приводит состояние системы к максимальному беспорядку, а двойное применение этого оператора возвращает систему в исходное состояние с сохранением начальной информации об исходном состоянии.

Пример 2: Квантовый массивный параллелизм

Термин «квантовый массивный параллелизм» используется для описания потенциальной мощности квантовых вычислений на основе реализации параллельных вычислений, используя архитектуру одного квантового компьютера. На интуитивном уровне реализация параллельных вычислений представляется возможной с помощью использования сети объединенных параллельных компьютеров. Более того, в классических вычислениях увеличение эффективности вычислений (в виде скорости экспоненциального времени вычислений) требует экспоненциального увеличения 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 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 процессов обработки данных в квантовом компьютере. Концепцию применения квантового массивного параллелизма к реализации параллельных вычислений проиллюстрируем на примере двухкубитовой 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:

$$\begin{array}{c}
 \left(\begin{array}{c} \delta_0 \\ \delta_1 \\ \delta_2 \\ \delta_3 \end{array} \right) \otimes T = \left(\begin{array}{c} \delta_0 \otimes T \\ \delta_1 \otimes T \\ \delta_2 \otimes T \\ \delta_3 \otimes T \end{array} \right) \\
 \text{Все входы} \otimes \text{Одно преобразование} = \text{Все выходы}
 \end{array}$$

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 (данный подход используется в алгоритме Шора факторизации при измерении периода выходных сигналов).

2. Техника ускоренного увеличения амплитуд базисных состояний для извлечения искомого решения с высокой вероятностью (данный подход применяется в квантовом поисковом алгоритме Гровера)².

² Оба из отмеченных подходов рассмотрены в данном номере журнала.

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.

Рисунок 1 демонстрирует физическое различие в определении вычислительного базиса мягких и квантовых вычислений. Согласно рис. 1, 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 $\left\{ |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$, связанных принципом квантовой логической дополнителности и являются вычислительным базисом.

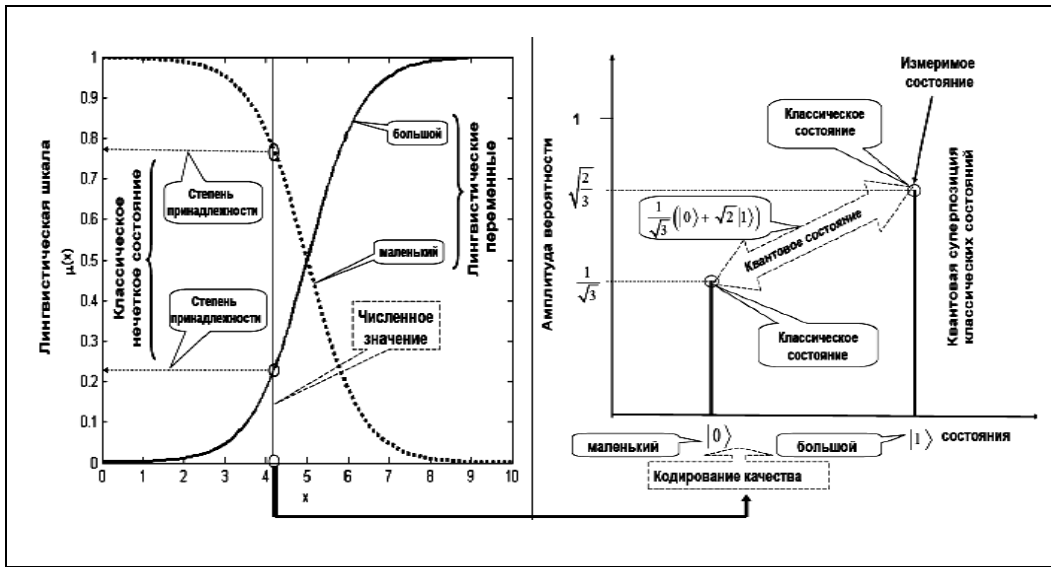


Рис. 1. Физическое различие между нечетким и квантовым состояниями

Совместное использование вычислительных базисов, представленных на рис. 1, приводит к новому виду квантовых мягких вычислений. Основной идеей эффективного использования квантовых вычислений являлось расширение функциональных возможностей (существующих или перспективных) персональных компьютеров с последующей коммерциализацией интеллектуального продукта (в частности, объединение с фирмами-разработчиками в области программно-аппаратной поддержки квантовых мягких вычислений). Возможность реализации на классическом персональном компьютере квантовых алгоритмов открывает большие возможности коммерциализации такого наукоёмкого интеллектуального продукта и расширяет возможности интеллектуального перспективного бизнеса в реализации стандартной программно-аппаратной поддержки [2]. Сложность создания такого наукоёмкого интеллектуального продукта заключалась в существовании в теории квантовых вычислений обобщенного тезиса Черча-Тьюринга.

Данный тезис утверждает, что для решения квантовых проблем классического компьютера последовательного действия (с архитектурой фон Неймана) недостаточно и необходим квантовый компьютер параллельных вычислений (введения принципа суперпозиции, т.е. новых операторов, отсутствующие в классическом компьютере). Более того, лауреат Нобелевской премии Р. Фейнман в 1982г. показал, что при решении квантовых задач сложность решения на классическом компьютере возрастает экспоненциально в зависимости от входных переменных, т.е. практически решить задачу невозможно и необходимо применять квантовый компьютер.

Проблема казалась ясной, и применению классических компьютеров оставлялась классическая область вычислительных задач. Однако разработанный в [4] подход только на первый взгляд приводил к противоречию с обобщенным тезисом Черча-Тьюринга и выводами Р. Фейнмана. Для доказа-

тельства данного утверждения необходимо было провести дополнительный анализ структуры квантового алгоритма и его составляющих операторов с целью разработки нового алгоритма моделирования самих квантовых алгоритмов, позволяющего преодолеть «проклятие размерности памяти» и ускорить моделирование исходного квантового алгоритма на персональном компьютере.

В этом случае обобщенный тезис Черча-Тьюринга не нарушается и создается возможность решать практические задачи ограниченной размерности (зависящей от объема памяти персонального компьютера), не дожидаясь появления квантового компьютера [10].

Эффективное применение разработанного программного продукта моделирования квантовых алгоритмов на классическом компьютере можно найти в [11].

Интеллектуальные вычисления и эффективность наукоемких ИТ

Решение фундаментальных и прикладных проблем технологии мягких и квантовых вычислений существенно влияет на эффективность разработки и применения наукоемких ИТ. Так, например, одним из важных элементов наукоемкой информационной технологии проектирования ИСУ является разработка методологии и соответствующей программно-аппаратной поддержки процессов проверки и оценки уровней робастности спроектированной структуры ИСУ (как меры чувствительности к различным внешним и внутренним, случайным возмущениям как на ОУ, так и в каналах измерений или контурах управления). Актуальность решения данной проблемы многократно диктовалась практическими задачами теории и систем управления и отмечалась неоднократно многими исследователями. Увеличение сложности структур ОУ и трудности прогнозирования непредвиденных (внештатных) ситуаций управления только усиливают актуальность данной проблемы и внимание к поиску её решения.

Рисунок 2 показывает влияние и роль интеллектуальных вычислений на разработку наукоемких ИТ.

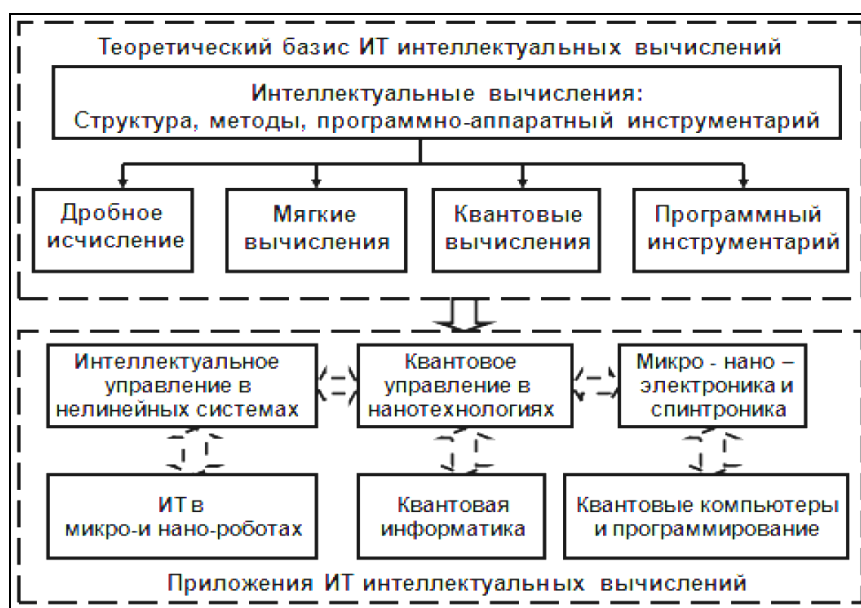


Рис. 2. Роль интеллектуальных вычислений в разработке наукоемких ИТ

Такого рода задачи относятся к т.н. проблеме «System of Systems Engineering», изучающей в общем виде сложные структуры САУ с различными уровнями и шкалами интеграции и/или приоритетным обменом информацией между подсистемами с целью установления глобальных (необходимых и достаточных) условий надёжного автономного функционирования ОУ во внешней среде.

Рассмотрим один из примеров такого подхода к решению задачи глобальной оптимизации системы управления при многокритериальном (векторном) критерии качества управления.

Структурный анализ и проблема проектирования БЗ в ИСУ

Одним из основных назначений и преимуществ эффективного и практического применения ИСУ является возможность гарантированного достижения цели управления с максимальным качеством управления на верхнем уровне и минимальным расходом полезного ресурса системы «*объект управления (ОУ) + регулятор*» на нижнем исполнительском уровне иерархической САУ [6]. Данное определение по своей сути отражает на содержательном уровне назначение целенаправленной деятельности ИСУ в общем случае непредвиденных ситуаций управления. При этом эффективность применения ИСУ с указанной возможностью зависит от уровня интеллектуальности разработанной системы. Важную роль при формировании уровня интеллектуальности САУ играет выбор используемого инструментария и технологии интеллектуальных вычислений для проектирования соответствующей БЗ.

Разработка ИСУ для традиционных САУ с повышенным уровнем робастности, способных поддерживать требуемые уровни точности и надежности в условиях непредвиденных ситуаций управления, стала объектом интеллектуальной собственности [3] и имеет существенное теоретическое, практическое и коммерческое значение. Программно-аппаратная поддержка ИСУ стала товаром при коммерциализации интеллектуального продукта в инженерном менеджменте основанного на знаниях. В частности, важным направлением прикладного применения ИСУ является повышение уровня *робастности* традиционных (П/ПИ/ПД/ПИД)-регуляторов, используемых на нижнем уровне контуров управления.

Традиционный ПИД-регулятор используется более чем в 85% в контурах управления промышленных и непромышленных структур САУ, включая объекты с повышенной социально-экономической ответственностью. Поэтому одной из важных конкретных (теоретических и практических) проблем в создании ИСУ является разработка методов и алгоритмов повышения надежности и качества управления исполнительского (нижнего) уровня САУ, основанного на традиционном ПИД-регуляторе.

При этом выполняется принцип «*не разрушения исполнительского уровня*», что приводит к эффективному использованию существующих отлаженных промышленных технологических процессов. Использование нечетких регуляторов (НР) совместно с традиционным ПИД-регулятором привело к созданию гибридных ИСУ с различными уровнями интеллектуальности в зависимости от полноты и корректности спроектированной БЗ [7].

Одной из трудностей разработки ИСУ для непредвиденных ситуаций управления является решение проблемы проектирования соответствующей БЗ, использующей объективные знания о поведении ОУ и нечетких ПИД-регуляторов. Решение данной задачи существенно зависит от наличия возможности разработки алгоритмически разрешимой, физически/математически корректной модели [5] и практической реализации процесса извлечения, обработки и формирования объективных знаний без участия эксперта [6].

Введение физических и информационных ограничений в формализованное описание модели ОУ [1] существенно влияет на качество формируемой БЗ в ИСУ, а исключение этих ограничений из описания моделей ОУ приводит к потере робастности проектируемых законов управления соответственно. 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 производственных правилах БЗ реальные физические и информационные ограничения.

Рисунок 3(а) показывает типовую структуру ИСУ и описывает рассматриваемую в данной статье проблему проектирования объективной БЗ. Рисунок 3(б) представляет структурную схему ИТ и этапы проектирования объективной БЗ для робастных ИСУ, основанных на новых видах интеллектуальных вычислений [6, 7].

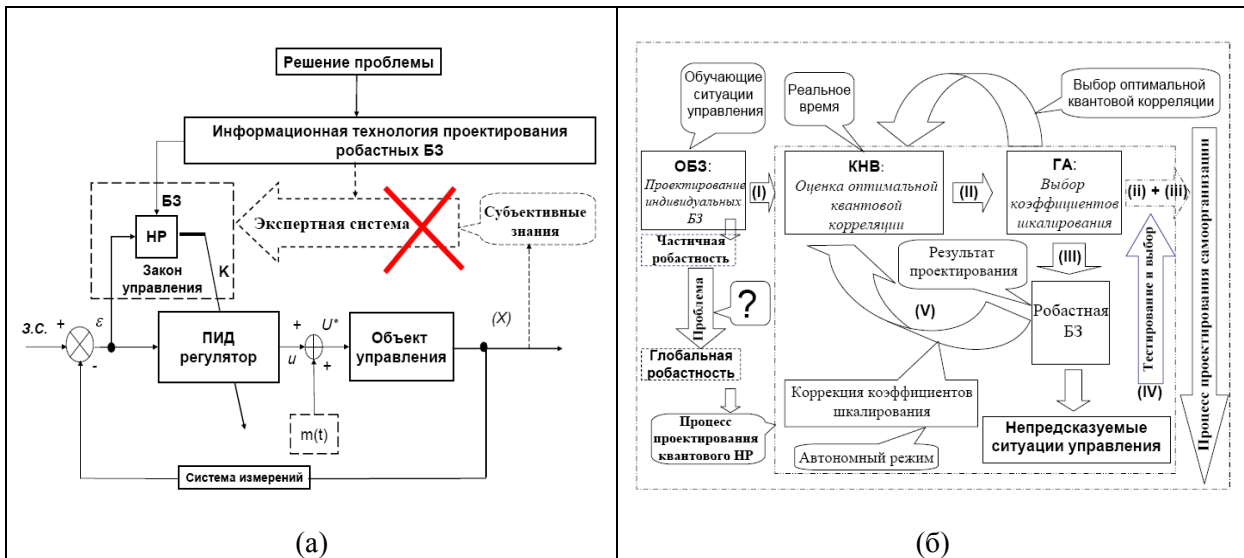


Рис. 3. Проектирование робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления
 (а) – проблема проектирования БЗ; (б) – структура технологии и этапы проектирования

Структуры робастных ИСУ показаны на рис. 4 и основаны на разработанной технологии проектирования (см. рис. 3(а)) с новым видом глобальной интеллектуальной обратной связи (ГИОС) [12]. Возможность эффективного применения технологии проектирования робастных БЗ в ИСУ (см., рис. 3(б)) в непредвиденных ситуациях управления основана на идеи применения квантовых стратегий принятия решений в виде инструментария квантового нечеткого вывода (КНВ) [8]. В результате робастность ИСУ формируется с помощью КНВ в законах управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора, включающих отмеченные особенности.

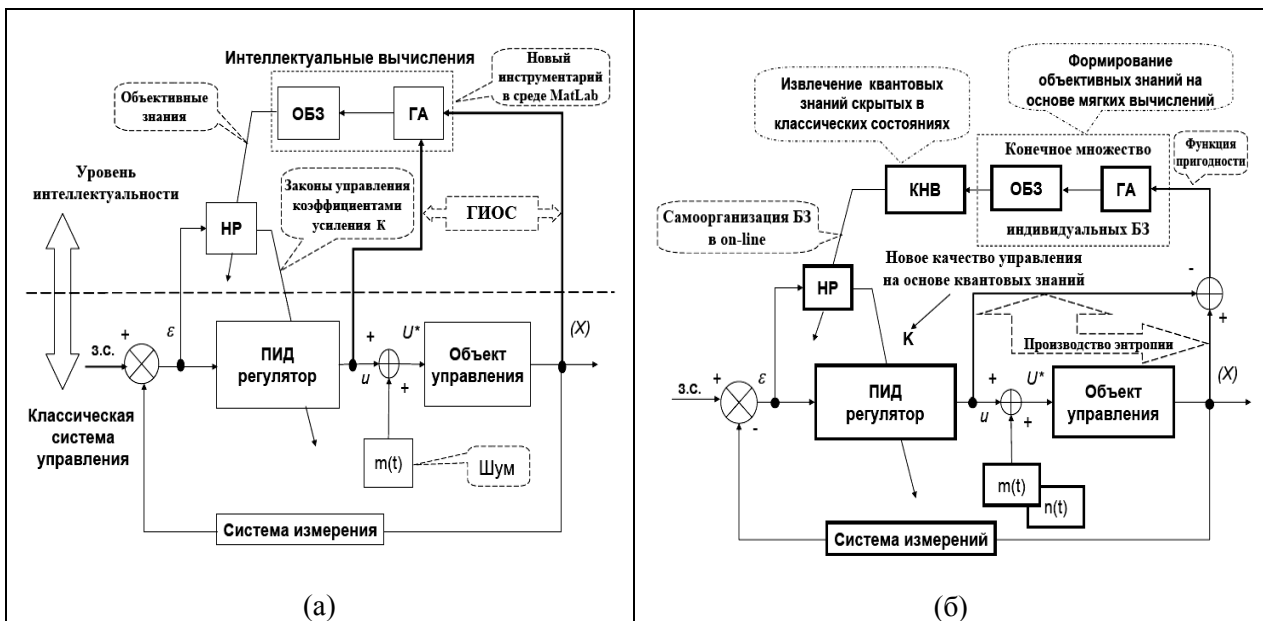


Рис. 4. Структуры ИСУ с оптимизаторами БЗ (ОбЗ) на интеллектуальных вычислениях
 (а) – структура ИСУ с ОбЗ на мягких вычислениях;
 (б) – структура ИСУ с ОбЗ на квантовых вычислениях

В качестве инструментария моделирования продукционных правил БЗ используется технология мягких и квантовых вычислений [1, 2].

Рассмотрим ниже очень важный показательный пример.

Применение технологий квантовых и мягких вычислений в процессах проектирования робастных БЗ в ИСУ

Рассмотрим в качестве конкретного примера динамическую модель системы «движущаяся каретка – перевернутый маятник», управляемой нечетким ПИД-регулятором по структурной схеме на рис. 4(б) Движение динамической системы «перевернутый маятник-каретка перемещения», описывается следующими уравнениями [13]:

$$\ddot{\theta} = \frac{g \sin \theta + \cos \theta \left(\frac{(u + \xi(t)) + \{a_1 \dot{z} + a_3 z\} - ml\dot{\theta}^2 \sin \theta}{m_c + m} \right) - k\dot{\theta}}{l \left(\frac{4}{3} - \frac{m \cos^2 \theta}{m_c + m} \right)}, \quad (1)$$

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

где θ – угол отклонения маятника; z – перемещение каретки; g – ускорение свободного падения (9.8 m/sec^2), m_c – масса каретки, m – масса маятника, l – половина длины маятника, $\xi(t)$ – стохастическое воздействие и u – управляющая сила, действующая на каретку. Зададим следующие значения параметров: $m_c = 1; m = 0.1; l = 0.5; k = 0.4; a_1 = 0.1; a_2 = 5$ и начального положения $[\theta_0; \dot{\theta}_0; z_0; \dot{z}_0] = [10; 0.1; 0; 0]$. Введем также ограничение на силу управления: $-5.0 < u < 5.0 [N]$. Рассмотрим два случая: оптимизация при многокритериальном (векторном) критерии качества и робастность интеллектуального управления в непредвиденных ситуациях управления.

Пример 3: Квантовая декомпозиция многокритериального критерия в задаче глобальной оптимизации интеллектуального управления

При одинаковых условиях обучения с помощью ОБЗ на мягких вычислениях БЗ нечеткого регулятора (НР1) спроектирована по обобщенному критерию минимума среднеквадратичной ошибки:

$$\left[\int_{t=t_0}^{t=t_{end}} x^2(t) dt / \|x\| + \int_{t=t_0}^{t=t_{end}} \dot{x}^2(t) dt / \|\dot{x}\| \right], \quad (2)$$

а БЗ регулятора НР2 спроектирована по обобщенному критерию минимума абсолютной ошибки положения маятника:

$$\left[\int_{t=t_0}^{t=t_{end}} |x(\tau)| d\tau / \|x\| + \int_{t=t_0}^{t=t_{end}} |\dot{x}(\tau)| d\tau / \|\dot{x}\| \right]. \quad (3)$$

Физически первый критерий (2) эквивалентен полной энергии перевернутого маятника, а второй критерий (3) характеризует абсолютную точность динамического поведения ОУ.

По схеме на рис. 4(а) были смоделированы две непредвиденные ситуации управления (S3, S4), в одной из которых (S3) был введен новый шум – случайный сигнал с равномерным одномерным распределением, задержка сигнала ошибки управления (0.003 сек), и сигнал шума в датчике измерения положения маятника (коэффициент усиления шума 0.015).

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

На рис. 5 показаны динамическое поведение исследуемой системы «движущаяся каретка – перевернутый маятник» и законы управления самоорганизующегося квантового регулятора (КНВ), нечетких регуляторов НР1 и НР2, полученных моделированием по схеме на рис. 4(б).

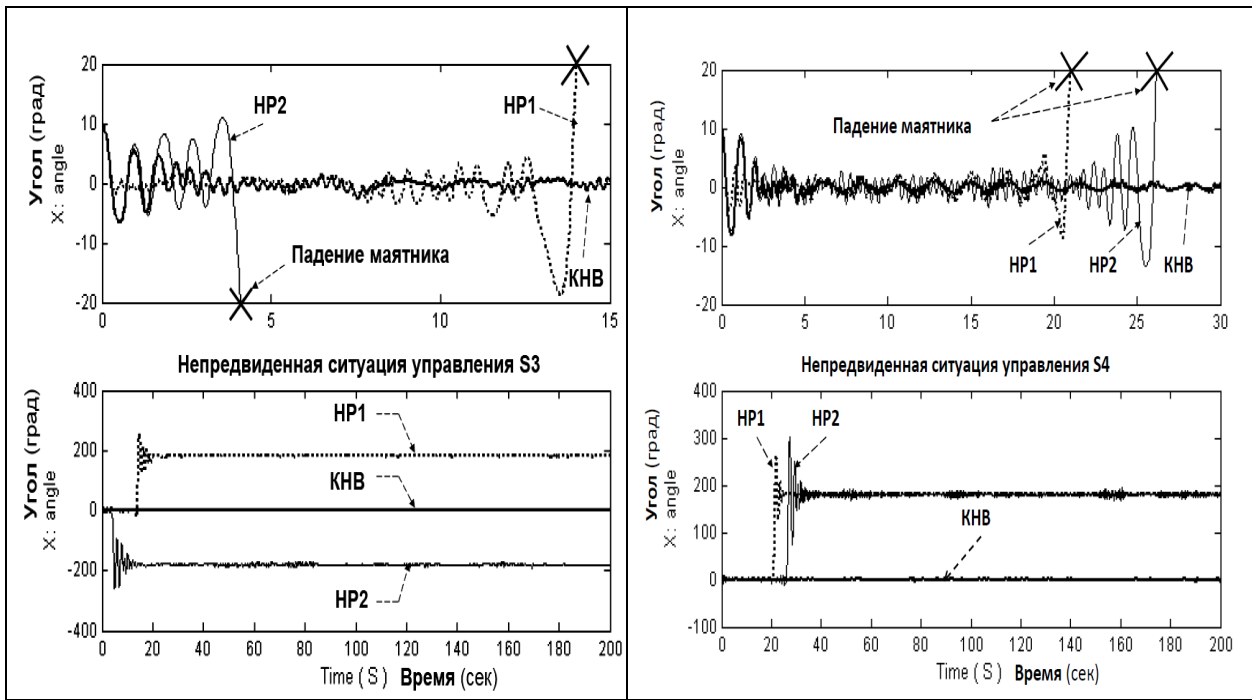
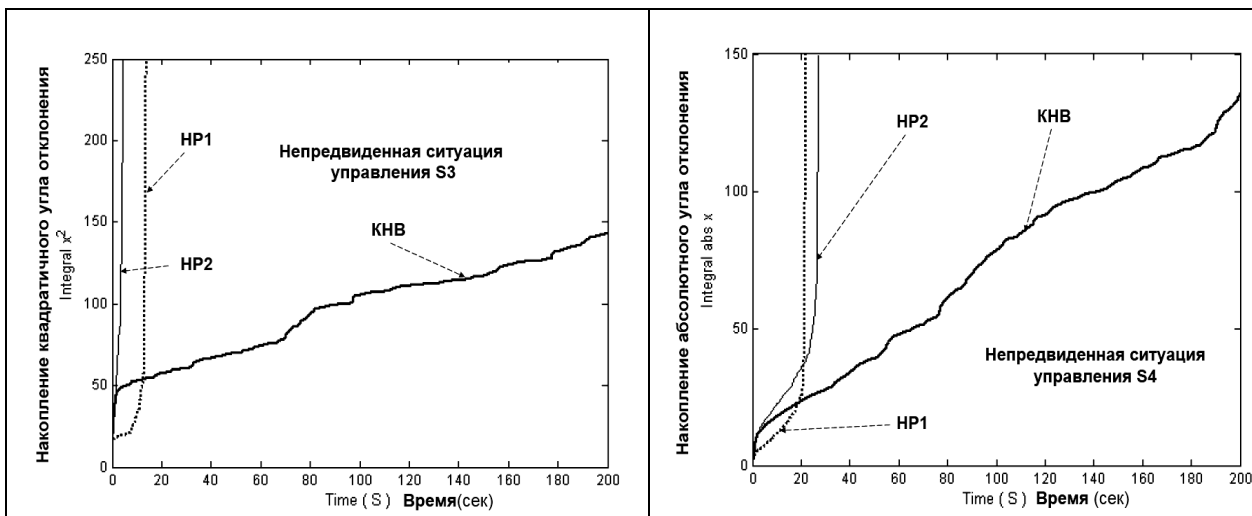


Рис. 5. Динамическое поведение перевернутого маятника в ситуациях управления (S3) и (S4)

Примечание. На рис. 5 и ниже приняты следующие обозначения: $x = \theta$ – угол отклонения маятника от заданного положения, z – положение каретки, КНВ – квантовый НР с пространственной корреляцией. Для ряда непредвиденных ситуаций управления алгоритмы управления от ОБЗ на мягких вычислениях хорошо работают и держат маятник [12]. На рис. 5 приведена более сложная непредвиденная ситуация управления, когда другие законы управления не работают, но из них можно спроектировать робастный закон управления.

Результаты моделирования, представленные на рис. 5, показывают, что динамический ОУ в непредвиденных ситуациях управления (S3, S4) при управлении НР(1,2) теряет устойчивость, а при управлении квантовым НР (КНВ) система управления обладает свойством робастности и достигается гарантированно цель управления.

На рис. 6 показаны интегральные динамические характеристики ОУ и точности управления.



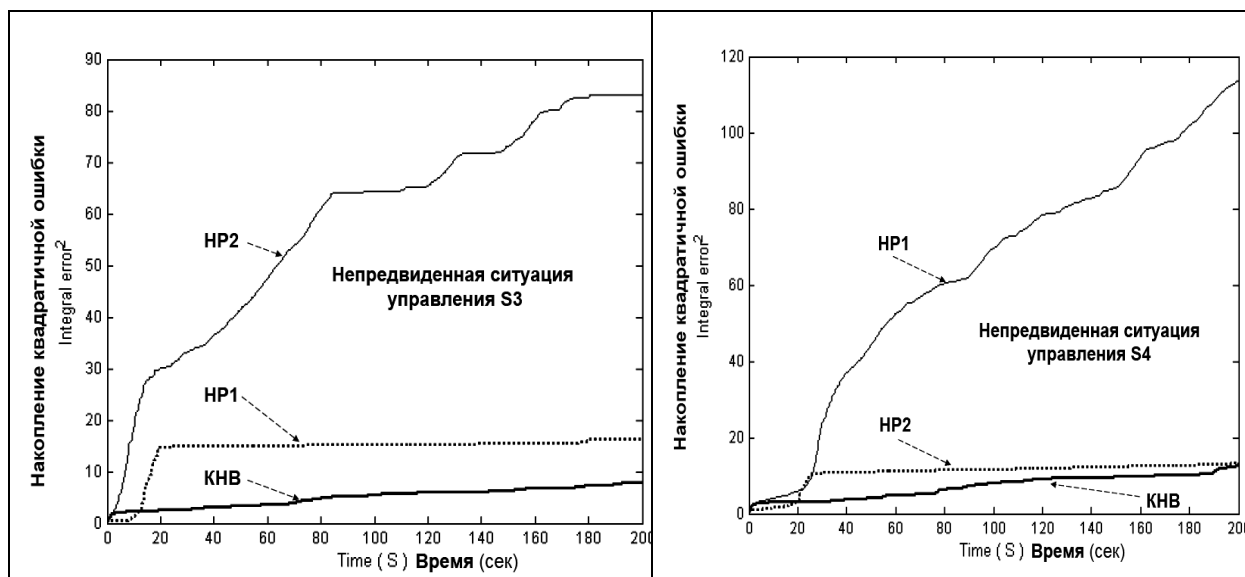


Рис. 6. Характеристики динамического поведения ОУ и точности управления

Результаты моделирования, представленные на рис. 6 показывают, что требуемое качество управления по приведенным критериям в непредвиденных ситуациях управления (S3, S4) при управлении HP(1,2) также не достигается, в то время как при управлении кантовым HP (КНВ) система управления обладает требуемым качеством управления. Отсюда следует, что из двух не робастных HP с помощью квантовой самоорганизации знаний можно спроектировать в реальном времени робастный HP, БЗ которого удовлетворяет обоим критериям качества. Следовательно, декомпозиция решения отмеченной выше задачи многокритериальной оптимизации робастной БЗ в непредвиденной ситуации управления на частные решения подзадач оптимизации физически может быть осуществлена в реальном времени в виде отдельных реакций соответствующих индивидуальных БЗ, оптимизированных с различными фиксированными критериями качества и ситуации управления.

Агрегирование полученных частных решений в виде новой робастной БЗ осуществляется на основе КНВ, содержащего механизм формирования квантовой корреляции между полученными частными решениями. В результате используются только реакции конечного числа индивидуальных БЗ, содержащие предельно достижимые законы управления в данной непредвиденной ситуации [9].

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

Пример 4: Робастность ИСУ в непредвиденных ситуациях управления

Рассмотрим теперь задачу оценки робастности ИСУ динамическим ОУ (1) в условиях непредвиденных ситуаций управления.

Рисунок 7 показывает классификацию непредвиденных ситуаций управления для ОУ (1), сочетание которых составляет практически необозримое количество нештатных ситуаций.

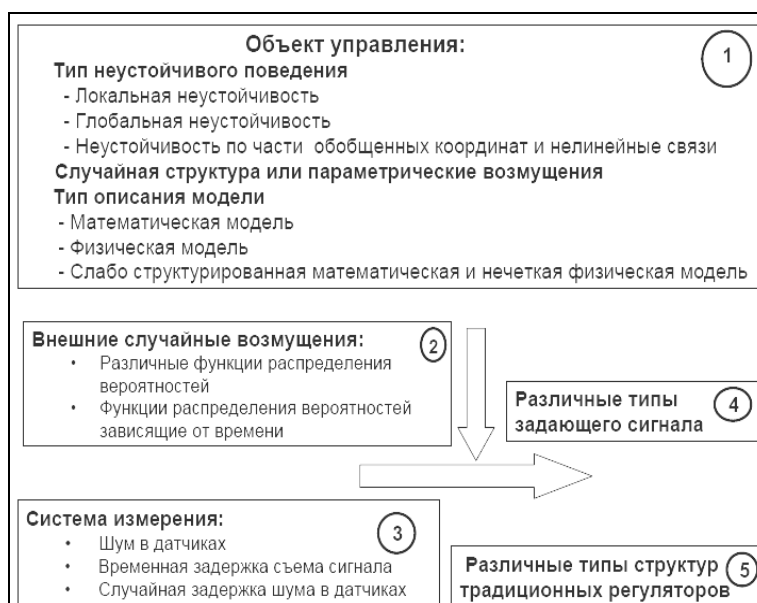


Рис. 7. Классификация и виды непредвиденных ситуаций управления

Достижение робастности ИСУ является сложной и важной задачей.

На рис. 8 показаны эффективные результаты моделирования ИСУ на непредвиденную (физически неоднородную) ситуацию управления: в схеме на рис. 4(б) новое время задержки сигнала датчика = 0.002 сек; внутренний Гауссовский шум с амплитудой = 0.01; новые начальные условия $[\theta_0, \dot{\theta}_0] = [13, 1]$ (в зр.), $[z_0, \dot{z}_0] = [0, 0]$.

Внешний Рэлеевский шум выбран в ситуации обучения.

Примечание. На рис. 8 и ниже приняты следующие обозначения: $x = \theta$ – угол отклонения маятника от заданного положения, $QFIsp$ – квантовый НР с пространственной корреляцией.

На рис. 9(а) показаны эффективные результаты моделирования ИСУ на более сложную непредвиденную (физически неоднородную) ситуацию управления: в схеме на рис. 4(б) новое время задержки сигнала датчика = 0.003 сек; внутренний Гауссовский шум с амплитудой = 0.02; случайные параметры модели k, a_1, a_2 определялись в виде:

$$k^{st} = k + gain_k \xi(t) = 0.4 + 1 \cdot \xi(t); a_1^{st} = a_1 + gain_{a_1} \xi(t) = 0.1 + 0.5 \cdot \xi(t); a_2^{st} = a_2 + gain_{a_2} \xi(t) = 5 + 2 \cdot \xi(t),$$

где $\xi(t)$ – Гауссовский белый шум с единичной амплитудой; новые начальные условия $[\theta_0, \dot{\theta}_0] = [13, 1]$ (в зр.), $[z_0, \dot{z}_0] = [0, 0]$.

Внешний шум, моделирующий шероховатость поверхности передвижения каретки с установленным маятником имел переменную функцию плотности распределения вероятностей, и показан на рис. 9(б) (сочетание непредвиденных ситуаций [1] + [2] + [3] на рис. 7).

Из результатов моделирования, представленных на рис. 8 и 9 следует неожиданный (для классической логики проектирования ИСУ) результат: из двух не робастных НР-1,2 с помощью КНВ в реальном времени может быть спроектирован робастный квантовый НР³.

Данный инструментарий реализует принцип самоорганизации БЗ на основе квантового подхода и осуществляет оптимизацию термодинамического критерия распределения качества управления как устойчивость, управляемость и робастность [8, 9].

Разработанный квантовый алгоритм является новым квантовым поисковым алгоритмом.

³ Описанный синергетический эффект получен также в [14 - 16] значительно позже работы [17].

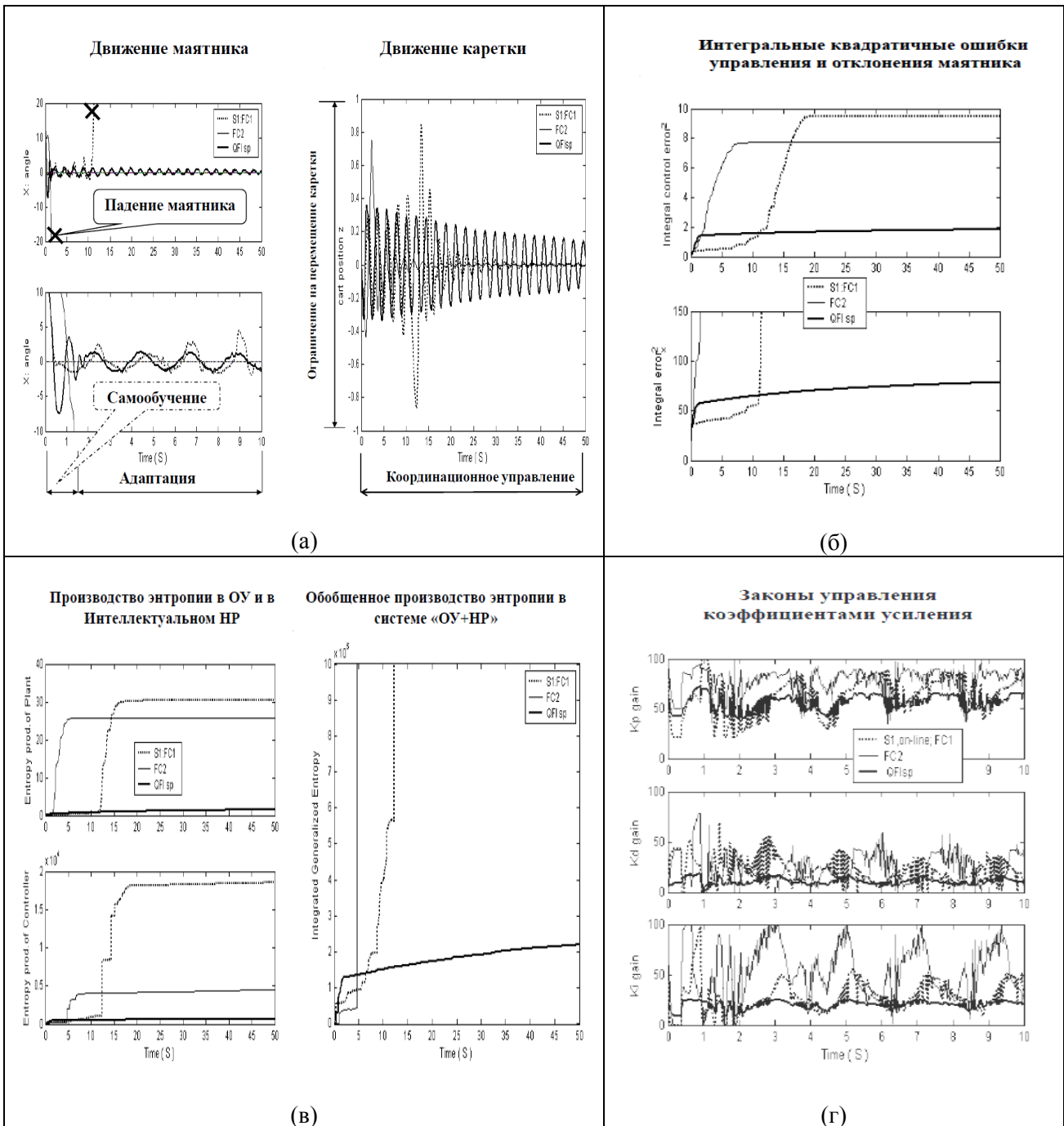


Рис. 8. Результаты моделирования ИСУ на непредвиденную (физически неоднородную) ситуацию управления

Решение задачи проектирования робастного управления классическим ОУ (глобально неустойчивым и существенно нелинейным) рассматривается в качестве примера (Benchmark) эффективного использования разработанной информационной технологии проектирования.

Данный пример иллюстрирует возможность эффективного применения технологии квантовых вычислений для решения таких алгоритмически неразрешимых задач классическими методами, как проектирование глобальной робастности ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления. Положительные результаты применения классических технологий интеллектуальных вычислений (типа мягких вычислений) совместно с аппаратом квантовых вычислений привело к новому альтернативному подходу – применению технологии квантовых интеллектуальных вычислений в задачах оптимизации процессов управления классическими ОУ (физический аналог применения обратного метода исследования «квантовая система управления – классический ОУ»), что существенно расширяет возможности самих интеллектуальных вычислений.

Преимущества и возможности использования робастной самоорганизующейся ИСУ описаны также в [8, 9]. Обобщение полученных соотношений на более широкий класс динамических систем (*порт-управляемые* Гамильтоновы системы – *port-controlled Hamiltonian systems*) приведено в [18].

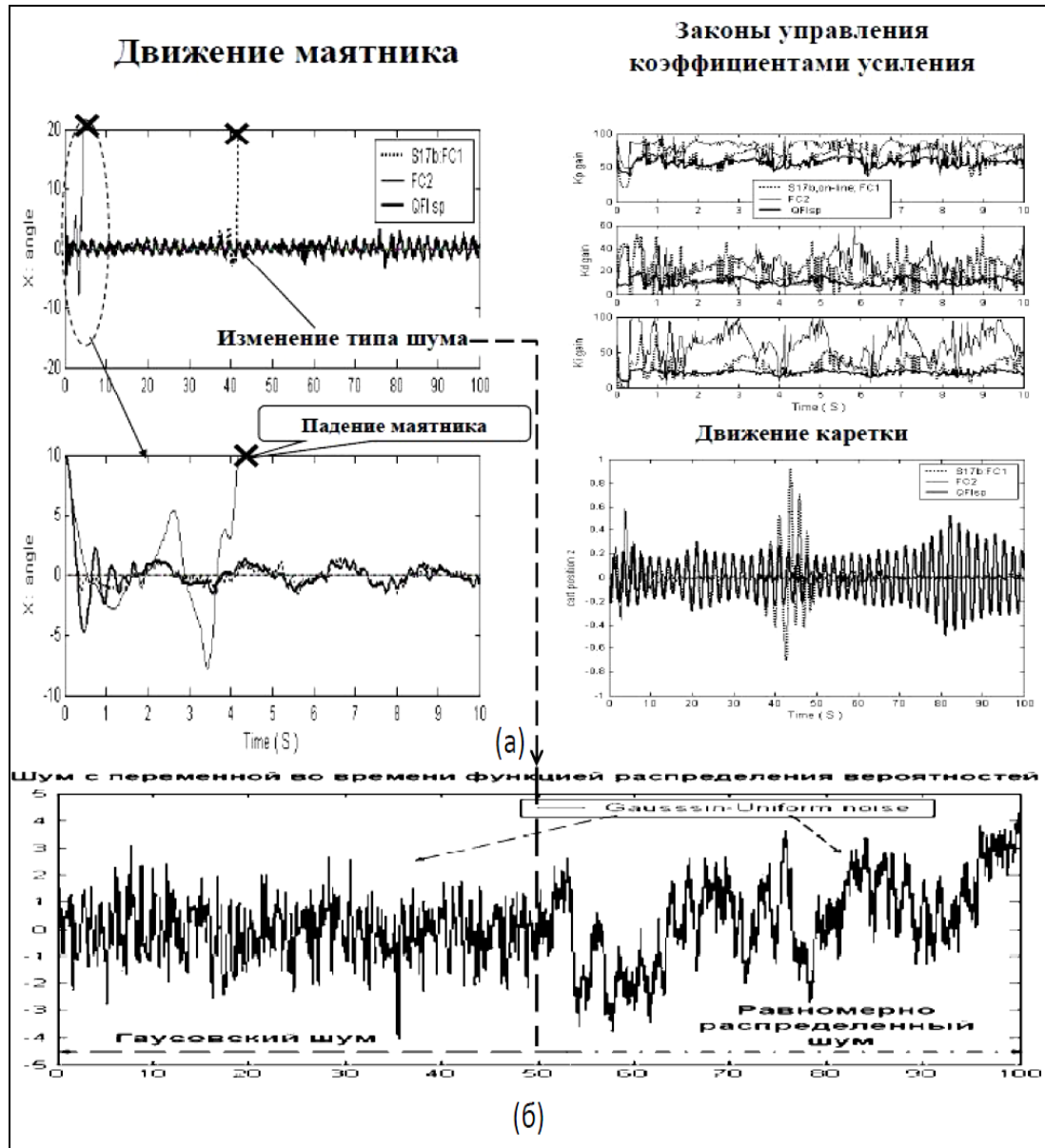


Рис. 9. Робастность ИСУ на непредвиденную ситуацию управления

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

Перечисленные вопросы рассмотрены в отдельной работе [1, 2].

Отметим некоторые важные направления исследований в области ИСУ на основе новых ИТ интеллектуальных вычислений.

Направления работ разработки ИСУ

В данном разделе отметим основные положения развития технологии интеллектуальных вычислений в задачах проектирования робастных БЗ для ИСУ. Главное внимание сконцентрировано на описании применения разработанной технологии проектирования и конкретных результатов проектирования БЗ и моделирования ИСУ сложными, существенно-нелинейными ОУ в общем случае со случайно изменяющейся структурой и изменяющимися задающими сигналами (целями управления).

Основной целью в этом случае является определение уровней робастности процессов управления, поддерживающих требуемый уровень надёжности и точности процессов управления в условиях неопределённости информации в процессах принятия решений с помощью разработанного программного продукта.

Поэтому такие сложные и актуальные для общей теории управления вопросы явились предметом обсуждения в данной работе.

К ним в первую очередь относятся работы по исследованию устойчивости нечетких систем, применения интеллектуальных вычислений в анализе и синтезе больших слабо структурированных социально-экономических систем, принятия решений на основе квантовых игровых стратегий, проектирование робастных ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций, а также программно-аппаратная поддержка интеллектуальных вычислений.

Особый интерес представляет также работа по инновационному менеджменту нечетких систем управления и коммерциализации ОИС, позволяющая решать актуальные проблемы планирования выпуска и коммерциализации разработанных наукоемких интеллектуальных продуктов в конкурентных условиях и экономического кризиса рынка экономики и интеллектуального труда.

Приведенные результаты позволят многим университетским программам РФ и ближнего зарубежья использовать в учебном процессе накопленный международный опыт, современные тенденции и практические результаты при решении сложных и важных для народного хозяйства РФ задач подготовки востребованных рынком интеллектуального труда специалистов и менеджеров-аналитиков. В условиях кризиса мировой экономики, к таким первоочередным задачам разработки интеллектуальных систем, относятся следующие направления исследований:

1. разработка гибкого инструментария проектирования робастных ИСУ в непредвиденных ситуациях управления и слабо структурированных ОУ;
2. разработка и внедрение оптимальных интеллектуальных систем информационного мониторинга объектов с повышенной социально-экономической ответственностью (таких как АЭС в сейсмически опасных зонах);
3. геологическая разведка природных недр и энергетических ресурсов в трудно доступных и опасных для человека местах;
4. решение задач обработки и представления ценной информации для принятия ответственных решений в геофизике, геологической разведке, дальней космической связи, защиты социально ответственных банковских и государственных БД;
5. робастное управление в непредвиденных ситуациях управления и катастроф на ж/д транспорте, аэропортах, автомагистралях;
6. разработка коммерческого инструментария программно-аппаратной поддержки интеллектуальных вычислений и мн. др.

Заключение

Приведенные результаты позволяют более полно и глубже понять решение трудной и принципиально важной для теории и систем управления проблемы: определение роли и влияния квантовых синергетических эффектов на повышение уровня робастности проектируемых интеллектуальных процессов управления.

В данной работе решение поставленной проблемы основано на выявлении возможности извлечения дополнительной квантовой информации, скрытой (и только частично доступной) в корреляции-

онных классических состояниях законов управления, и спроектированных только на основе классических методов технологии мягких вычислений [8].

Разработанная модель квантового нечеткого вывода реализует принцип самоорганизации БЗ в непредвиденных ситуациях управления и оптимального распределения уровней устойчивости, управляемости и робастности в соответствии с разработанным термодинамическим критерием качества управления (принцип минимума обобщенного производства энтропии) [9].

При этом проявляется эффект редукции избыточной информации в классических законах управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора за счет использования квантовых эффектов [1].

Данный эффект достигается за счет использования новой ценной квантовой информации, извлеченной в реальном времени из результатов реакций классических НР (с заданными БЗ) на непредвиденную ситуацию управления с помощью новых видов квантовой корреляции [2].

Созданные квантовым процессом проектирования робастные БЗ формируют законы управления в реальном времени с минимальной алгоритмической сложностью их физической реализации и с минимальными потерями полезного ресурса (минимум производства обобщенной энтропии в системе «ОУ + самоорганизующийся интеллектуальный регулятор») для различных (физически неоднородных) классов непредвиденных ситуаций управления [4].

Полученные результаты позволяют продемонстрировать эффективность квантового алгоритма управления самоорганизацией робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления как нового направления в теории и систем управления [9].

Разработанная программная поддержка реализации квантовых вычислений на классических персональных компьютерах [10, 11] открывает новые возможности инженерной практики эффективного применения технологии квантовых мягких вычислений в проектировании ИСУ [18, 19].

Список литературы

1. 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), Universita degli Studia di Milano, 2005. – Vol. 82.
2. 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, 2003. – Vol. 80. – 2006. – Vol. 83.
3. 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 7-th ICAFS. – Siegen, 2006. – Pp. 218-239.
4. Ulyanov S.V. System and method for control using quantum soft computing // US patent. – 2003. – № 6, 578, 018 B1.
5. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. Сложность конечных объектов и информационная теория управления // Итоги Науки и Техники. – сер. Техническая кибернетика. – ВИНТИ АН СССР, 1979. – Т. 11. – С. 77-147.
6. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. Теория моделей процессов управления: Термодинамические и информационные аспекты. – М.: Наука, 1978.
7. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Ульянов С.С. Проектирование робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН, ТиСУ, 2006. – № 5. – С. 102-141.
8. 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.
9. Литвинцева Л.В., Ульянов С.В., Интеллектуальные системы управления. Ч. I: Квантовые вычисления и алгоритм самоорганизации // Изв. РАН, ТиСУ, 2009. – № 6, – С. 69-97.
10. Ulyanov S.V. Efficient simulation system of quantum algorithm gates on classical computer based on fast algorithm // US patent. – 2006. – № A1.

11. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Takahashi K., Fast algorithm for efficient simulation of quantum algorithm gates on classical computer // Systemics, Cybernetics and Informatics. – 2004. – V. 2. – №3. – Pp. 63-68.
12. Ulyanov S.V. Self-organized control system // US patent. – 2002. – № 6, 411, 944 B1.
13. Мишин А.А., Добрынин В.Н., Литвинцева Л.В., Технология мягких вычислений в проектировании интеллектуальных систем управления // ППС, 2010. – № 1.
14. Neirotti J P. Can a student learn optimally from two different teachers? // J. Physics A. – 2010. – Vol. 43. – № 1.
15. Smith G., Yard J., Quantum communication with zero-capacity channels // Science. – 2008. – V. 321. – №. 5897. – Pp. 1812-1815.
16. Oppenheim J. For quantum information, two wrongs can make a right // Science. – 2008. – Vol. 321. – № 5897. – Pp. 1783-1784.
17. Ulyanov S.V., Takahashi K., Litvintseva L.V. Quantum soft computing via robust control: Classical efficient simulation of wise quantum control in non-linear dynamic systems based on quantum game gates // Proc. of 2nd ICSCCW'2005. – Antalya, 2005. – Pp. 11-41.
18. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov S.S., Quantum information and quantum computational intelligence: Applied quantum soft computing in AI, computer science and intelligent wise robust control. – Milan: Note del Polo (Ricerca), Universita degli Studia di Milano. – 2007. – Vol. 86. – P. 873.
19. Ulyanov S.V. Method and device for performing a quantum algorithm for simulate a genetic algorithm // US, 2008. – Patent № 20080140749 A1.