

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИМЕНЕНИЯ КВАНТОВЫХ И ДРОБНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ СОВМЕСТНО С ИНСТРУМЕНТАРИЕМ МАТЛАВ ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ РОБАСТНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Ульянов Сергей Викторович

Доктор физико-математических наук, профессор;

PronetLabs;

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.

На основе результатов моделирования в MATLAB/SIMULINK показано, что использование разработанного инструментария на основе квантовых и дробных вычислений в ситуациях обучения и в непредвиденных (нештатных) ситуациях управления приводит к повышению уровня робастности интеллектуальных систем управления.

Ключевые слова: интеллектуальное управление, робастные базы знаний, квантовые мягкие вычисления, дробное исчисление.

APPLICATION OF QUANTUM COMPUTING AND FRACTIONAL CALCULUS TECHNOLOGY TOGETHER WITH MATLAB TOOLKIT FOR DESIGN OF INTELLIGENT ROBUST CONTROL SYSTEMS

Ulyanov Sergey

Doctor of Science in Physics and Mathematics, professor;

PronetLabs;

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.

Using the MATLAB/SIMULINK simulation results is shown that with the application of a developed toolkit based on quantum computing and fractional calculus in learning situations and in unpredicted (hazard) control situations the robust level of intelligent control systems is increased.

Keywords: intelligent control, robust knowledge base, quantum soft computing, fractional calculus.

Введение

В Части I статьи¹ были рассмотрены основные определения, положения и принципы современной теории моделей интеллектуальных вычислений. Приведены результаты применения теории мягких вычислений и нечетких систем на конкретных примерах моделирования существенно-нелинейных, слабо структурированных моделей объектов управления (ОУ), представляющих самостоятельный интерес для теории и систем управления. Обсуждены вопросы разработки и моделирования в MATLAB/SIMULINK интеллектуальных систем управления (ИСУ) и оценки их робастности в непредвиденных ситуациях управления и информационного риска. Следует отметить, что изложенная в Части I упомянутой книги методология применения MATLAB/SIMULINK в проектировании робастных ИСУ существенно отличается от идеологии и методологии инструментария Fuzzy Logic

¹Ульянов С.В., Литвинцева Л.В., Добрынин В.Н., Мишин А.А. Интеллектуальное робастное управление: Технологии мягких вычислений. – М.: ВНИИгеосистем, 2011.

Toolbox и Robust Control, встроенных в MATLAB, и многочисленных примеров применения указанных инструментариив.

Отличительной особенностью излагаемого подхода является применение универсального оптимизатора баз знаний (ОБЗ), разработанного на основе технологии мягких вычислений. Подробно рассмотренный в Части I упомянутой книги инструментарий ОБЗ позволяет проектировать объективные робастные БЗ, а также устранить ряд недостатков методологии инструментария модулей Fuzzy Logic Toolbox и Robust Control, встроенных в MATLAB².

В частности, разработанный ОБЗ позволил решить ранее не решаемые задачи.

К таким задачам относятся в первую очередь следующие: 1) оптимальное проектирование структуры нечеткой нейронной сети (ННС) с наперед заданной точностью аппроксимации сигнала обучения; 2) проектирование требуемого уровня робастности; 3) определение оптимального числа продукционных правил и их внутренней структуры (конструирование универсального аппроксиматора); 4) выбор оптимального типа нечеткого логического вывода; 5) определение вида и оптимальных параметров функции принадлежности в правилах «Если А То В» для типового нечеткого регулятора; 5) корректное тестирование робастности ИСУ и мн. др.

Итоги многолетнего практического опыта автора промышленного применения MATLAB в реальных проектах Yamaha Motor Co., Ltd, ST Microelectronics, PronetLabs и др. показали, что инструментарий модулей Fuzzy Logic Toolbox и Robust Control в силу своей структуры в принципе не может решать такие важные вышеперечисленные задачи. Примеры сравнения результатов моделирования на ОБЗ с модулями MATLAB на типовых Benchmarks показали высокую эффективность применения ОБЗ на мягких вычислениях³ в исследовании робастности ИСУ в непредвиденных ситуациях управления.

В настоящей статье обсуждаются более глубокие механизмы разработки новых моделей интеллектуальных вычислений типа дробных исчислений, а также квантовых мягких вычислений и проектирования самоорганизации баз знаний (БЗ) на основе КА, позволяющие расширить возможности проектирования ИСУ более высокого уровня робастности. Данные виды вычислений составляют базис новой квантовой интеллектуальной информационной технологии (КИИТ) проектирования робастных ИСУ и расширяют возможности применения инструментария MATLAB/SIMULINK при решении практических задач нового класса систем управления.

Корректность моделей ОУ и технологии интеллектуальных вычислений

Выбор физического базиса и математического способа определения критерия корректного описания модели ОУ существенно влияет на процесс извлечения объективных знаний из динамического поведения ОУ и на формирование робастных БЗ в ИСУ. В результате существует понятие физической и математической корректности описания ОУ, а также применяется понятие физической, математической и расчетной модели ОУ. Физическая корректность представления знаний и алгоритмиче-

² Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007; Sumathi S. P. Computational intelligence paradigms: Theory and applications using MATLAB. – N.Y.: CRC Press, 2010; Ponce-Cruz P., Ramirez-Figueroa F.D. Intelligent control systems with LabVIEW™. – Berlin: Springer Verlag, 2010; MATLAB for Engineers – Applications in control, electrical engineering, IT and robotics (Ed. K. Perutka). – In Tech Publ, 2011; MATLAB – A Ubiquitous tool for the practical engineer (Ed. C. M. Ionescu). – In Tech Publ, 2011; Applications of MATLAB in science and engineering (Ed. T. Michałowski). – In Tech Publ, 2011; Scientific and engineering applications using MATLAB (Ed. E. P. Leite). – In Tech Publ, 2011; Ruano A. Intelligent control systems using computational intelligence techniques. – L.: IEE Control Series, 2008. – Vol. 70; Negnevitsky M. Intelligent control design with MATLAB and SIMULINK. – Intensive Course. – Singapore, ТЕКВАС, 2011; Behera L. Intelligent systems and control principles and applications. – Oxford University Press, 2010; Matlab – Modelling, Programming and Simulations (Ed. E. P. Leite). – In Tech Publ, 2010; Valerio D. Ninteger v. 2.3 fractional control toolbox for Matlab. – Univ.Tech. e Lisboa (Inst. Superior Technico), 2005.

³ Мишин А. А., Нефедов Н. Ю., Петров С. П., Полунин А. С., Литвинцева Л. В. Методы построения баз знаний для управления нелинейными динамическими системами // Системный Анализ в Науке и Образовании: электрон. науч. журнал. – Дубна, 2011. – №2. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/20-0421100111\0008>.

ская сложность описания робастных моделей ОУ определяет также выбор инструментария исследования и моделирования динамического поведения системы управления. Поэтому рассмотрим предварительно качественные особенности построения корректных моделей ОУ⁴. Обсудим также их взаимосвязь с моделями интеллектуальных вычислений, таких как мягкие, дробные исчисления и квантовые вычисления в задачах проектирования робастных ИСУ и роль возникающих мнимых «парадоксов» при их применении в системной инженерии.

Модели ОУ и «парадоксы» технологии интеллектуальных вычислений

Разработка логически непротиворечивых и адекватных (корректных) физическим условиям и ограничениям математических моделей ОУ с целью объективного извлечения знаний из динамического поведения для эффективной реализации ИСУ новыми видами современной техники является одной из актуальных проблем для современного этапа развития теории и систем управления. Выбор корректной модели, в первую очередь ОУ минимальной алгоритмической сложности, является важной для практики задачей. Однако критерий минимальной алгоритмической сложности при выборе метода описания модели ОУ требует математического уточнения и физического обоснования.

А. Системный анализ разработки и проектирования ИСУ для многих моделей такого рода ОУ тесно связан с необходимостью *корректного* учета существующих физических ограничений. Ограничения на описание динамического поведения сложного физического ОУ (в частности, на предельную точность процессов измерений и управления; выбор модели пространства-времени и др.) накладываются известными физическими законами (из таких дисциплин как статистическая механика, теория относительности, термодинамика, теория информации и квантовая механика).

Примером таких ограничений являются следующие: термодинамические ограничения на физическую реализацию математических моделей ОУ; различные типы обобщенных информационных соотношений неопределенности Гейзенберга; квантовые ограничения на пропускную способность передачи информации с учетом термодинамических флуктуаций; квантовые оценки предельных возможностей точности измерений параметров ОУ и процессов управления в нанотехнологиях и мн. др. Данные ограничения должны быть учтены в алгоритме проектирования объективных БЗ в ИСУ.

Повышение требований к точности управления на физическом уровне описания моделей ОУ, например, в нанотехнологиях с учетом квантовых эффектов (например, исполнительных устройств – квантовых электромеханических систем [1]) приводит к логическому переходу в квантовую область процессов измерений и управления на атомно-молекулярном уровне [2, 3].

В свою очередь, происходит неизбежный пересмотр физических основ самой теории управления [4-10]. Аналогичный результат получен при разработке основ квантовой теории информации и квантовых вычислений, приведших к пересмотру аксиоматики моделей физических вычислений и логическому обобщению тезиса Тьюринга-Черча [11-14].

Многие из перечисленных проблем физической теории и систем управления рассматривались ранее в [4, 8, 15-17]. Были рассмотрены конкретные примеры, и получены важные выводы о необходимости учета физической природы самого ОУ в структуре и предельных возможностей процессов управления [5-7]. Роль корректной интерпретации физической и математической моделей эксперимента⁵, взаимосвязь с необходимым уровнем полноты извлекаемых при измерении знаний, алгоритмической сложности математических моделей ОУ и влияние перечисленных факторов на робастность формируемой БЗ в ИСУ (функционирующих в динамически изменяющихся непредвиденных ситуациях управления) в теории управления практически не исследовались. Принципиальное значение при формировании объективных знаний имеет глобальная оценка функциональной реализуемости различных видов аппроксимации моделей при наличии логико-информационных границ и физических (термодинамических, квантово-релятивистских) ограничений на описание реальных нелинейных ОУ [7].

⁴Ульянов С.В., Решетников Г.П., Мишин А. А. Физическая корректность представления знаний и алгоритмическая сложность описания робастных моделей объектов управления // Системный Анализ в Науке и Образовании: электрон. науч. журнал. – Дубна, 2011. – № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/21.-0421100111\0025>.

⁵Пытьев Ю. П. Математические методы интерпретации эксперимента. – М: Высшая школа, 1989.

На основе достоверности извлекаемого количества информации определяется информационная оценка приращения риска (статистической корректности) формируемого описания модели ОУ и границ её применимости. В результате методология оценки корректности математических моделей слабо структурированных физических ОУ находится в стадии своего становления и требует привлечения новых видов интеллектуальных вычислений, способных установить причинно-следственные связи и взаимоотношения подсистем. Поэтому *принцип компенсации неполноты модели описания физическо-го ОУ* разработкой и применением соответствующего уровня интеллектуальных вычислений является одним из основных при исследовании слабо структурированных моделей ОУ⁶.

Б. В теории и системах управления одним из эффективных подходов снижения риска принятия решения (от неполноты описания модели ОУ и внешней среды) является разработка структур робастных ИСУ. Данные структуры реализуют принцип компенсации неопределенности описания модели ОУ за счет повышения уровня интеллектуальности традиционных систем управления.

В частности, компенсация информационной неопределенности осуществляется за счет повышения интеллектуальности нижнего исполнительского уровня в виде соответствующих структур робастных интеллектуальных регуляторов и, соответственно, спроектированных самоорганизующихся робастных БЗ⁷.

Неизмеримые (ненаблюдаемые) обобщенные координаты динамического поведения ОУ или скрытая в классических состояниях квантовая информация в законах управления ИСУ, существующая в силу квантовой нелокальной корреляции, являются одним из примеров такой ситуации управления. Подобные эффекты должны быть учтены и скомпенсированы продукционными правилами в соответствующих БЗ проектируемых робастных ИСУ.

Как следствие, возросшие требования к повышению надежности функционирования сложных (в общем случае слабо структурированных) ОУ в условиях информационного риска и непредвиденных (нештатных) ситуациях управления привели к необходимости разработки соответствующей информационной технологии (ИТ) проектирования и повышения уровня робастности ИСУ. Базисом такой ИТ является применение новых видов интеллектуальных вычислений, основанных на нестандартных моделях логического (в общем случае *немонотонного*) вывода. Однако применение на практике нестандартных логик, используемых в основе технологий интеллектуальных вычислений и, главное – выводы, полученные с их применением в задачах принятия решений и управления, часто приводят к мнимым «парадоксам» и противоречию с интуитивными представлениями инженера-исследователя об ожидаемом результате.

При этом отметим, что сам термин «нестандартная» логика уже включает такую ситуацию, а его введение обосновано стремлением решать задачи, не решаемые существующими технологиями проектирования. К таким технологиям интеллектуальных вычислений относятся мягкие, дробные и квантовые вычисления (и их сочетания), рассматриваемые в данной статье с точки зрения применения в задачах проектирования робастных БЗ и интеллектуальных ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления и информационного риска.

В. Применение новых технологий в инженерной практике теории и систем управления часто сталкивается с проблемами преодоления инерции «прагматической» инженерной интуиции и философии системной инженерии. Так происходило, например, в начале 70-х годов прошлого столетия при внедрении в инженерную практику идей мягких вычислений на основе теории нечетких множеств (автор является пионером в этой области⁸) в процессы проектирования нечетких регуляторов и систем управления. Суть возникающих «парадоксов» заключается в физической и логической интерпретации понятия числа, производной и интеграла как исходного базиса моделирования и проектирования систем управления. Поясним данный факт наглядными примерами, которые позволяют установить причинно-следственные связи и обоснование результатов физической интерпретации возни-

⁶Ульянов С.В., Решетников Г.П. Квантовое программирование и интеллектуальное управление физическим экспериментом (УНЦ ОИЯИ). – М.: ВНИИгеосистем, 2011.

⁷Ульянов С.В., Решетников Г.П., Мишин А.А. Физическая корректность знаний и алгоритмическая сложность описания робастных моделей объектов управления. Ч.1. // Системный Анализ в Науке и Образовании: электрон. науч. журнал. – Дубна, 2011. – № 3. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/21.-0421100111\0025>.

⁸См. первую в мировой практике книгу по проектированию нечетких систем управления: Петров Б.Н., Уланов Г.М., Гольденблат И.И., Ульянов С.В. Теория моделей в процессах управления. – М.: Наука, 1978.

кающих мнимых логических «парадоксов». Например, понятия производной и интеграла нецелочисленных порядков, лежащих в основе дробного исчисления, при первом знакомстве с ними вызывают существенные затруднения при попытке их наглядной геометрической и корректной физической интерпретации, которые препятствуют широкому использованию этого исчисления в прикладных областях исследований и разработок робастных систем управления. Достаточно отметить, что в зависимости от определения производной нецелочисленного порядка, применение производной такого типа к постоянной величине приводит к «парадоксу» – результат отличен от нуля.

Хотя история возникновения и развития дробного исчисления насчитывает уже более трех столетий, его основы не изучаются в большинстве курсов математического анализа высших инженерных учебных заведений. Однако существо перехода от классического математического анализа к его обобщению, которым и является дробное исчисление, может быть достаточно просто изложено с помощью приемов, уже известных в математике.

Г. В традиционных исчислениях по количественному результату численного алгоритма осуществляется соответствующая оценка качественного свойства исследуемого объекта. Логическая оценка качества в общем случае может быть осуществлена только в конце количественных вычислений, а для алгоритмически неразрешимых численных проблем (сложность алгоритма по Колмогорову), часто искомая оценка достигнута быть не может. Основой интеллектуальных вычислений являются возможность применения операций не только на числовых шкалах (как в традиционных вычислениях), но и введение новых видов операций на шкалах, определяющих качественные характеристики исследуемого объекта. В этом случае, цель применения интеллектуальных вычислений заключается в реализации возможности непосредственного определения качественных характеристик объекта, оперируя алгоритмически последними также как на числовых шкалах. Количественные оценки объекта можно получить из качественных оценок обратным отображением шкал. Мягкие и квантовые вычисления являются примерами таких исчислений.

Большим сюрпризом оказался выявленный эффект, что при этом многие классические задачи могут быть решены с экспоненциальным ускорением или решены алгоритмически принципиально неразрешимые классическими методами задачи. Так, например, для определения качественной характеристики функции (постоянная или балансирующая для четырех аргументов) в традиционном подходе требуется четыре шага численных операций, в тоже время квантовый алгоритм Дейча (1985г.) 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 решает алгоритмически неразрешимую задачу с полиномиальной сложностью. Алгоритм Гровера осуществляет поиск решения в неструктурированных данных с квадратичной скоростью. Нечеткие множества, введенные в 1965 г. Л. Заде, позволяют расширить (многовековое) определение самого числа, и ввести множество новых шкал качественных характеристик, которые невозможно определить методами классических исчислений. Но при этом парадоксальным фактом является не выполнение закона исключения третьего. Квантовая логика приводит к открытию скрытой квантовой информации в классических логических операциях при применении к ним нелинейных преобразований. Такие исчисления открывают новые возможности для теории и проектирования ИСУ. В частности, применение данных типов вычислений или их совместных комбинаций существенно повышают уровень робастности ИСУ, функционирующих в условиях информационного риска или непредвиденных (нештатных) ситуациях.

Рассмотрим кратко методологические особенности применения технологий мягких, дробных и квантовых вычислений, используемых при проектировании робастных баз знаний (БЗ) ИСУ.

Технология мягких вычислений

Логический «парадокс» в виде обобщения понятия числа за счет введения субъективной качественной шкалы (и отображения в нее в виде лингвистической переменной качественной аппроксимации его количественной характеристики) привело к 30-летней дискуссии с представителями научной школы теории вероятностей. К таким трудностям относятся, 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 рас-

смотрения, 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 на фазовом пространстве лингвистических переменных позволили разработать структуры нечетких ИСУ, эффективно решающие задачи управления в условиях существенной неопределенности исходной информации, слабой формализации описания ОУ и нечеткости целей управления.

Одной из основных проблем практического и эффективного применения технологии мягких вычислений в задачах интеллектуального управления являлось решение следующих задач: а) объективное определение вида функции принадлежности и ее оптимальных параметров в производственных правилах БЗ; б) определение оптимальной структуры нечетких нейронных сетей (ННС) в задачах обучения (аппроксимация обучающего сигнала с требуемой/заданной ошибкой и с минимальным количеством производственных правил в БЗ – разработка и проектирования универсального аппроксиматора); в) применение генетического алгоритма (ГА) в задачах многокритериального управления и наличии дискретных ограничений на параметры объекта управления и др.

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

Перечисленные проблемы были решены и апробированы на основе разработанного оптимизатора БЗ (ОБЗ) с применением технологии мягких вычислений.

Разработанный интеллектуальный инструментарий позволил проектировать робастные БЗ на основе решения одной из алгоритмически трудно решаемых задач теории искусственного интеллекта – извлечения, обработки и формирования объективных знаний без использования экспертных оценок. В структуре оптимизатора используются три ГА, которые позволяют спроектировать, как следствие, оптимальную структуру ННС (вид функций принадлежности и их параметры, количество внутренних слоев и др.), аппроксимирующей обучающий сигнал с требуемой (заранее заданной) ошибкой.

Объединение методологий стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментарии разработанного ОБЗ позволило повысить уровень робастности проектируемых БЗ и решать сложные задачи формирования объективных знаний^{9, 10, 11}. 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 только заданной ситуации управления, содержит (в неявном виде) субъективность исходной информации, а при неправильном определении пространства поиска найденное решение может неадекватно соответствовать ситуации управления. Для такого рода ситуации управления требуется привлечение новых видов технологий интеллектуальных вычислений, такой как, например, технология интеллектуальных квантовых вычислений [18]. 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.

⁹Литвинцева 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.

¹⁰Ulyanov S.V., Litvintseva L.V. Soft computing optimizer of intelligent control system structures // US patent No 7,219,087 B2. – 2007.

¹¹Ulyanov S.V., Litvintseva L.V. System for soft computing simulation // US patent No 20060218108 A1. – 2006.

Технология квантовых вычислений

В квантовой логике технологии интеллектуальных квантовых вычислений и квантовой теории информации существует «парадокс» – не выполняется классический закон дистрибутивности. Этот факт отражает новые (необычные) явления в квантовой механике типа 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 приводят к «парадоксам» и трудностям физической интерпретации с позиции логики классической физики. Так, например, две подсистемы, каждая из которых находится в смешанном хаотическом состоянии (и с отличной от нуля энтропией), при слиянии в единую систему образуют чистое (с нулевой энтропией) состояние, обладающее высшим уровнем порядка (эффект квантовой самоорганизации). При этом количество информации в целой системе меньше, чем в каждой из её составляющих подсистем, а взаимная энтропия имеет отрицательное значение.

Квантовая суперпозиция, состоящая из двух классических взаимоисключающих логических состояний, позволяет образовать одно единое состояние, содержащее, например, одновременно логически противоречащие «да» и «нет» (кот Шрёдингера). Из двух классических однобитовых состояний с помощью квантовой корреляции (которая выше классической) возможно дополнительно (в зависимости от вида квантовой коммуникации) извлечь еще более одного бита. Квантовые стратегии принятия решений позволяют из двух классических игроков, не имеющих стратегий выигрыша в данной игровой ситуации, сформировать игрока-победителя («Паррандо» эффект), использующего квантовый подход к решению задачи.

Рисунок 1 демонстрирует физическое различие в определении вычислительного базиса мягких и квантовых вычислений.

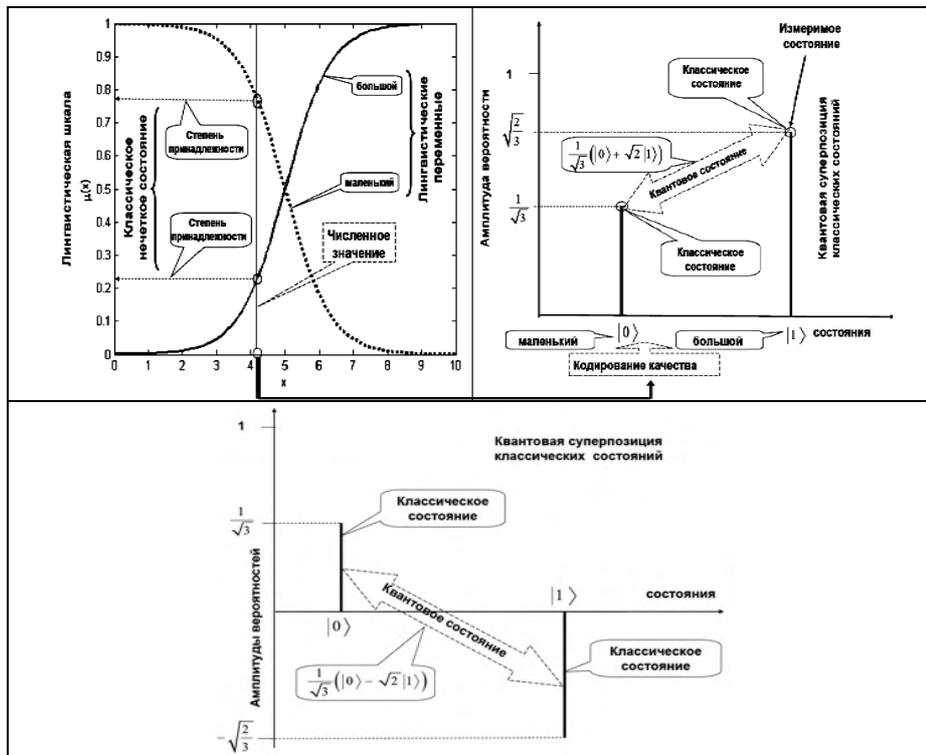


Рис. 1. Физическое различие между нечетким и квантовым состояниями

Рисунок 1 дает физическую интерпретацию значения квантовой суперпозиции (quantum superposition) с различными классическими состояниями типа

$$\frac{1}{\sqrt{3}}(|0\rangle + \sqrt{2}|1\rangle) \text{ и } \frac{1}{\sqrt{3}}(|0\rangle - \sqrt{2}|1\rangle) \text{ (quantum states), соответственно.}$$

Из представленных на рис. 1 описаний физических состояний видно, что нечеткое состояние числа имеет *два значения* функции принадлежности на шкале лингвистического описания (принцип исключения третьего не выполняется). Квантовое же состояние состоит из *двух классических состояний*, качественные характеристики которых закодированы в квантовых переменных, связанных принципом квантовой логической дополнителности. Совместное использование вычислительных базисов из рис. 1 приводит к новому виду квантовых мягких вычислений.

Таким образом, описание на квантовом языке постановок многих классических (слабо структурированных) инженерных задач (трудно решаемых на языке классической логики) позволяет найти их эффективное решение. Однако такой подход имеет ряд особенностей при практическом применении в задачах управления. В теории квантовой информации и квантовых вычислений понятию числа соответствуют понятия *наблюдаемой* и *суперпозиции* состояния наблюдаемых квантовой системы, а необратимое измерение дает одно из возможных состояний.

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

Дробное исчисление (*fractional calculus*)

Математический анализ с использованием интегро-дифференциальных операторов нецелых порядков или дробное исчисление (*fractional calculus*) имеет более, чем трехвековую историю.

Рассмотрим некоторые характерные примеры¹².

Обсудим, в частности, аналоги функций в классическом математическом анализе с точки зрения дробного математического анализа. Такие аналоги являются обобщением известных функций в классическом математическом анализе и наглядно иллюстрируют «парадоксы» дробного исчисления с точки зрения стандартной интерпретации математического анализа.

Прежде всего, рассмотрим аналог известной формулы дифференцирования для степенной функции

$$\text{порядка } n \text{ в виде } \frac{d^n x(t)}{dt^n} = k(k-1)\cdots(k-n+1) \frac{k!}{(k-n)!} t^{k-n}.$$

Анализ приведенной формулы для производной порядка n показывает, что порядок дифференцирования может быть отличным от целого. Для этого необходимо использовать Гамма-функцию, обобщающую факториальную функцию на случай нецелочисленных аргументов. Гамма-функция для целых положительных $x = n$ связана с факториалом в виде $\Gamma(n) = (n-1)!$. Выполнив замену целого порядка дифференцирования n на дробный β и вводя Гамма-функцию, получим следующую формулу дифференцирования степенной функции с дробным порядком:

$$\frac{d^\beta x(t)}{dt^\beta} = \frac{\Gamma(k+1)}{\Gamma(k-\beta+1)} t^{k-\beta}. \quad (1)$$

Так, например, для единичной функции типа $f(x) = 1$ в стандартном математическом анализе

$$\text{производная имеет вид } \frac{df(x)}{dx} = \frac{d1}{dx} = 0.$$

¹²См. Васильев В.В., Симак Л.А. Дробное исчисление и аппроксимационные методы в моделировании динамических систем. – Киев: НАН Украины, 2008.

Однако в дробном исчислении согласно (1) дробная производная имеет вид $\frac{d^\beta f(x)}{dx^\beta} = \frac{d^\beta 1}{dx^\beta} = \frac{x^{-\beta}}{\Gamma(1-\beta)}$ для всех значений β .

Выражение (1) может рассматриваться как функция трех аргументов: t , k и β и, таким образом, дает более подробное описание функции и всех ее производных и интегралов (как целого, так и дробного порядков).

В качестве иллюстрации приведем графические образы выражения (1) для случаев $k = 0$, когда порядок дифференциального оператора изменяется в пределах от -1 до $+1$.

Рисунок 2 показывает изменение дифференциала для данного случая.

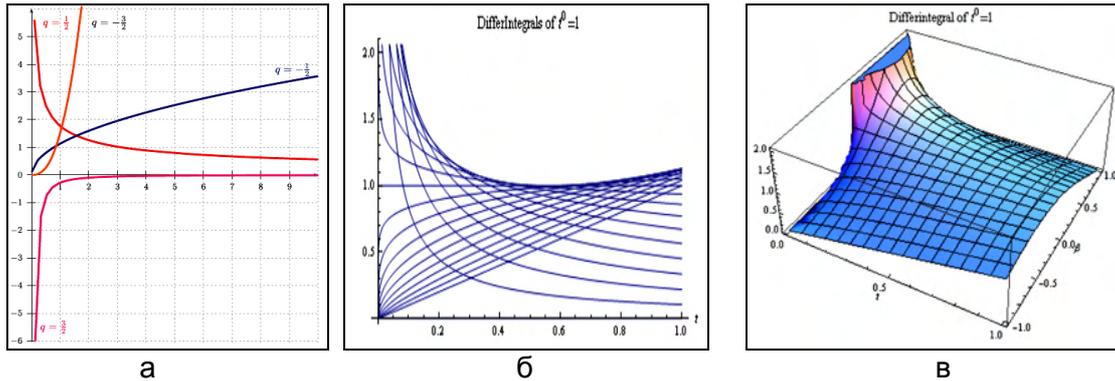


Рис. 2. Графики дифференциалов от единичной функции для различных значений $\beta = q = 1/2, 3/2, -1/2, -3/2$ (а); в пределах $-1 < \beta < +1$ (б); и изменение диффер-интеграла в 3D как функции параметров ($t, k = 0, \beta$) (в)

Для идентичной функции $f(x) = x$ имеем $\frac{df(x)}{dx} = \frac{dx}{dx} = 1$. В то время как дробная производная

$\frac{d^q f(x)}{dx^q} = \frac{d^q x}{dx^q} = \frac{x^{1-q}}{\Gamma(2-q)}$. На рис. 3 показаны графики дробных дифференциалов для различных значений $\beta = q = 1/2, 3/2, -1/2, -3/2$.

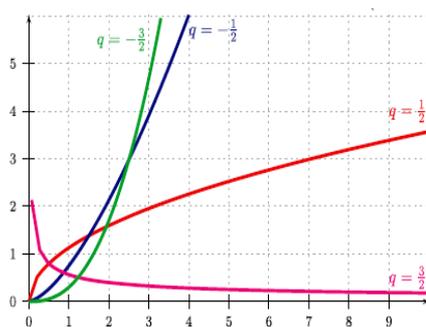


Рис.3. Графики дифференциалов от идентичной функции для различных значений $\beta = q = 1/2, 3/2, -1/2, -3/2$

Для экспоненты $f(x) = e^x$ дифферинтеграл определяется в виде $\frac{d^q e^{\pm x}}{dx^q} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^{k-q}}{\Gamma(k-q+1)}$.

На рис. 4 показаны графики рассмотренных дифферинтегралов от указанных функций.

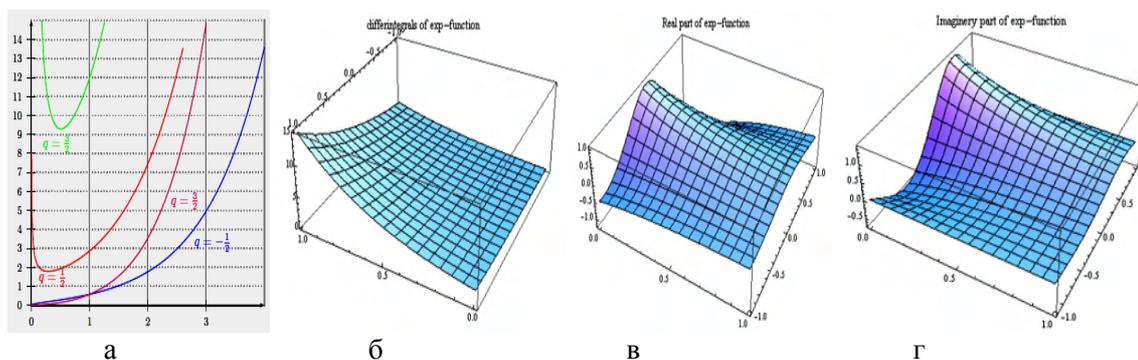


Рис. 4. Графики дифференциалов от экспоненциальной функции

Таким образом, дробное исчисление относится к обособленному разделу математического анализа и является инструментом математического моделирования сложных динамических процессов в обычных и фрактальных средах. Данный математический инструментарий позволяет на новой основе понятий производной и интеграла решать задачи анализа, синтеза, идентификации, диагностики, создания новых робастных систем управления.

Особенности квантовой логики вычислений

В классической логике выполняются законы коммутативности, ассоциативности, упорядоченности, поглощения, и имеет место дистрибутивный закон $(A + B)C = AC + BC$. Переменные A, B, C, \dots называются высказываниями. Между некоторыми парами высказываний A, B, C, \dots можно установить отношение порядка $A \leq B$ означающее, что если высказывание A истинно, то высказывание B также истинно, или высказывание B является следствием высказывания A . В квантовой логике также выполняются коммутативный и ассоциативный законы, закон упорядочения и закон поглощения. Однако закон дистрибутивности в квантовой логике, в общем случае, не выполняется. Чтобы убедиться в этом, рассмотрим три вектора A, B, C в двумерном евклидовом пространстве (рис. 5) и высказывания A, B и C , состоящие в том, что вектор ψ направлен вдоль соответствующего вектора.

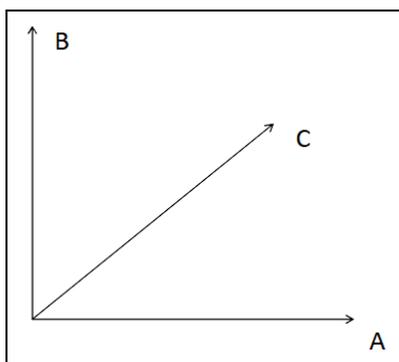


Рис. 5. Векторы A, B, C в двумерном евклидовом пространстве

Имеем $A + B = I, (A + B)C = C$. С другой стороны, $AC = \theta, BC = \theta$, где θ – абсурдное высказывание. Поэтому $AC + BC = \theta$. Таким образом, дистрибутивный закон не выполняется: $(A + B)C \neq AC + BC$. Нарушение дистрибутивности составляет основное отличие квантовой логики. Наличие данной особенности отличает квантовую логику от Аристотелевой логики¹³.

Основным объектам квантовой логики являются решетки. Допустим, что состояния некоторой системы описываются решеткой (рис. 6).

¹³ Ахизер А.И., Половин Р.В. Почему невозможно ввести в квантовую механику скрытые параметры // Успехи Физических Наук. – 1972. – Т. 107. – Вып. 3. – С. 464-487.

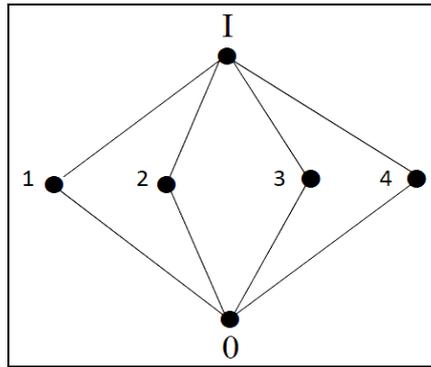


Рис. 6. Вид недистрибутивной решетки

На рис. 6 состояние 0 означает «никакое» или «ложное», состояния 1, 2, 3, 4 являются взаимоисключающими друг друга состояниями, так что состояние 1 и 2 (обозначение $1 \wedge 2$) есть 0; аналогично $1 \wedge 3 = 1 \wedge 4 = 2 \wedge 3 = 0$. I – всегда реализующееся состояние $I = 1 \vee 2 \vee 3 \vee 4$, где \vee – знак дизъюнкции, $1 \vee 2 = 1 \vee 3 = 2 \vee 3 = 3 \vee 4 = I$. Нетрудно заметить, что решетка на рис. 6 недистрибутивна: $1 \wedge (3 \vee 4) = 1 \wedge I = 1 \neq (1 \wedge 3) \vee (1 \wedge 4) = 0 \vee 0 = 0$. Другой важной особенностью данной решетки является невозможность определения на ней вероятностной меры¹⁴.

Действительно, если все состояния равноправны, то естественно приписать любому из состояний 1, 2, 3, 4 вероятность $\frac{1}{4}$, но тогда вероятность состояния $1 \vee 2$ по теореме сложения вероятностей есть $\frac{1}{2}$, однако $1 \vee 2 = I$, и, следовательно, эта вероятность равна 1. Поэтому в квантовой механике поведение динамической системы описывается не вероятностью, а амплитудой вероятности, позволяющей вычислять условные вероятности.

Рассмотрим теперь особенность логики квантовых операций на примерах классических логических операций, содержащих или состоящих из *внутренних* квантовых операций¹⁵.

Пример 1: *Операция корень квадратный из операции «отрицание»*. Рассмотрим понятие квантовый бит (кубит) $|\psi\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle \pm |1\rangle)$, который играет важную роль в квантовой теории информации. Кубит является квантовой суперпозицией двух классических состояний в виде логического базиса $(|0\rangle, |1\rangle)$. Логическая операция «НЕТ», действуя на кубит $|\psi\rangle$, является линейным оператором $\text{not}: \mathcal{C}^2 \rightarrow \mathcal{C}^2$, который действует на все логические базисы следующим образом: $\text{not}|0\rangle = |1\rangle, \text{not}|1\rangle = |0\rangle$. Соответствующее матричное представление в логическом базисе имеет вид: $\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ и является т.н. матрицей Паули σ_x . Рассмотрим теперь нелинейную операцию $\sqrt{\text{not}}$ над операцией **not**. Результат операции $\sqrt{\text{not}}$ является линейным оператором $\sqrt{\text{not}}: \mathcal{C}^2 \rightarrow \mathcal{C}^2$, который, действуя на кубит над всеми логическими базисами, приводит к следующему результату:

$$\sqrt{\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}} = \begin{pmatrix} \frac{1+i}{2} & \frac{1-i}{2} \\ \frac{1-i}{2} & \frac{1+i}{2} \end{pmatrix}, \sqrt{\text{not}}|0\rangle = \frac{1+i}{2}|0\rangle + \frac{1-i}{2}|1\rangle; \sqrt{\text{not}}|1\rangle = \frac{1-i}{2}|0\rangle + \frac{1+i}{2}|1\rangle.$$

¹⁴Гриб А.А. Квантовая логика: Возможные применения // Закономерности развития современной математики: Методологические аспекты. – М.: Наука, 987. – С. 313-317.

¹⁵Ульянов С.В. Логические и квантовые парадоксы интеллектуальных квантовых и мягких вычислений // Системный Анализ в Науке и Образовании: электрон. науч. журнал. – Дубна, 2010 – №2. [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sanse.ru/archive/20>. – 0421000111\0018.

Физически данный результат означает, что измерение выходного результата $(|0\rangle, |1\rangle)$, если входом является сигнал $|0\rangle$, дает:
$$\begin{cases} |0\rangle \text{ с вероятностью } \frac{1}{2} \\ |1\rangle \text{ с вероятностью } \frac{1}{2} \end{cases}$$

Аналогично для входа $|1\rangle$. Таким образом, оператор $\sqrt{\text{not}}$ является *случайным* переключателем. Интуитивно такой переключатель должен сохранять данное свойство, если его применить дважды. Однако это свойство не выполняется и применение дважды оператора $\sqrt{\text{not}} \sqrt{\text{not}} = \text{not}$, т.е., $\sqrt{\text{not}} \sqrt{\text{not}} |\psi\rangle = \text{not} |\psi\rangle$. Объясняется данный «парадоксальный» факт тем, что в квантовой механике при оценке эволюции вероятности квантовых переходов осуществляется по законам сложения *амплитуд вероятностей* по всем возможным путям траекторий движения, а не самих вероятностей. Амплитуда вероятностей может быть уменьшена (деструктивная интерференция) или усилена (конструктивная интерференция) в процессе суммирования амплитуд вероятностей, что существенно отличает квантовые операции от классических вероятностных операций. Операцию $\sqrt{\text{not}}$ часто именуют как «возможное («tentative»)» отрицание или «полу-отрицание (half-negation)»: применение дважды оператора $\sqrt{\text{not}}$ приводит к полному классическому логическому отрицанию **not**. Отметим, что применение оператора $\sqrt{\text{not}}$ к $(|0\rangle, |1\rangle)$ приводит к формированию квантовой суперпозиции с комплексными амплитудами вероятности. Поэтому оператор $\sqrt{\text{not}}$ является сугубо квантовым оператором, не имеющим аналогов в классической и нечеткой логике. Таким образом, операция классического логического отрицания состоит из двух внутренних квантовых операторов, реализующих конструктивную и деструктивную интерференцию амплитуд вероятностей.

Пример 2: *Корень квадратный из оператора идентичности.* Для заданного $n \geq 1$ корень квадратный из оператора идентичности на пространстве $\otimes^n \mathbb{C}^2$ (\otimes^n – знак тензорного умножения, см. ниже Приложение) является линейным оператором $\sqrt{I^{(n)}}$ таким, что для любого элемента $|x_1, \dots, x_n\rangle$ в вычислительном базисе $\mathcal{B}^{(n)}$ 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, 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 $\sqrt{\text{not}^{(n)}}$, может интерпретироваться как «возможное частное утверждение (tentative partial assertion)», преобразующее точную определенную информацию в максимально неопределенную информацию¹⁶.

¹⁶Giuntini R., Ledda A., Sergioli G., Paoli F. Some generalizations of fuzzy structures in quantum computational logic // Intern. J. General Systems. – 2011. – Vol. 40. – №1. – Pp. 61-83.

Очевидно, что применение $\sqrt{I^{(n)}}$ приводит состояние системы к максимальному беспорядку. Применение этого оператора дважды возвращает систему в исходное состояние с сохранением начальной информации об исходном состоянии. Приведенные примеры указывают на существование «скрытой» квантовой информации в классических состояниях, извлечение которой дает дополнительные возможности для формирования эффективных стратегий принятия решений на пространстве классических стратегий.

Особенности применения дробных вычислений

Отмеченная ранее особенность вычисления дробных производных и интегралов, выраженная в непривычной форме интерпретации результата, отразилась на длительности интервала времени на применении методологии дробных исчислений в практике инженерных исследований.

Вызывали трудности выбора модели дробной производной и дробного интеграла, выбор метода численного метода моделирования, определение оптимальных значений дробных показателей и коэффициентов усиления регуляторов, определения дробных случайных процессов и дифференциальных уравнений для описания модели ОУ и др.

Только в последние 20 лет данное исчисление приобрело новое интенсивное развитие в связи с появлением практических инженерных приложений. В отличие от стандартного определения производной функции от аргумента, которая определяется в данной точке, производная дробного порядка зависит от памяти предыдущих состояний. Для избежания многих «парадоксов» и необходимости иметь корректные предельные переходы к классическому определению, было предложено множество моделей интегродифференциалов, выбор которых определялся возможностями корректных схем численного интегрирования и конкретными условиями описания модели ОУ.

Выше было рассмотрено представление производной в виде прямого обобщения показателя производной на нецелочисленный случай. Рассмотрим для сравнения другой вариант определения дробной производной в виде модели Эллиотта¹⁷:

$$D_{\star}^{\alpha}y(x) = \frac{1}{\Gamma(-\alpha)} \int_0^x \frac{1}{(x-x')^{\alpha+1}} y(x') dx', \quad \alpha, x \in \mathbb{R}_+ . \tag{2}$$

Результаты численного интегрирования (1) для функций $y(x) = x$ и $y(x) = e^{-x}$ представлены на рис. 7, а, б, соответственно.

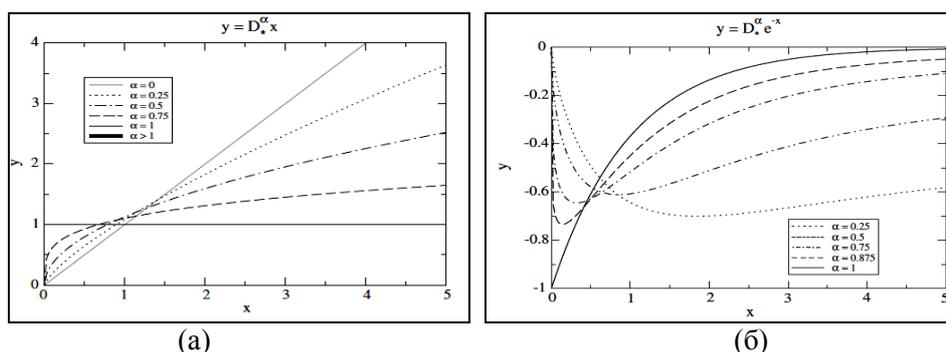


Рис. 7. Примеры вычисления дробных производных $y(x) = x$ и $y(x) = e^{-x}$

Сравнение с результатами, представленными на рис. 3 и 4, показывает существенные различия в качественном поведении вычисленных функций. В частности, на рис. 7а представлены три специальных случая: $D_{\star}^0 y(x) = x$, $D_{\star}^1 y(x) = 1$ и $D_{\star}^{\alpha} y(x) = 0 \forall \alpha > 1$, которые не противоречат ре-

¹⁷Diethelm K., Ford N.J., Freed A.D., Luchko Yu. Algorithms for the fractional calculus: A selection of numerical methods // Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. – 2005. – Vol. 194. – Pp. 743-773.

зультатам математического анализа. Промежуточные значения $\alpha = 1/4, 1/2, 3/4$ имеют плавные переходы в промежутке между значениями $\alpha = 0$ и 1, что согласуется с интуитивным представлением о качественном поведении производной. Качественное поведение производной от экспоненциальной функции имеет скачкообразный характер, стартуя из нуля, резко пересекает график стандартной производной и стремится затем к нулевому значению.

Отмеченные особенности проявляются в процессах численного интегрирования дифференциальных уравнений дробного порядка.

На рис. 8 приведен пример численного интегрирования дифференциального уравнения дробного порядка следующего вида: $D_{\star}^{\alpha} y(x) = 1 - y(x)$ при разных значениях α и разных начальных условиях.

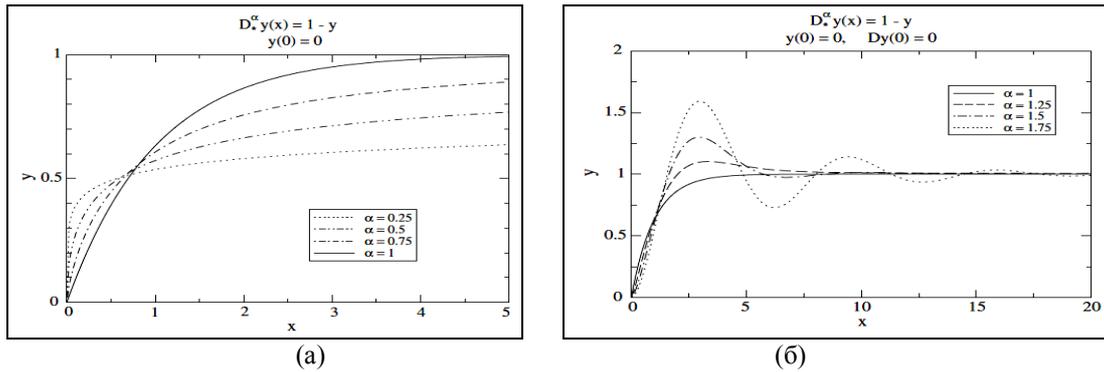


Рис. 8. Динамическое поведение системы $D_{\star}^{\alpha} y(x) = 1 - y(x)$ при различных $\alpha \in (0, 1]$ и начальных условиях $y(0) = 0$ (а) и $\alpha \in [1, 2)$ и начальных условиях $y(0) = 0, Dy(0) = 0$

При этом вид качественного поведения и математическое описание свойств самой Гамма-функции Эйлера представляют самостоятельный интерес. В общем виде Гамма-функция имеет следующий вид:

$$\Gamma(x) = \begin{cases} \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt, \operatorname{Re}(x) > 0 \\ \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n! n^{x-1}}{x(x+1)(x+2)\dots(x+n-1)}, x - \text{любое} \end{cases} \quad (3)$$

На рис. 9 и 10 представлен вид модуля Гамма-функции комплексного и Гамма-функции действительного аргументов.

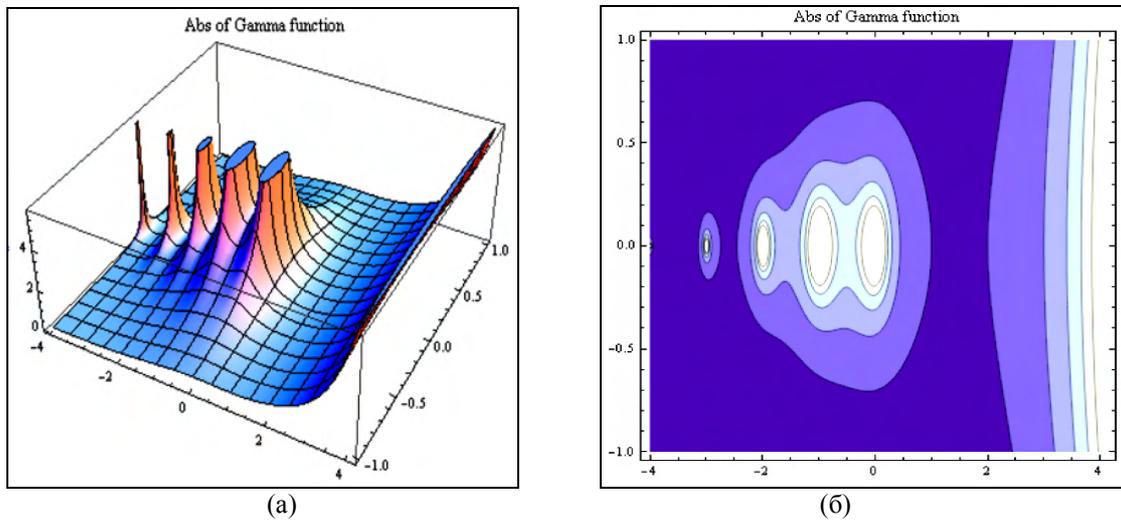


Рис. 9. Вид Гамма-функции: (а) – модуль Гамма-функции комплексного аргумента; (б) – модуль Гамма-функции комплексного аргумента (контурный график)

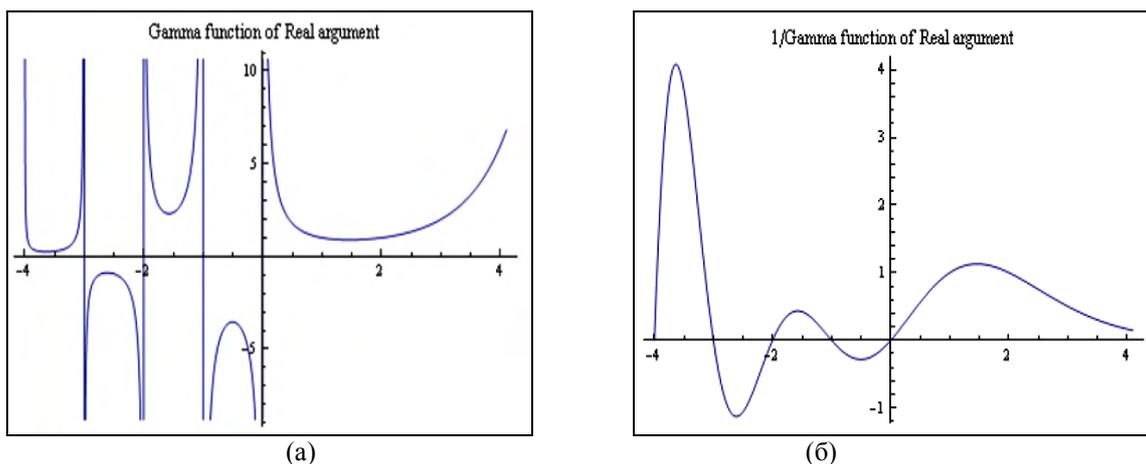


Рис. 10. Вид Гамма-функции действительного аргумента:

а – Гамма-функция действительного аргумента; б – обратная Гамма-функции действительного аргумента

На рис. 10, а видно, что Гамма-функция претерпевает разрывы вида $\pm \infty$ в нуле и при целых отрицательных значениях аргумента. Однако, в дробном анализе чаще всего встречаются значения Гамма-функции в степени (-1) или отношения Гамма-функций различных аргументов, которые являются непрерывными функциями на множестве рассматриваемых значений аргументов.

Для примера на рис. 10, б показан вид функции $1/\Gamma(x)$, которая является непрерывной функцией. Таким образом описание и моделирование ОУ существенно зависит от модели дробной производной, начальных условий, метода интегрирования, выбранного порядка производной и т.п. Практика применения данного исчисления, например, в задачах робастного управления, показала его эффективность, что привело к планомерному его исследованию в задачах теории и систем управления.

Дробные вычисления в задачах интеллектуального робастного управления

Применение методов дробного исчисления в задачах робастного управления дали возможность повысить качественные характеристики процессов управления. Так, например, на рис. 11 показан переходной процесс ПИД-регулятора и дробного ПИД-регулятора на ступенчатое воздействие¹⁸.

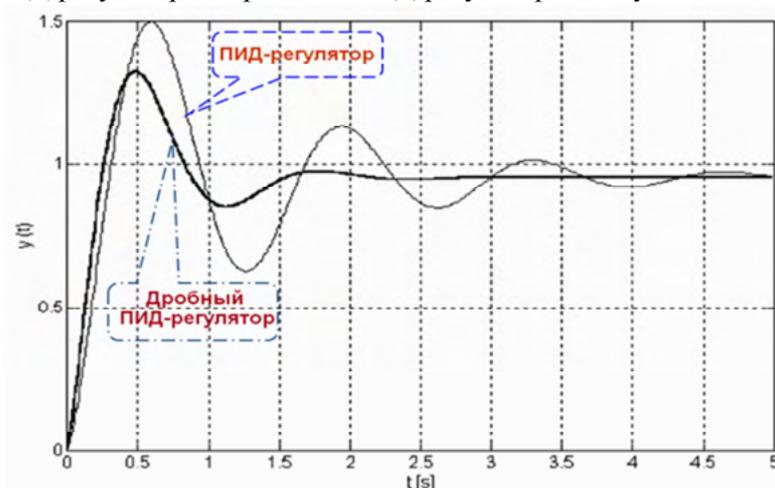


Рис. 11. Сравнение переходных процессов ПИД-регулятора и дробного ПИД-регулятора на ступенчатое воздействие

¹⁸ Mata de Oliveira Valerio D. P., Ninteger v. 2.3 Fractional control toolbox for MatLab: User and programmer manual. – Madrid: UNIVERSIDADE TECNICA DE LISBOA INSTITUTO SUPERIOR TECNICO. – 2005.

Нетрудно заметить, что динамические характеристики дробного ПИД-регулятора (перерегулирование, время переходного процесса, точность, ошибка управления) значительно лучше традиционного ПИД-регулятора. Однако форма дробного интегро-дифференциального исчисления приводит к новым трудностям разработки методов аналитического и численного исследования таких регуляторов. Достаточно отметить здесь, что применение дробного исчисления к структуре традиционного ПИД-регулятора типа

$$PID = \underbrace{k_p + k_D s + k_I s^{-1}}_{\text{Частотная область}} = \underbrace{k_p e + k_D \dot{e} + k_I \int e(\tau) d\tau}_{\text{Временная область}}$$

существенно изменяет структуру регулятора, например, для $P I^{-q_2} D^{q_1}$ и $q_1 = \frac{1}{2}, q_2 = -\frac{1}{2}$ имеем

$$P I^{-\frac{1}{2}} D^{\frac{1}{2}} = \underbrace{k_p + k_D s^{+q_1} + k_I s^{-q_2}}_{\text{Частотная область}} \Leftrightarrow \underbrace{k_p(t)e + k_D(t) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{\dot{e}(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau + k_I(t) \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \frac{e(\tau)}{\sqrt{t-\tau}} d\tau}_{\text{Временная область}} .$$

В теории и проектировании систем управления на основе дробных вычислений эффективно используются также необычные для традиционных структур регуляторов такие как $I^{-q_2} D^{q_1}$, т.е. дробные интегро-дифференциальные регуляторы¹⁹.

На рис.12 показано сравнение динамического поведения дробного $I^{-q_2} D^{q_1}$ регулятора с поведением дробного PI (ПИ), PI (ПИ) и PID(ПИД) на ступенчатое возмущение. Из результатов сравнения динамических характеристик видно превосходство $I^{-q_2} D^{q_1}$ регулятора. В то же время ПИД-регулятор дробного порядка теперь имеет пять параметров $\{k_p, k_D, k_I, q_1, q_2\}$ и позволяет существенно расширить область поиска оптимальных параметров по сравнению с традиционным ПИД-регулятором для достижения области робастности ИСУ.

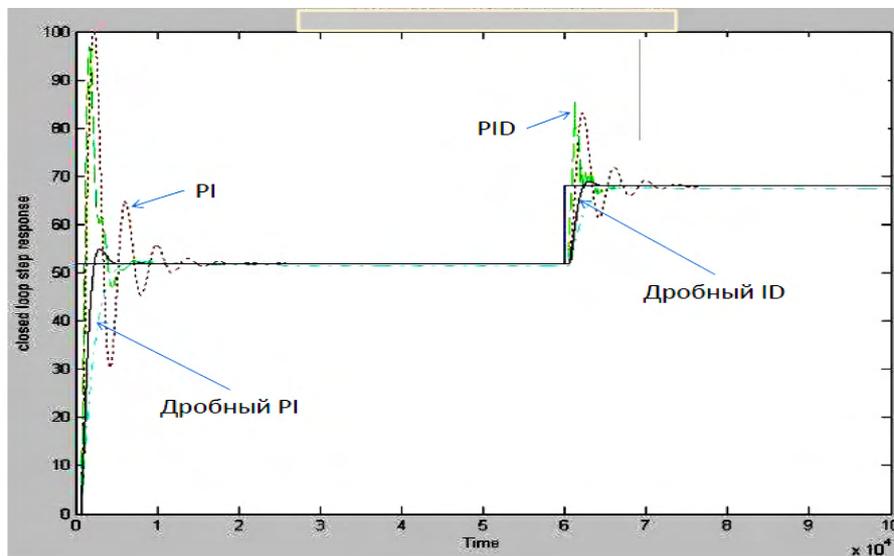


Рис. 12. Сравнение динамического поведения дробного $I^{-q_2} D^{q_1}$ регулятора с поведением дробного PI (ПИ), PI (ПИ) и PID(ПИД) на ступенчатое возмущение

Использование мягких и квантовых вычислений в сочетании с моделями дробных регуляторов с нечеткими регуляторами, со скользящим режимом, нечетких H_2 / H_∞ – регуляторов, а также методов PSO (particle swarm optimization) и др. расширяет возможности процессов проектирования робастных ИСУ.

¹⁹Ahn H.-S., Bhambhani V., Chen Y. Fractional-order integral and derivative controller for temperature profile tracking // Sadhana. – 2009. – Vol. 34. – Pt. 5. – Pp. 833-850.

На рис. 13 показано сравнение динамического поведения H_∞ – оптимального дробного ПИД-регулятора спроектированного методом PSO с H_2 / H_∞ – регулятором и H_∞ – регулятором²⁰.

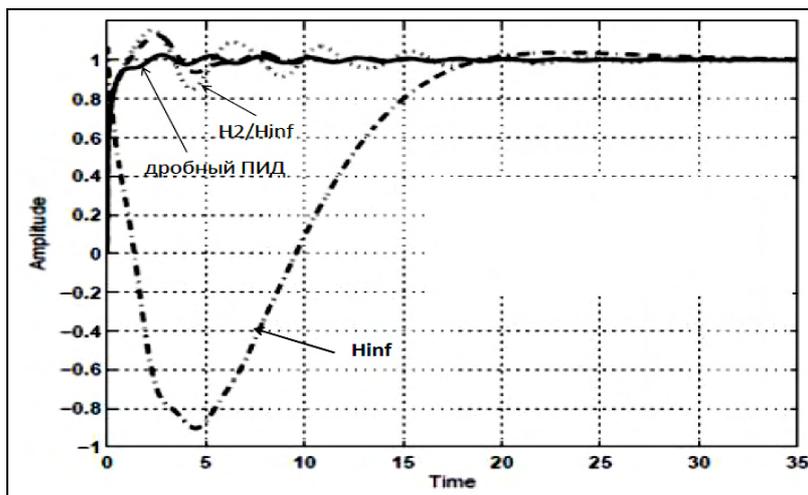


Рис. 13. Сравнение динамического поведения H_∞ – оптимального дробного ПИД-регулятора с H_2 / H_∞ -регулятором и H_∞ -регулятором

Из результатов сравнения следует преимущество H_∞ – оптимального дробного ПИД-регулятора.

Данные и другие типы регуляторов, а также смежные вопросы дробного исчисления и их совместное использование с интеллектуальными вычислениями рассмотрены ниже.

Роль квантовых алгоритмов в задачах интеллектуального робастного управления

Квантовые вычисления и алгоритмы, в отличие от классических аналогов, в первую очередь позволяют непосредственно определить качественные свойства исследуемой функции, кодируя их в начальных квантовых состояниях суперпозиции. Для поиска решения с помощью квантовых алгоритмов (КА) целенаправленно изменяют исходную суперпозицию начальных состояний, в которой закодировано искомое решение, применяя последовательно соответствующие типы квантовых операторов. В этом случае может быть использован алгебраический формализм. Применяемый алгебраический формализм поддерживается абстрагированием логического вывода относительно квантовых эффектов и отображает важнейшие квантовые эффекты программным путем, устраняя трудность аппаратной реализации, такую как декогерентность. Поэтому в квантовых вычислениях и моделях КА особую роль играет выбор модели квантовых операторов.

Отметим, что если операторы ГА описаны и достаточно хорошо известны, имеют четкую физическую интерпретацию по аналогии с биологическими механизмами эволюции естественного отбора Дарвина, то операторы КА менее известны в инженерных приложениях и требуют более детального рассмотрения физической интерпретации и математической формализации квантовых вычислений. На рис. 14 приведено сравнение операторов ГА и КА.

²⁰Zamani M., Karimi-Ghartemani M., Sadati N. FOPID controller design for robust performance using particle swarm optimization // Fractional Calculus and Applied Analysis: Intern. J. Theory and Applications. – 2007. – Vol. 10. – №2. – Pp. 169-187.

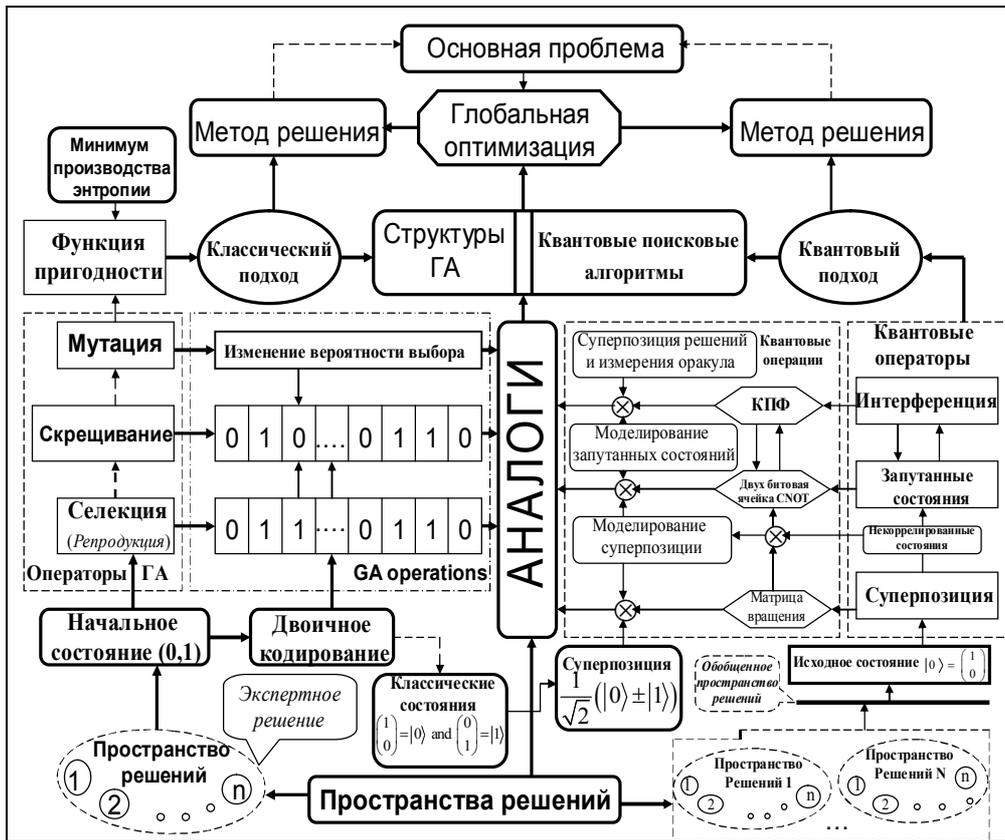


Рис. 14. Сравнение структур ГА и КА

Из функциональной структуры ГА на рис. 14 видно, что по определению пространство поиска решений фиксировано и задается экспертом, а также фиксируется выбором функции пригодности, которая рассматривается как критерий оптимальности управления. Мнение эксперта проявляется в общем случае в его опыте корректного задания пространства поиска ГА, знании вида функции пригодности и гарантии нахождения искомого решения в заданном пространстве.

В КА все возможные пространства решений объединяются оператором суперпозиции в единое обобщенное пространство, и автоматически гарантируется нахождение искомого решения в обобщенном пространстве.

Рассмотрим кратко некоторые особенности квантовых операторов, составляющих основу КА, а также физическую интерпретацию результата действия от применения квантовых операторов.

Структура квантовых вычислений и КА

В теории квантовых вычислений можно выделить два направления исследований:

- задано множество точек функционала $S = \{(x, y)\}$, необходимо найти вид такого оператора U , чтобы выполнялось условие $y = U \cdot x$;
- задана проблема (КА), необходимо найти вид квантовой схемы – квантовой алгоритмической ячейки (КАЯ), решающей заданную проблему (реализующей данный КА).

Алгоритмы решения данных задач могут быть реализованы как на аппаратных средствах в виде КАЯ, так и на программном уровне с помощью соответствующего программного инструментария (toolkit) и с реализацией на классическом компьютере в МАТЛАБ.

Возможность²¹ эффективного моделирования КА на классическом компьютере используется в данной статье для моделирования КА.

²¹Ulyanov S.V. Design and simulation technology of quantum algorithmic gates in MATLAB: Vols I; II. – М.: VNIIGeosystems. – 2011; 2012.

Фундаментальный результат теории квантовых вычислений заключается в том, что все операции (подобно классическому случаю) могут быть реализованы схемой, состоящей из универсальных базисных элементов. Однако, в отличие от классического аналога, КАЯ могут быть выполнены на различных классах универсальных элементов в зависимости от используемого вычислительного базиса. КАЯ (с фиксированными вычислительными и измерительными базисами) обеспечивают описание эволюции некоторого унитарного оператора U , которому соответствует квантовый вычислительный процесс (обозначения в Приложении 1):

$$|\psi_{fin}\rangle = U|\psi_{in}\rangle, \tag{4}$$

где вектор (волновая функция) $|\psi_{in}\rangle$ задает начальные условия вычислений (решаемой проблемы), а $|\psi_{fin}\rangle$ отражает результат вычислений за счет действия оператора U на начальное состояние $|\psi_{in}\rangle$. На рис. 15 показана типовая структура КА.



Рис. 15. Обобщенная структура КА

Выбирая различный вид оператора U (в частности, Гамильтониан), можно сформировать различные модели квантовых вычислений.

В общем виде модель квантовых вычислений состоит из пяти этапов:

- приготовление начального (классического или квантового) состояния $|\psi_{in}\rangle$;
- выполнение преобразования Адамара H для начального состояния с целью подготовки состояния суперпозиции;
- применение оператора запутанных состояний или оператора квантовой корреляции (квантового оракула) к суперпозиционному состоянию;
- применение оператора интерференции;
- использование оператора измерения для результата квантовых вычислений $|\psi_{fin}\rangle$.

Таким образом, система моделирования квантовых вычислений и КА реализуется на классических компьютерах с применением КАЯ. Процесс проектирования КАЯ в матричной форме заключается в проектировании трех квантовых операторов: суперпозиции (Sup), квантовой корреляции (запутанных состояний – entanglement U_F) и интерференции (Int) и составляют основу структур КА.

В общем виде структура КАЯ может быть представлена в виде:

$$КАЯ = \left[(Int \otimes^n I) \cdot U_F \right]^{h+1} \cdot \left[{}^n H \otimes^m S \right], \tag{5}$$

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

Одной из особенностей процесса проектирования (5) является выбор типа оператора U_F , физически описывающий тип квантовой корреляции и закодированные в суперпозиции качественные свойства исследуемой функции f .

Работа квантовых операторов осуществляется в итеративном режиме в зависимости от типа КА. При этом для общего случая предполагается, что определенные вычислительные проблемы могут быть решены на квантовом компьютере более эффективно (с меньшей вычислительной сложностью, так называемая NP -проблема), чем на классическом компьютере. Более того, с помощью эффективного применения квантового компьютера достигаются решения алгоритмически не разрешимых (на классическом уровне) проблем.

Таким образом, существуют эффективно решаемые с помощью применения КА задачи, для которых не существует ни одного успешного классического (рандомизированного) алгоритма.

Эти наблюдения свидетельствуют о том, что КА составляют физически обоснованный базис не только техники ускорения вычислений, но и поиска решений сложных проблем, используя такие квантовые законы, как суперпозиция (для расширения пространства возможных решений), квантовый параллелизм процессов вычислений (в интересах ускорения поиска решений) и квантовая интерференция (с целью извлечения искомого решения).

Так, например, тензорное произведение является обобщением билинейной операции произведе-

ния матриц: $A \otimes \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \times a & A \times b \\ A \times c & A \times d \end{pmatrix}$ и имеет следующие свойства:

$$\begin{aligned} (a) \text{ Ранг}(A \otimes B) &= \text{Ранг}(A) + \text{Ранг}(B); \\ (b) \text{ Размерность}(A \otimes B) &= \text{Размерность}(A) \times \text{Размерность}(B). \end{aligned} \quad (6)$$

Таким образом, с помощью тензорного произведения можно экспоненциально расширить рабочее пространство вычислений и сформировать *базис для параллельных вычислений*. В этом смысле суперпозиция выступает как первый этап на пути организации *квантового параллелизма*.

Дополнительно к отмеченным вычислительным ресурсам, квантовая корреляция рассматривается как новый физический вычислительный ресурс, позволяющий резко увеличить успешный поиск решений проблем ранее не рассматриваемых в классической области вычислений. К таким проблемам относятся: телепортация, сверхплотное кодирование, передача данных по квантовым каналам связи с повышенным уровнем секретности и защиты (от несанкционированного доступа или подслушивания), коррекция квантовых кодов с заданным уровнем толерантности и др.

Квантовые алгоритмы (КА) основаны на физических законах теории квантовых вычислений, а именно в вычислениях участвуют унитарные, обратимые квантовые операторы. В общем виде КА, согласно рис. 15, состоит из трех основных унитарных операций: суперпозиция; квантовая корреляция (квантовый оракул или запутанные операторы) и интерференция. Четвертый оператор, оператор измерения результатов квантовых вычислений, является необратимым (классическим). Квантовые вычисления, основанные на перечисленных типах операторов, относятся к новому виду интеллектуальных вычислений.

КА в задачах интеллектуального робастного управления

Одним из основных назначений и преимуществ эффективного применения ИСУ является возможность гарантированного достижения цели управления с максимальным качеством управления на верхнем уровне и минимальным расходом полезного ресурса системы «*объект управления (ОУ) + регулятор*» на нижнем (исполнительском) уровне иерархической системы автоматического управления (САУ).

На содержательном уровне данная возможность отражает назначение целенаправленной деятельности ИСУ в общем случае непредвиденных ситуаций управления. При этом эффективность применения ИСУ зависит от уровня интеллектуальности разработанной системы.

Важную роль при формировании уровня интеллектуальности САУ играет выбор используемого инструментария технологии интеллектуальных вычислений для проектирования соответствующей БЗ при заданной цели управления.

Положительные результаты применения классических технологий интеллектуальных вычислений (типа мягких вычислений) совместно с аппаратом квантовых вычислений привело к новому альтернативному подходу – применению технологии квантовых интеллектуальных вычислений в задачах оптимизации процессов управления классическими ОУ (физический аналог применения обратного метода исследования «квантовая система управления – классический ОУ»). Такой подход также существенно расширяет возможности самих интеллектуальных вычислений. Рассмотрим классификацию КА. С точки зрения функциональных возможностей КА классифицируются на две группы: алгоритмы принятия решений и поисковые алгоритмы.

Классификация КА и их применение в задачах управления отражены на рис. 16.

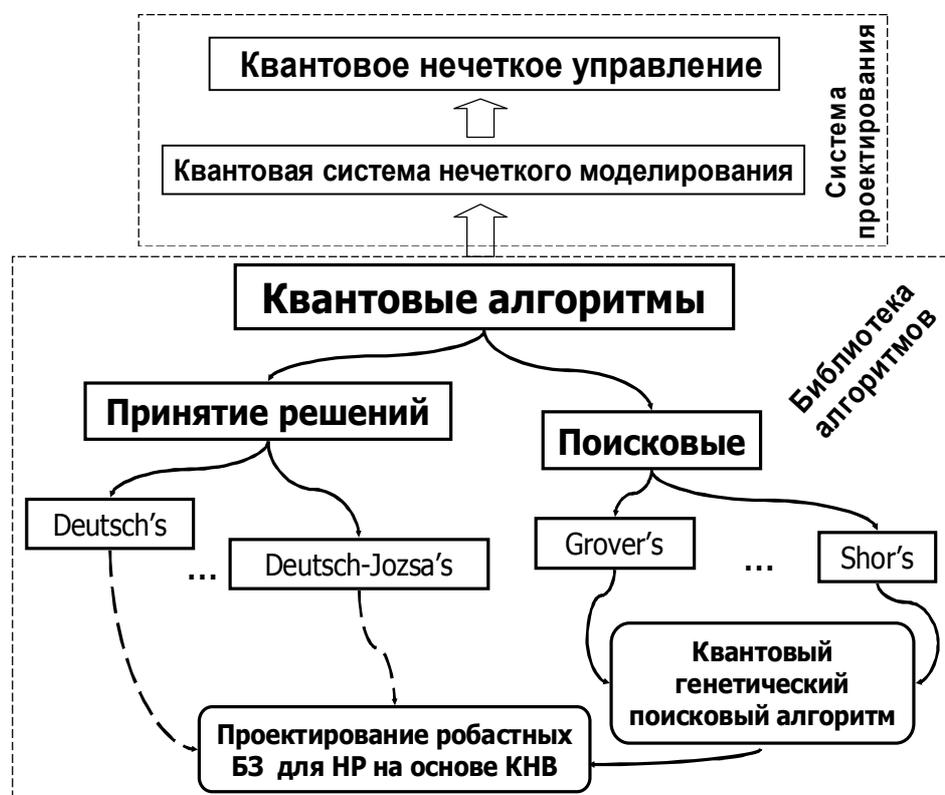


Рис. 16. Классификация КА

Аналогии между мягкими и квантовыми вычислениями приведены на рис. 17.

Особенности эффекта существования «скрытой» квантовой информации в классических состояниях, извлечение которой дает дополнительные возможности для формирования эффективных интеллектуальных процессов управления в условиях риска и непредвиденных ситуаций управления за счет квантовой корреляции, включаются в структуру информационной технологии проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ.



Рис. 17. Аналогии мягких и квантовых вычислений

Физическая интерпретация данных особенностей и механизма извлечения скрытой квантовой информации требует дополнительного подробного описания. Здесь остановимся на предварительном описании структуры информационной технологии проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ, ее особенностях и решаемых задачах.

Структура и задачи информационной технологии проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ в MATLAB

В данном разделе обсуждается методология и основы информационной технологии проектирования самоорганизующихся ИСУ. Алгоритмический базис такой технологии составляет КА формированием и управлением самоорганизацией БЗ.

Квантовая самоорганизация БЗ

Под процессом самоорганизации робастных БЗ понимается процесс проектирования робастных сигналов адаптивного управления параметрами (коэффициентами усиления) исполнительных устройств, формирующих управляющую силу ОУ на основе реакции продукционных правил ранее спроектированных (на заданные ситуации управления) робастных БЗ, например, нечетких ПИД-регуляторов на ошибку управления в условиях неопределенности новой исходной информации и непредвиденных ситуаций управления.

Проектируемый процесс самоорганизации реализуется в реальном времени за счет извлечения дополнительной квантовой информации и редукции избыточной информации, скрытой в классических состояниях процесса управления. Квантовый нечеткий вывод (КНВ), разработанный ранее на основе четырех фактов из квантовой теории информации, является частным случаем разработанного алгоритма самоорганизации [18]. На структурном уровне организации ИСУ осуществляется объединение спроектированных ранее конечного числа БЗ совместно с моделью КНВ в один блок квантового ИР. Это объединение 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.

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

Результатом работы алгоритма управления самоорганизацией БЗ является проектирование (в реальном времени) робастного сигнала управления параметрами соответствующих исполнительных устройств, формирующих управляющую силу ОУ в условиях непредвиденных ситуаций управления.

Во избежание недоразумений в интерпретации процесса самоорганизации, отметим также, что физически по определению «самосборка» и «самоорганизация» являются разными понятиями. Процесс «самосборка» отличается от процесса «самоорганизация» отсутствием в общем виде в процессе «самосборка» предварительного выбора типа корреляции между невязанно связанными элементами («строительными блоками»). Процесс «самоорганизация» осуществляется за счет локальных взаимодействий и внешних (в общем случае случайных) воздействий. Управление выбором (типа и вида) квантовой корреляции между «строительными блоками» в процессе «самосборка» определяет вид синергетической кооперации в формируемой за счет самоорганизации структуре.

Поэтому введение управления выбором корреляции позволяет учитывать в формируемых структурах синергетику целенаправленных кооперативных эффектов из ограниченного числа «строительных блоков» и составляет основу процесса самоорганизации. Дополнительные физические аспекты самоорганизации, детали и технические подробности управления самоорганизацией описаны ниже.

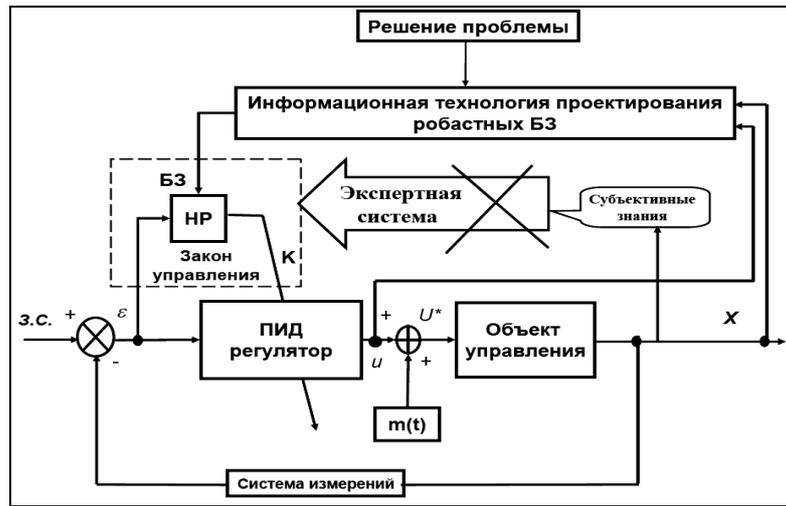
Решение данной задачи непосредственно связано со следующей (трудной и принципиально важной для теории и систем управления) проблемой: *определение роли и влияния аналогов квантовых эффектов на повышение уровня робастности проектируемых ИСУ*. Данная проблема решается информационной технологией проектирования робастных ИСУ на основе КА самоорганизации БЗ в непредвиденных ситуациях управления и информационного риска.

Особенности разработки структуры информационной технологии и процессов проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ в MATLAB

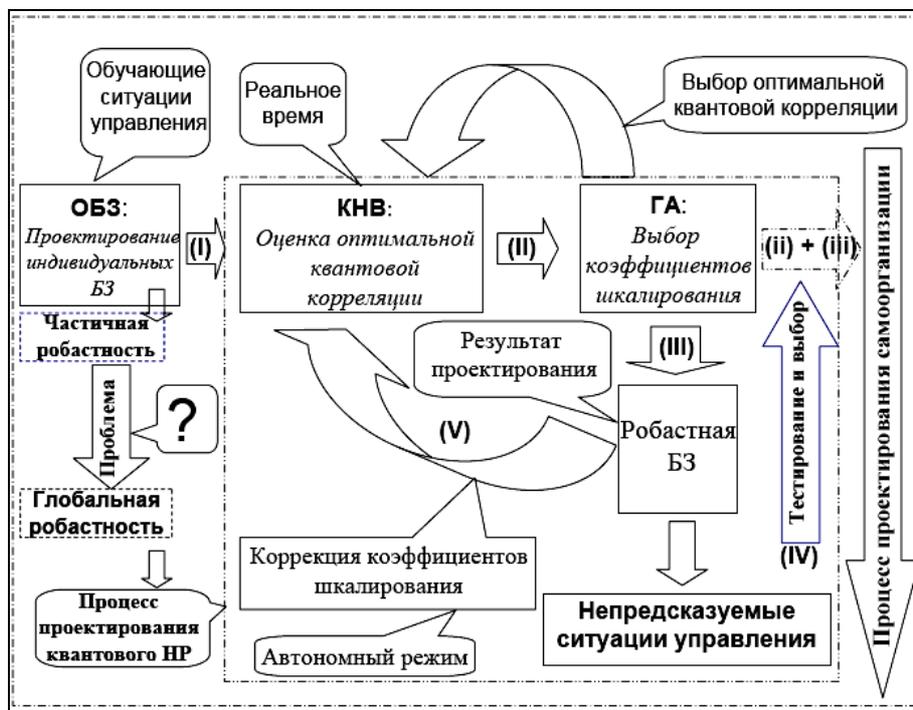
Уровни самоорганизации в иерархии когнитивных эволюционных процессов управления были проанализированы с точки зрения интеллектуальной системной инженерии (Intelligent System of Engineering Systems) как новой прикладной ветви теории искусственного интеллекта. Было показано, что для гарантированного достижения цели управления законы управления изменением коэффициентов усиления (coefficient gain schedule), например, нечеткого ПИД-регулятора должны проектироваться на основе дополнительно извлеченных знаний, позволяющих распознавать физические особенности и информационные ограничения на ОУ. Извлеченные знания используются для самоорганизации данного ОУ при достижении цели управления в конкретной ситуации управления. Решение поставленной задачи осуществляется на основе технологии мягких и квантовых вычислений.

Рисунок 18, а показывает типовую структуру ИСУ и описывает проблему проектирования объективной БЗ. На рис. 18, б представлена структурная схема информационной технологии. Отражены также этапы проектирования объективной БЗ для робастных ИСУ, основанных на новых видах интеллектуальных вычислений.

Согласно рис. 18, б центральным моментом эффективного применения технологии процессов извлечения, обработки и сжатия ценной информации для формирования активных знаний в виде робастных БЗ является применение *структурированного* случайного поиска (на основе технологии мягких вычислений, Этап 1 – формирование конечного множества индивидуальных БЗ в конкретных ситуациях управления с обучением). Использование в разработанном алгоритме *квантовых стратегий управления самоорганизацией* знаний составляет сущность Этапа 2, на котором на основе *квантового нечеткого вывода* (КНВ) осуществляется самоорганизация активных (в реальном времени) знаний из реакций спроектированных индивидуальных БЗ на новую непредвиденную ситуацию управления.



(а)



(б)

Рис. 18. Проектирование робастных БЗ в условиях непредвиденных ситуаций управления: а – проблема проектирования БЗ; б – структура технологии и этапы проектирования

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

Отметим, что выходной сигнал из НР на рис. 18, а 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.

На рис.18, а перечеркнутый блок «Экспертная система» означает, что разработанная технология проектирования робастных БЗ не использует экспертные субъективные оценки продукционных правил в БЗ, которые появляются при интерпретации экспертами результатов измерения и наблюдения выходного сигнала X из ОУ. Объективно измеренный сигнал X является исходной информацией для эксперта, оценка которого экспертом при построении БЗ носит в общем случае (например, при

большой размерности) субъективный характер. Применение технологии интеллектуальных вычислений позволяет использовать непосредственно результаты измерений и извлекать из них знания без субъективной интерпретации за счет применения функций пригодности в ГА.

Поэтому задачей технологии проектирования (обозначенной на рис.18, а и структурно представленной на рис.18, б) является формирование объективных робастных БЗ в ИСУ для непредвиденных ситуаций управления.

На рис. 18 (и ниже), а также далее по тексту, используются следующие обозначения: з.с. – задающий сигнал (цель управления); $u(t)$ – управляющая сила; $m(t)$ – случайные шумы (возмущения на ОУ), воспроизводимые формирующими фильтрами; U^* – управляющая сила с наложенным шумом; X – выходной сигнал ОУ; ε – ошибка управления; $K(t)$ – коэффициенты усиления ПИД-регулятора; ГА – генетический алгоритм; НР – нечеткий регулятор; КНВ – квантовый нечеткий вывод; ОБЗ – оптимизатор баз знаний; ГИОС – глобальная интеллектуальная обратная связь; КА – квантовый алгоритм; ОУ – объект управления. Отметим также, что на рис. 18, а пунктирная рамка блока «Закон управления» не охватывает ПИД-регулятор, хотя управляющий сигнал u формируется именно этим устройством.

Подчеркнем, что законы формирования управляющей силы $u(t)$ следуют из структуры ПИД-регулятора и хорошо известны. Этот факт является достоинством ПИД-регуляторов. Менее известны решения формирования во времени оптимальных законов управления коэффициентами усиления ПИД-регуляторов, несмотря на достаточно большое количество публикаций результатов (известно более 85 патентов по формированию законов управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора). Поэтому методологически в данной 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), H_2 / H_∞ управление, μ – синтез и др. были исследованы автором данной статьи и показано, что они также эффективно проектируются разработанной технологией, представленной на рис. 19.



Рис. 19. Структура реализации информационной технологии проектирования робастных интеллектуальных регуляторов

Простота физической реализации спроектированных законов управления для исполнительного уровня совместно с повышенным «уровнем интеллектуальности» дает необходимый технический эффект: *не разрушение исполнительного уровня с гарантированной эффективностью и надежностью управления за счет повышения уровня его интеллектуальности.*

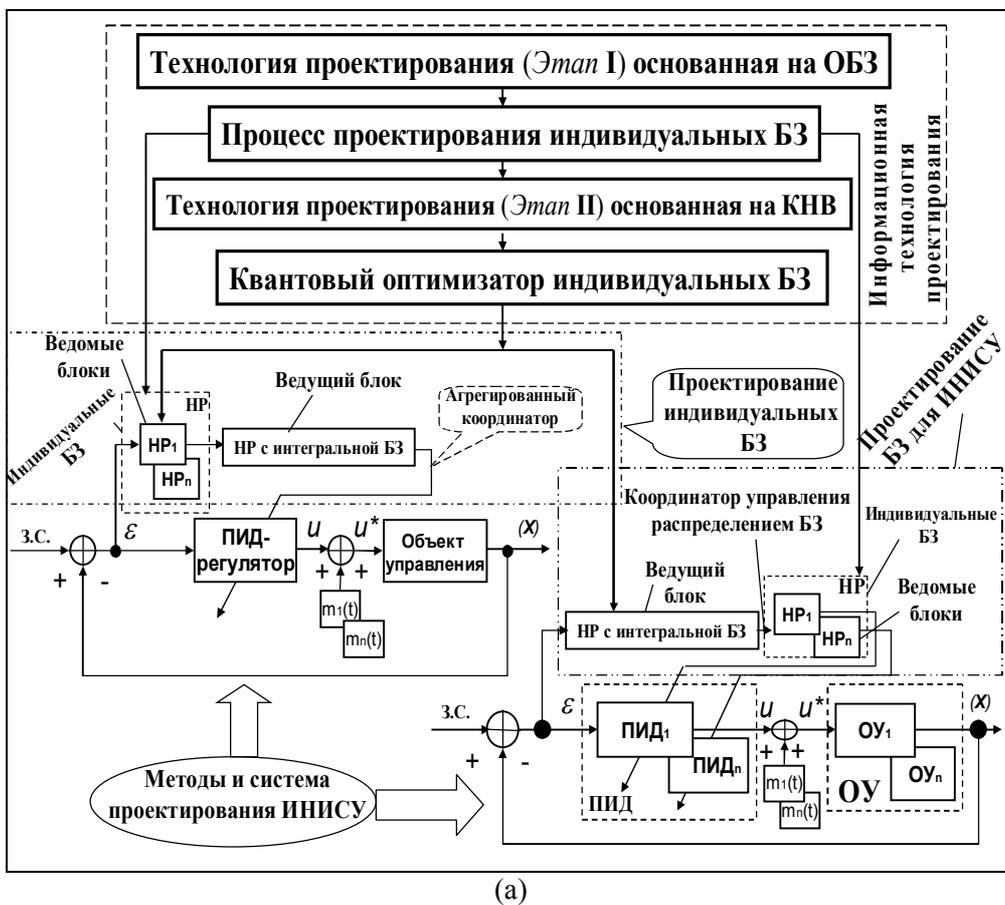
Отметим и кратко опишем основные этапы информационной технологии проектирования робастных БЗ, представленной на рис. 18, б. На первом этапе (I) проектирования с помощью технологии мягких вычислений (блок ОБЗ) формируется конечное множество БЗ для конкретных ситуаций управления, отмеченные на рис. 18, б выноской «Обучающие ситуации управления». На данном этапе решается задача формирования частичной робастности ИСУ, при которой ИСУ выполняет задачи управления для заданного класса ситуаций управления. Вопрос формирования свойства глобальной робастности ИСУ (обозначен на рис. 18, б выноской вопроса) составляет проблему, которую решает данная информационная технология проектирования.

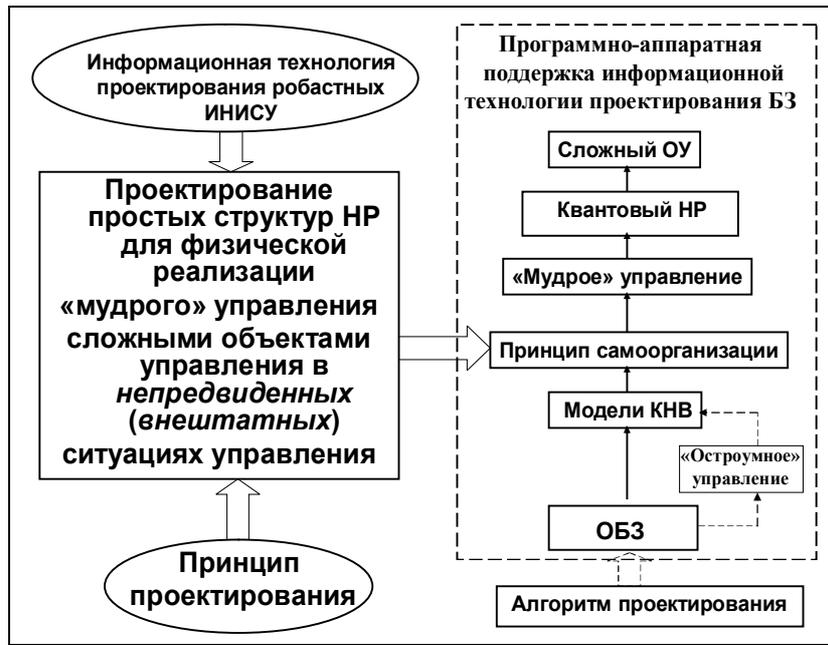
Последовательный переход (от частичной к глобальной робастности) приводит к процессу проектирования квантового НР с использованием квантовых стратегий в нечетком логическом выводе (в виде КНВ, обозначенный соответствующей выноской на рис. 18, б).

Реализация данного перехода осуществляется на этапах (II), (III) и (IV), соответственно.

После получения результатов работы КНВ блок ГА формирует коэффициенты «шкалирования» для обобщенных коэффициентов усиления ПИД-регулятора. Результаты (ii) ∈ этапу (II) и (iii) ∈ этапу (III). Остальные подэтапы процесса проектирования показаны соответствующими выносками на рис. 18, б, интерпретация которых представлена ниже.

В результате процесс реализации самоорганизации робастных БЗ в непредвиденных ситуациях управления реализуется суммарным действием перечисленных этапов проектирования, что отражено на рис. 20.



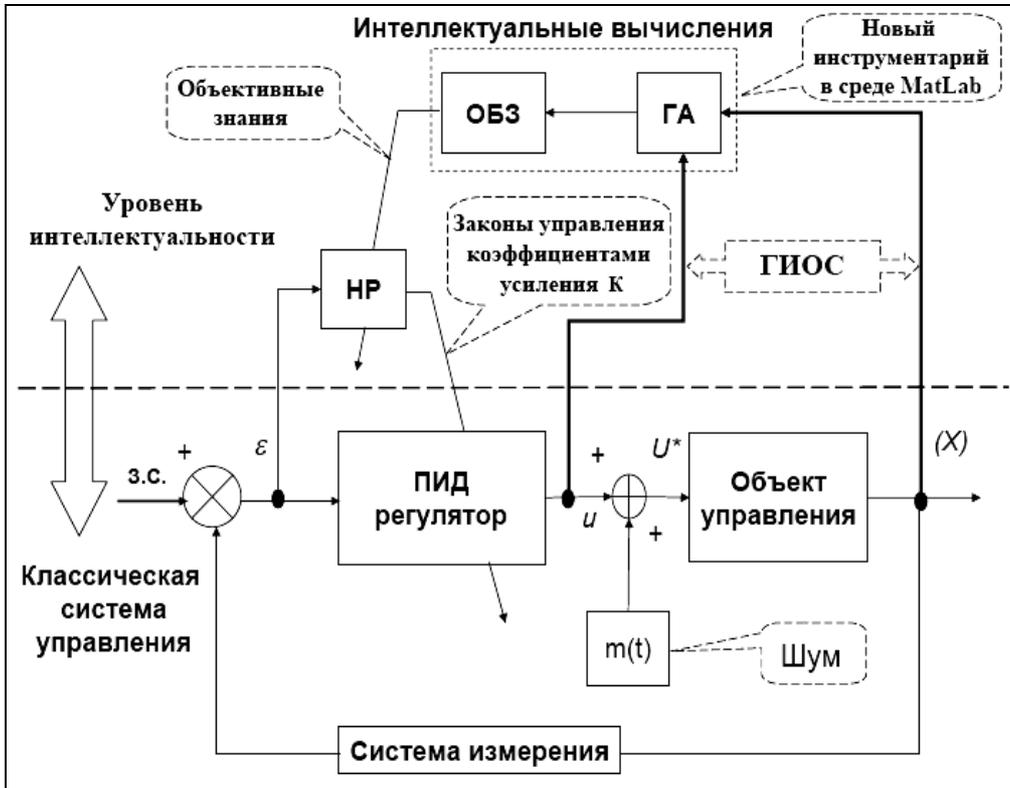


(б)

Рис. 20. Структура информационной технологии проектирования робастных ИСУ (а) и информационных потоков в алгоритме процессов проектирования (б)

Процессы проектирования робастных БЗ на основе информационной технологии, представленной на рис. 20, а, включает структуры ИСУ.

Более конкретно структуры робастных автономных ИСУ, основанных на разработанной технологии проектирования (см., рис. 18, б), показаны на рис. 21.



(а)

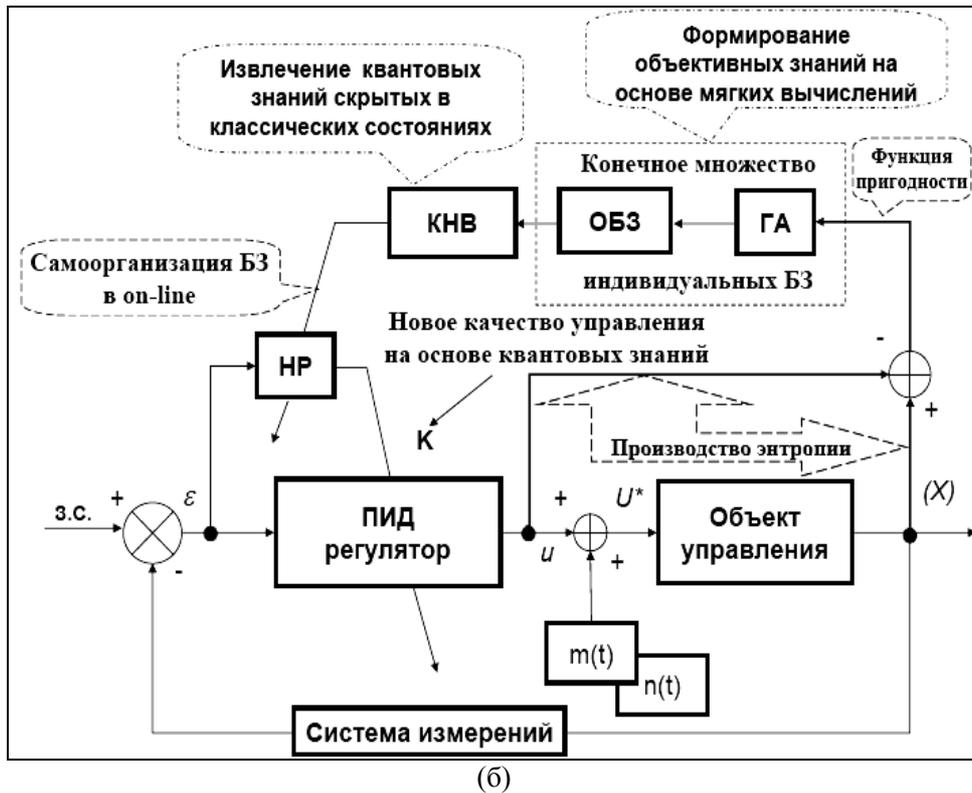


Рис. 21. Структуры ИСУ с оптимизаторами БЗ (ОБЗ) на интеллектуальных вычислениях: а – структура ИСУ с ОБЗ на мягких вычислениях; б – структура ИСУ с ОБЗ на квантовых вычислениях

Отметим некоторые особенности обозначений на рис. 21.

Двусторонняя стрелка «Производство энтропии» на рис. 21, б означает процесс вычисления производства энтропии сигналами X и u , что эквивалентно наличию блока вычисления «Производство энтропии» в обеих связях. Производство энтропии рассматривается в ГА как одна из компонент функции пригодности (критерий минимума обобщенной энтропии) и является термодинамической величиной. Поэтому в сумматоре на рис. 21 выполняется корректная операция с физически однородными переменными (в соответствии с законами термодинамики открытых систем).

В модели КНВ на рис. 21, б осуществляется извлечение квантовых знаний, скрытых в классических состояниях, полученных на выходе блока «Формирование объективных знаний на основе мягких вычислений». В непредвиденных ситуациях управления КНВ на основе реакций продукционных правил робастных БЗ, спроектированных НР, формирует и реализует в реальном времени законы управления с учетом нелинейных физических и информационных ограничений на условия функционирования ОУ.

В результате с помощью КНВ уровень робастности ИСУ проектируется в законах управления коэффициентами усиления ПИД-регулятора, включающих отмеченные особенности. В качестве инструментария моделирования продукционных правил БЗ используются технологии мягких и квантовых вычислений.

Разработанный программный инструментарий новых интеллектуальных вычислений (unconventional computational intelligence) реализует принцип самоорганизации БЗ на основе квантового подхода и осуществляет реализацию термодинамического критерия оптимального соотношения качеств управления, таких как устойчивость, управляемость и робастность.

Ниже иллюстрируется возможность эффективного применения технологии квантовых вычислений, в частности, для решения таких алгоритмически неразрешимых задач классическими методами как проектирование глобальной робастности ИСУ в условиях непредвиденных ситуаций управления. Под классическими методами подразумеваются методы рекуррентной стохастической оптимизации и др., входящие, например, в промышленное программное обеспечение поддержки системы инженерных расчетов типа MATLAB/Simulink.

Программная поддержка оптимизации дробных регуляторов, спроектированных Ninteger v. 2.3 Fractional control toolbox for MatLab, осуществляется на основе ОБЗ на мягких вычислениях. Аналогично, согласно схеме на рис. 19, осуществляется оптимизация других видов регуляторов.

Структура блока «Quantum soft computing computational intelligence» для раздела «Quantum computational intelligence» отображена на рис. 24.

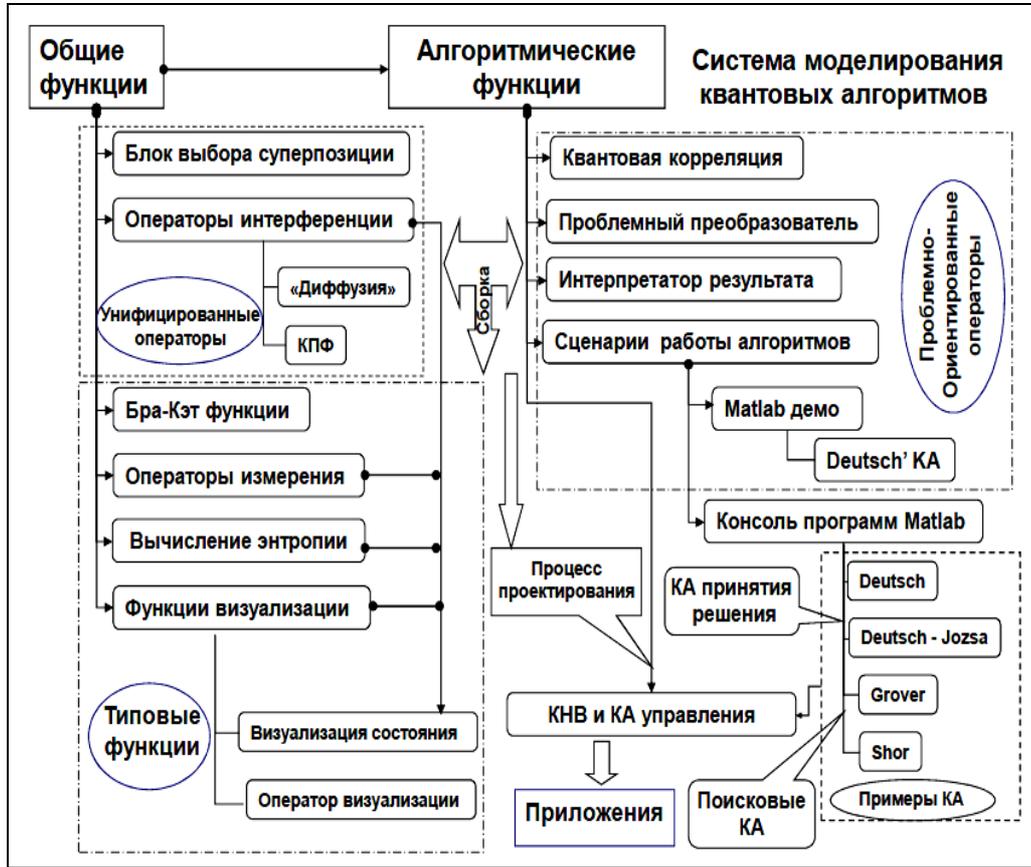


Рис. 24. Структура блока «Quantum computational intelligence» на рис. 23

Подчеркнем, что введенный в данной книге КА является новым квантовым поисковым алгоритмом. Решение задачи проектирования робастного управления ОУ (локально или глобально неустойчивым и существенно нелинейным), с векторным критерием качества управления, рассматривается в данной книге в качестве примера (Benchmark) эффективного использования разработанной информационной технологии проектирования робастных ИСУ.

Следует отметить, что за последние 15 лет существенно возросла сложность структур самих ОУ и уровни неопределенности и информационного риска, в которых приходится функционировать ОУ. Для достижения цели, поставленной перед ОУ, необходимо повышать уровень интеллектуальности САУ, с помощью которого можно скомпенсировать указанные неопределенности и ошибки аппроксимации в описании нелинейных моделей ОУ за счет спроектированной робастной БЗ. В результате требуется адекватный инженерный инструментарий проектирования робастных ИСУ.

В MATLAB/Simulink требуемый инструментарий отсутствует, а существующий инструментарий на баз ННС типа ANFIS не справляется даже с известным классом Benchmark. Многолетний опыт применения инструментария MATLAB/Simulink и типа AFM (Adaptive Fuzzy Module, ST Microelectronics) показал их неработоспособность, а спроектированные БЗ для нечетких регуляторов не обладали свойством робастности в непредвиденных ситуациях управления²².

²²Литвинцева Л.В., Ульянов С.В. Проектирование робастных баз знаний нечетких регуляторов для интеллектуального управления существенно-нелинейными динамическими системами. Ч. II // Изв. РАН. – ТиСУ, 2006. – № 5. – С. 69-97.

В результате был разработан соответствующий инструментарий на основе технологии мягких и квантовых вычислений, позволяющий проектировать робастные БЗ для различного уровня структурной сложности ИСУ. В данной статье описывается идеология квантовых и дробных интеллектуальных вычислений²³.

Заключение

Таким образом, в данной статье обсуждаются решения двух проблем.

В решении первой проблемы рассматривается разработка и физическое обоснование математической модели КА управления самоорганизацией знаний и роль аналогов физических (квантовых и термодинамических) эффектов в реализации процесса гарантированного достижения качества управления на основе технологии квантовых вычислений. При этом основное внимание уделяется описанию качественных особенностей 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.

Данные вопросы являются развитием результатов, изложенных ранее.

Решение второй проблемы демонстрирует результаты применения технологии проектирования робастных БЗ в структуре ИСУ (см., рис. 19 и рис. 20). На конкретных примерах применения структур ИСУ, представленных на рис. 19, показаны особенности проектирования робастных БЗ для непредвиденных ситуаций управления и в условиях информационного риска.

Синергетический эффект самоорганизации БЗ в условиях непредвиденных ситуаций, открытый ранее²⁴, основан на извлечении скрытой квантовой информации в классических состояниях законов управления коэффициентами усиления исполнительных автоматических устройств, формирующих оптимальную управляющую силу, что позволяет использовать данный дополнительный информационный ресурс для повышения уровня робастности ИСУ.

При этом установлен новый (для классической логики управления) квантовый «парадокс»: две БЗ, спроектированные для двух разных ситуаций управления и не робастные в новой непредвиденной ситуации управления, с помощью квантового нечеткого вывода дают возможность спроектировать робастную БЗ, которая позволяет ИСУ достичь цели управления²⁵.

Эффективность разработанной технологии проектирования продемонстрирована на примерах, ранее рассмотренных в работах автора. Дополнительную информацию о квантовых вычислениях заинтересованный читатель может найти в [19-38].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Blencowe M. Quantum electromechanical systems // *Physics Reports*. – 2004. – Vol. 395. – №. 2. – Pp. 159-222.
2. Shapiro M., Brumer P. Quantum control of bound and continuum state dynamics // *Physics Reports*. – 2006. – Vol. 425. – №. 2. – Pp.195-264.
3. Borzi A., Stadler G., Hohenester U. Optimal quantum control in nanostructures: Theory and application to a generic three-level system // *Physical Review*. – 2002. – Vol. – A66. – № 5.

²³ Ulyanov S.V. Design and simulation technology of quantum algorithmic gates in MATLAB. Vol. 2: AI, computer science and control engineering applications. – M.: VNIIGeosystems, 2012.

²⁴ Ulyanov S.V. Self-organization quantum robust control methods and systems for situations with uncertainty and risk. – US Patent No 8, 0345 874. – 2011.

²⁵ Litvintseva L. V., Ulyanov S. V. Quantum fuzzy inference for knowledge base design in robust intelligent controllers // *J. of Computer and Systems Sciences Intern.* – 2007. – Vol. 46. – № 6. – Pp. 908-961.

4. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. Теория моделей процессов управления: Информационные и термодинамические аспекты. – М.: Наука, 1978.
5. Гольденблат И.И., Ульянов С.В. Введение в теорию относительности и ее приложения в новой технике. – М.: Физматгиз, 1979.
6. Петров Б.Н., Уланов Г.М., Ульянов С.В. Проблемы управления релятивистскими и квантовыми динамическими системами: Информационные и термодинамические аспекты. – М.: Наука, 1982.
7. Ульянов С.В. Физические модели интеллектуальных процессов управления: Квантовые, релятивистские и информационно-термодинамические аспекты. Автор. диссерт. на соиск. учен. степ. д.ф.-м.н. – М.: ИФТП АН СССР, 1992.
8. Фрадков А.Л. О применении кибернетических методов в физике // УФН. – 2005. – Т. 175. – № 2. – С. 113-138.
9. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S. et all. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum feedback control models – Physical limits, information bounds, and information-disturbance trade-off. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. – 2006. – Vol. 81. – (<http://www.qcoptimizer.com/>).
10. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S. et all. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum optimal control and filtering – Stability, robustness, and self-organization models in nanotechnologies. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. – 2007. – Vol. 82. – (<http://www.qcoptimizer.com/>).
11. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum computation and quantum information. – Cambridge: University Press, 2000.
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 Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. – 2005. – Vol. 83. – (<http://www.qcoptimizer.com/>).
13. Benenti G., Casati G., Strini G. Principles of quantum computation and information. – Singapore: World Scientific, 2004. – Vol. I.; 2007. – Vol. II.
14. Janzing D. Computer science approach to quantum control. – Habilitation: Univ. Karlsruhe (TH) Publ. Germany, 2006.
15. Красовский А.А. Проблемы физической теории управления. // А и Т. – 1990. – № 11.
16. Бутковский А.Г., Самойленко Ю.И. Управление квантовыми системами. – М.: Физматгиз, 1984.
17. Krotov V.F. The quantization property of probability distributions of the characteristics of dynamic systems observed in the presence of random disturbances // Automation and Remote Control. – 2003. – Vol. 64. – № 1. – Pp. 76-94.
18. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S. et all. Quantum information and quantum computational intelligence: Applied quantum soft computing in AI, computer science, quantum games and self-organization, informatics and design of intelligent wise robust control. Note del Polo Ricerca. Milano: Universita degli Studi di Milano Publ. – 2007. – Vol. 86. – (<http://www.qcoptimizer.com/>).
19. Kitaev A.Yu., Shen A.H., Vyalı M.N. Classical and quantum computation. – N.Y.: AMS. – 2002.
20. Brylinski F.K. and Chen G. (Eds). Mathematics of quantum computation. – Computational Mathematics Series. – CRC Press Co. – 2002.
21. Ulyanov S.V., Litvintseva L.V., Ulyanov I.S. and Ulyanov S.S. Quantum information and quantum computational intelligence: Quantum decision making and search algorithms. – Note del Polo Ricerca, Università degli Studi di Milano (Polo Didattico e di Ricerca di Crema). – Milan, 2005. – Vol. 84,85.
22. Stenholm S. and Suominen K.-A. Quantum approach to informatics. – Wiley-Interscience. J. Wiley&Sons, Inc. – 2005.
23. Marinescu D.C. and Marinescu G.M. Approaching quantum computing. – Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
24. Benenti G., Casati G., Strini G. Principles of quantum computation and information. – Singapore: World Scientific. – 2004. – Vol. I.; 2007. – Vol. II.

25. Janzing D. Computer science approach to quantum control. – Habilitation: Univ. Karlsruhe (TH) Publ. Germany. – 2006.
26. Jaeger G. Quantum Information: An overview. – N.Y.: Springer Verlag, 2007.
27. Kaye P., Laflamme R. and Mosca M. An introduction to quantum computing. – N.Y.: Oxford University Press, 2007.
28. McMahon D. Quantum computing explained. – Wiley Interscience. A J. Wiley Sons, Inc, 2008.
29. Lanzagorta M. and Uhlmann J. Quantum computer science. – Morgan & Claypool Publ. – Series: SYNTHESIS LECTURES ON QUANTUM COMPUTING (Lecture #2), 2009.
30. Nakahara M. and Ohmi T. Quantum computing: From Linear Algebra to Physical Realizations. – Taylor & Francis, 2008.
31. Chen G., Kauffman L., and Lomonaco S. J. Mathematics of Quantum Computation and Quantum Technology. – N.Y.: Chapman Hall/CRC (Applied Mathematics and Nonlinear Science Series), 2008.
32. Chen G., Church D.A., Englert B.-G., Henkel C., Rohwedder B., Scully M.O. and Zubairy M.S. Quantum Computing Devices: Principles, Designs, and Analysis. – N.Y.: Chapman Hall/CRC (Applied Mathematics and Nonlinear Science Series), 2008.
33. McMahon D. Quantum computing explained. – N.J.: John Wiley & Sons, 2008.
34. Yanofsky N.S. and Mannucci M.A. Quantum Computing for Computer Scientists. – Cambridge University Press, 2008.
35. Chen G. and Diao C. Mathematical Theory of Quantum Computation. – N.Y.: Chapman Hall/CRC (Applied Mathematics and Nonlinear Science Series), 2009.
36. Kholevo A.S. Quantum systems, channels, and information. – M.: МЦНМО, 2010.
37. Batty M., Braunstein S.L., Duncan A.J. and Rees S. Quantum algorithms in group theory. – 2003. – P. 52. – [Электронный ресурс]. URL: <http://arXiv:quant-ph/0310133v1>.
38. Quantum Algorithms: Shor's algorithm, Grover's algorithm, Quantum logic, Quantum algorithm, Quantum Fourier transform, Deutsch-Jozsa algorithms. – Books LLC, 2010.

Приложение. Линейная алгебра в квантовых вычислениях (необходимые сведения)

В данной статье используются следующие обозначения и результаты.

1. Если $Z = a + i \cdot b$, то Z^* является комплексно сопряженным, если выполняется условие $Z^* = a - i \cdot b$.

2. Вектор $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} c_1 \\ \dots \\ c_n \end{bmatrix}$ называется «кэт-вектор» и $\langle\psi| = [c_1^*, c_2^*, \dots, c_n^*]$ называется «бра-вектор».

3. $\langle\varphi|\psi\rangle$ определяет внутреннее произведение векторов $|\varphi\rangle$ и $|\psi\rangle$. 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, вектора $|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ и $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ортогональны, т.к. $[1^*, 0] \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} = 0$. Аналогично, вектора $|\varphi\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$ и $|\psi\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix}$ ортогональны, т.е., выполняется следующее условие: $[1^*, 1^*] \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} = 1 \times 1 + 1 \times (-1) = 0$.

4. $|\varphi\rangle \otimes |\psi\rangle$ определяет тензорное произведение и часто определяется как $|\varphi\rangle|\psi\rangle$.

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

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:

- (a) $Rank(A \otimes B) = Rank(A) + Rank(B)$;
- (b) $Dimension(A \otimes B) = Dimension(A) \times Dimension(B)$.

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

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

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

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

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

7. A^\dagger – Эрмитова сопряженная матрица (присоединенная) к матрице A . Отметим, что $A^\dagger = (A^T)^*$. Например, если $A = \begin{bmatrix} 1 & 6i \\ 3i & 2 + 4i \end{bmatrix}$, то $A^\dagger = \begin{bmatrix} 1 & -3i \\ -6i & 2 - 4i \end{bmatrix}$.

8. $\| |\psi\rangle \|$ – норма вектора $|\psi\rangle$: $\| |\psi\rangle \| = \sqrt{\langle\psi|\psi\rangle}$ и используется для нормирования $|\psi\rangle$, т.е., $|\psi\rangle / \| |\psi\rangle \|$.

9. $\langle\varphi|A|\psi\rangle$ – внутреннее произведение $|\varphi\rangle$ и $A|\psi\rangle$ или внутреннее произведение $A^*|\varphi\rangle$ и $|\psi\rangle$.

10. $|\varphi\rangle\langle\psi|$ – внешнее произведение $|\varphi\rangle$ и $\langle\psi|$. Например,

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

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

11. 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 вектора $\{|u_1\rangle, |u_2\rangle, \dots, |u_n\rangle\}$, проектор определяется 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 $\text{pr}(m) = \langle \psi | M_m^\dagger M_m | \psi \rangle = \langle \psi | M | \psi \rangle$.

12. Коммутатор и антикоммутатор, устанавливающие отношения между двумя операторами A и B , определяются, как $[A, B] = AB - BA$ и $\{A, B\} = AB + BA$, соответственно. Операторы A и B коммутируют, если $[A, B] = 0$, и антикоммутируют, если $\{A, B\} = 0$.