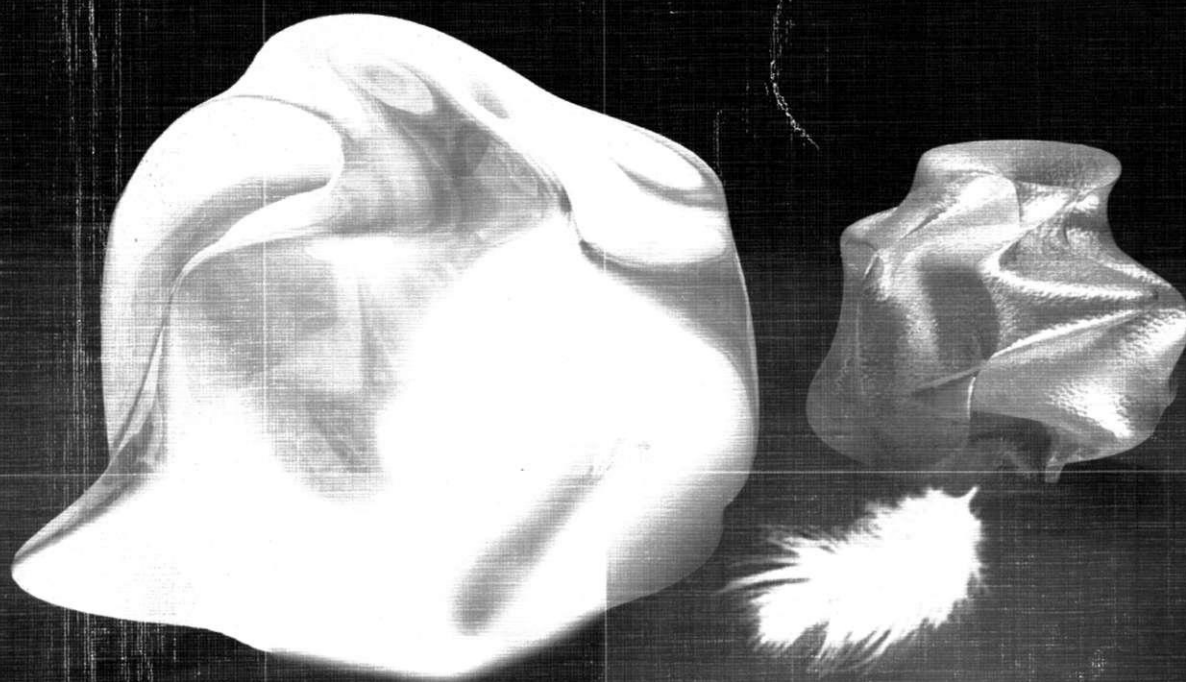


# НЕЧЕТКИЕ СИСТЕМЫ И МЯГКИЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ



Научный журнал Российской ассоциации  
нечетких систем и мягких вычислений

# ТЕХНОЛОГИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ: ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ПРИНЦИПЫ И ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ В ЗАДАЧАХ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА И РОБАСТНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Определение и термин «интеллектуальные вычисления» введены в середине 90-х годов прошлого столетия, а такие (слабо известные) исчисления как дробное (fractional calculus), известно более чем 200 лет и нашло только в конце XX века применение в науке и технике, в частности в проектировании дробных (noninteger order) ПИД-регуляторов. Требования практики и последующее развитие технологии интеллектуальных вычислений нашло свое отражение в новых видах вычислений.

К таким исчислениям можно отнести следующие: (1) эволюционное программирование; (2) алгоритмы оптимизации типа иммунных алгоритмов; (3) алгоритмы оптимизации на основе поведенческих реакций и обмена информацией активных агентов (самоорганизация целенаправленного и оптимального поведения людей в тоннеле, колоний муравьев, стай птиц и рыб, животных и т.п. – swarm intelligence, active agents optimization); (4) квантовые генетические алгоритмы для глобальной оптимизации; (5) квантовые нейронные сети обучения и мн. др.

Сами виды и типы интеллектуальных вычислений (алгоритмы и программные инструментариумы) стали рассматриваться только в конце 20-го столетия как объекты интеллектуальной собственности (ОИС), что позволило малому и среднему бизнесу интенсивно развивать коммерциализацию разработанного интеллектуального продукта.

Однако многообразие подходов и проблемная ориентация разработанного инструментариума привели к многочисленным дискуссиям и разнообразию прикладного инструментариума. При этом выбор эффективного инструментариума исследования для конкретной проблемно-ориентированной области вызывает определенные трудности (или интуитивное противоречие) среди инженеров-исследований и разработчиков новых высоких наукоемких информационных технологий.

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

Поэтому в тематическом номере представлены работы, отражающие развитие теории и приложений мягких и квантовых вычислений, а также исследования, стимулирующие поиск решений отмеченных проблем.

## 1. Роль и принципы технологий интеллектуальных вычислений

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

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

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

Нечеткие множества, хронологически введенные Л. Заде в 1965г., позволяют расширить (многовековое) определение самого числа и ввести множество новых шкал качественных характеристик, которые невозможно определить методами классических исчислений. Такие исчисления открыли новые возможности для теории и проектирования ИСУ. Нестандартные логики, используемые в основе интеллектуальных вычислений и выводы, полученные с их применением в задачах принятия решений и управления, часто приводят к мнимым «парадоксам» и противоречию с интуитивными представлениями инженера-исследователя об ожидаемом результате.

Отметим, однако, что сам термин «нестандартная» логика уже включает такую ситуацию, а его введение обосновано стремлением решать задачи, не решаемые существующими технологиями вычислений. К таким технологиям интеллектуальных вычислений относятся мягкие и квантовые вычисления, используемые, например, для проектирования робастных баз знаний в условиях непредвиденных ситуаций управления.

Применение новых технологий в инженерной практике теории и систем управления часто сталкивается с проблемами преодоления инерции «прагматической» интуиции и инженерной философии. Так происходило в середине 70-х прошлого столетия при внедрении в инженерную практику идей мягких вычислений на основе теории нечетких множеств и нечетких систем управления (автор является пионером в этой области, и сталкивался регулярно с подобными проблемами).

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

## 2. Технология мягких вычислений

Обобщение понятия числа за счет введения субъективной качественной шкалы (и отображения в нее в виде лингвистической аппроксимации его количественной характеристики) привело к 30-летней дискуссии в первую очередь с

представителями научной школы теории вероятностей. В теории вероятностей понятие функции распределения вероятностей имело четкое и строгое определение, а аксиоматика позволяла ввести физическую интерпретацию случайных процессов. Поскольку в теории случайных процессов по динамическим характеристикам объекта управления и функции распределения вероятностей входного сигнала с помощью уравнения Колмогорова можно определить функцию распределения вероятностей выходного сигнала, то аналогичные операции в теории нечетких систем вызвали определенные логические трудности. К таким трудностям относится, например, корректное определение понятий функции принадлежности, логические взаимоотношения «нечеткая/случайная величина» и др.

Основой технологии мягких вычислений является *нечеткая логика*, в которой не используется *закон исключения третьего*. Это приводит к нестандартному выводу о возможности одновременного рассмотрения, например, числа 10 на шкале  $[0, 100]$  как лингвистической переменной «*»* или «*маленький*» с различными значениями функции принадлежности на заданной качественной лингвистической шкале. Только практическое применение нечетких САУ классическими объектами управления (ОУ) разъяснило и сняло разногласия и трудности в определениях индивидуальных и массовых событий, операции осреднения и извлечения информации и т.п. В результате нечеткие модели логического вывода на фазовом пространстве лингвистических переменных позволили разработать нечеткие ИСУ, эффективно решающие задачи управления в условиях существенной неопределенности исходной информации, слабой формализации описания ОУ, нечеткости целей управления.

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

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

Объединение методологий стохастического и нечеткого моделирования ИСУ в инструментари разработанного ОБЗ позволило повысить уровень робастности проектируемых БЗ и решать сложные задачи формирования объективных знаний. Однако, при существенном изменении или непредвиденных ситуациях управления спроектированные законы управления не всегда удовлетворяют условиям робастности. Данный эффект определяется функциональной структурой ГА, в которой (по определению) пространство поиска решений фиксировано и за-

дается экспертом, а также выбором функции пригодности, которая рассматривается как критерий оптимального управления. Таким образом, найденное технологией мягких вычислений (на основе ГА) оптимальное решение соответствует заданной ситуации управления, содержит (в неявном виде) субъективность исходной информации, а при неправильном определении пространства поиска найденное решение может неадекватно соответствовать ситуации управления. Для такого рода ситуации управления требуется привлечение новых технологий интеллектуальных вычислений, такой, как технология интеллектуальных квантовых вычислений.

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

В данном номере показано, что алгоритмически неразрешимые классические задачи можно эффективно решать на классическом компьютере с помощью квантовых стратегий.

### 3. Технология квантовых вычислений

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

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, логически противоречащие «да» и «нет» (кот Шрёдингера).

Из двух классических однобитовых состояний с помощью квантовой корреляции (которая выше классической) возможно дополнительно (в зависимости от вида квантовой коммуникации) извлечь более одного бита.

Квантовые стратегии принятия решений позволяют из двух классических игровых стратегий выигрыша в данной игровой ситуации, сформировать игрока-победителя («» эффект), использующего квантовый подход к решению задачи.

Таким образом, описание на квантовом языке постановок многих классических (слабо структурированных) инженерных задач (трудно решаемых на языке

классической логики) позволяет найти их эффективное решение. Однако такой подход имеет ряд особенностей при практическом применении в задачах управления. В теории квантовой информации и квантовых вычислений понятию числа соответствуют понятия *наблюдаемой* и *суперпозиции* состояния наблюдаемых квантовой системы, а необратимое измерение дает одно из возможных состояний.

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

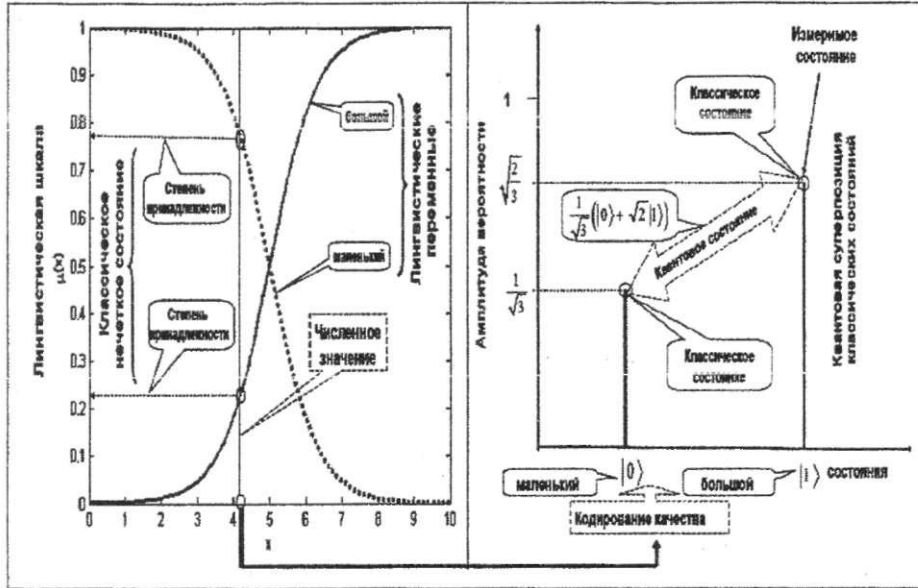


Рис. 1: Физическое различие между нечетким и квантовым состояниями.

Согласно рис. 1, нечеткое состояние числа имеет два значения функции принадлежности на шкале лингвистического описания (принцип исключения третьего не выполняется), а квантовое состояние состоит из *двух классических состояний*, качественные характеристики которых закодированы в квантовых переменных  $\left\{ |0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \right\}$ , связанных принципом квантовой логической дополнителности и являются вычислительным базисом. Совместное использование вычислительных базисов, представленных на рис. 1, приводит к новому виду квантовых мягких вычислений.

Положительные результаты применения классических технологий интеллектуальных вычислений (типа мягких вычислений) совместно с аппаратом квантовых вычислений привели 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.

#### 4. Влияние интеллектуальных вычислений на эффективность наукоемких информационных технологий

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

Увеличение сложности структур ОУ и трудности прогнозирования непредвиденных (внештатных) ситуаций управления только усиливают актуальность данной проблемы и внимание к поиску её решения.

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

#### 5. Направления работ тематического номера

В данном тематическом номере изложены основные положения и стратегия технологии проектирования робастных БЗ для ИСУ. Главное внимание сконцентрировано на описании применения разработанной технологии проектирования и конкретных результатов проектирования БЗ и моделирования ИСУ сложными, существенно-нелинейными ОУ в общем случае со случайно изменяющейся структурой и изменяющимися задающими сигналами (целями управления). Основной задачей в этом случае является определение уровней робастности процессов управления, поддерживающих требуемый уровень надёжности и точности процессов управления в условиях неопределённости информации в процессах принятия решений с помощью разработанного программного обеспечения, поэтому такие сложные и актуальные для общей теории управления вопросы явились предметом дальнейшего обсуждения в данном тематическом номере.

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

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

