

КВАНТОВЫЙ АЛГОРИТМ РОБАСТНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ ОХЛАЖДЕНИЯ АЗОТОМ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО МАГНИТА

Решетников Андрей Геннадьевич¹, Ульянов Сергей Викторович²

¹Кандидат технических наук, доцент;
Государственный университет «Дубна»;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
Старший научный сотрудник;
Объединенный институт ядерных исследований;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;
e-mail: agreshetnikov@gmail.com.

²Доктор физико-математических наук, профессор;
Государственный университет «Дубна»;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Университетская, 19;
Главный научный сотрудник;
Объединенный институт ядерных исследований;
Россия, 141980, Московская обл., г. Дубна, ул. Жолио-Кюри, 6;
e-mail: ulyanovsv46_46@mail.ru.

Технологический процесс криогенной установки охлаждения сверхпроводящего магнита рассматривается как классический объект управления со слабоструктурированной, плохо формализуемой моделью с не доопределенными параметрами, информация о которых содержится в обучающем сигнале, измеренного на реальном объекте. Реализован новый вид квантового координационного двухканального интеллектуального управления вентилями давления и расхода жидкого азота со скрытой (существенно нелинейной) обратной взаимосвязью в технологическом процессе с переменной структурой охлаждения сверхпроводящего магнита. Представлены этапы отечественной квантовой программной ИТ – инженерии проектирования встраиваемых самоорганизующихся промышленных интеллектуальных систем управления с использованием разработанного авторами программного инструментария QSCIT (Quantum Soft Computational Intelligence Toolkit). Инструментарий QSCIT создан на основе промышленных оптимизаторов баз знаний (SC&QC)OptKBTM с применением технологий квантовых мягких вычислений. Квантовый когнитивно – рациональный «сильный» вычислительный ИИ применен для проектирования робастных самоорганизующихся баз знаний в нештатных (непредвиденных) ситуациях управления. Процесс проектирования в виде двух этапов основан на физическом (информационно - термодинамическом) законе рационального распределения качественных характеристик управления: устойчивость по Ляпунову, управляемость и робастность. Характеристика требуемого уровня робастности определяется как рациональный необходимый минимум производства и скорости производства энтропии - меры расхода регулятором необходимого полезного ресурса для гарантированного достижения цели управления. Первый этап рационального когнитивного процесса извлечения знаний из обучающего сигнала основан на инструментарии ИТ - мягких вычислений SCOptKBTM (формирования уровня интеллекта нечеткого регулятора «в малом» в ситуации обучения). На втором этапе проектирования учитывается квантовый синергетический эффект самоорганизации формирования робастной базы знаний квантового регулятора (квантовый «сильный» вычислительный ИИ «в большом» для нештатных ситуаций) из неточных (не робастных) баз знаний нечетких регуляторов (ИИ «в малом» в нештатных ситуациях) на основе квантового нечеткого вывода в инструментарии QCOptKBTM. Энтропийный анализ экспериментальной работы регуляторов показал, что квантовый интеллектуальный регулятор с «сильным» ИИ обладает объективным свойством (физически строгого и математически корректного доказательства) когнитивно - рационального расхода ресурса для совершения силой управления полезной работы, необходимой для гарантированного достижения цели управления. Данное свойство позволяет устранить необходимость субъективной интерпретации результатов «доверенного», «генеративного» и «объяснительного» моделей ИИ. Показана эффективность и квантовое



Статья находится в открытом доступе и распространяется в соответствии с лицензией Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (CC BY 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.ru>

преимущество применения интеллектуальных самоорганизующихся квантовых регуляторов управления (встроенных в бортовые интеллектуальные системы управления) классическими объектами управления на основе ИТ квантовых мягких вычислений.

Ключевые слова: квантовое робастное интеллектуальное управление, квантовые мягкие вычисления, квантовый самоорганизующийся координационный регулятор, квантовый оптимизатор неточных баз знаний, слабо формализованные физические установки.

Для цитирования:

Решетников А. Г., Ульянов С. В. Квантовый алгоритм робастного интеллектуального управления процессом охлаждения азотом сверхпроводящего магнита // Системный анализ в науке и образовании. 2026. № 2. С. 69–92. EDN: PZDWQR. URL: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/718>.

QUANTUM ALGORITHM OF ROBUST INTELLIGENT CONTROL AT THE SUPERCONDUCTING MAGNET COOLING PROCESS

Reshetnikov Andrey G.¹, Ulyanov Sergey V.²

¹PhD in Engineering sciences, associate professor;
Dubna State University;
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
Senior Researcher;
Joint Institute for Nuclear Research;
6 Joliot-Curie Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
e-mail: agreshetnikov@gmail.com.

²Grand PhD in Physical and Mathematical Sciences, professor;
Dubna State University;
19 Universitetskaya Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
Chief Researcher;
Joint Institute for Nuclear Research;
6 Joliot-Curie Str., Dubna, Moscow region, 141980, Russia;
e-mail: ulyanovsv46@mail.ru.

From the point view of quantum IT engineering, the definition of the concept and issues of intelligent control of weakly structured and poorly formalized objects with underdetermined/hidden parameters are discussed. The stages of domestic quantum IT software engineering for the design of embedded self-organizing intelligent control systems using the QSCIT (Quantum Soft Computational Intelligence Toolkit) software toolkit are presented. QSCIT is based on industrial knowledge base optimizers (SC&QC)OptKB™ and employs quantum soft computing technologies. A new type of coordinated dual-channel intelligent control of nitrogen pressure and flow valves with hidden feedback is considered in a process with a variable superconducting magnet cooling structure. In this case, the superconducting magnet is considered as a classical control object with a weakly structured, poorly formalized model with underdetermined parameters, information about which is contained in the learning signal measured on the actual object. Quantum technology for studying a highly nonlinear and dynamically unstable autonomous intelligent robot forms the basis of a system simulating the interaction of nitrogen pressure and flow valves, as well as an intelligent self-organizing quantum controller coordinating the control of nitrogen pressure and flow valves in a cryogenic superconducting magnet cooling unit in the NICA mega-science project (JINR). Quantum soft computing and quantum fuzzy inference in the quantum controller structure extract knowledge from the learning signal and, based on the extracted amount of hidden quantum information, generate additional "thermodynamic" control power as an additional information resource for the intelligent controller to perform useful work. These processes are implemented on a classical processor. The generation of this additional information resource is possible due to the existence (experimentally proven in the study) of a quantum synergistic effect of self-organization of imprecise knowledge bases: from a finite number of imprecise knowledge bases, quantum fuzzy inference generates a robust knowledge base in real time. An entropy analysis of the controllers' operation demonstrated the rational use of useful resources by the

quantum intelligent controller, necessary to guarantee the achievement of the control goal. The efficiency and quantum advantage of using intelligent self-organizing quantum controllers (embedded in onboard intelligent control systems) to control classical control objects based on quantum soft computing technologies are demonstrated.

Keywords: quantum robust intelligent control, quantum soft computing, quantum self-organizing coordination controller, optimizer for imprecise knowledge bases, weakly formalized physical setups.

For citation:

Reshetnikov A. G., Ulyanov S. V. Quantum algorithm of robust intelligent control at the superconducting magnet cooling process. *System analysis in science and education*, 2026;(2):69-92 (in Russ). EDN: PZDWQR. Available from: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/718>.

Введение: актуальность проблемы и постановка задачи

Физическая модель исследуемого в данной работе технологического процесса криогенной установки охлаждения сверхпроводящего магнита как объекта управления (ОУ) рассмотрена в [1-3] на основе ИТ мягких вычислений. Описание качественных свойств ОУ в целом и математическая модель составляющих его элементов относятся к т. н. слабо формализованным моделям с неполным знанием качественных свойств ОУ, а корректное определение динамики ОУ и метода робастного управления им требует привлечения новых информационных технологий (ИТ) и методов теории интеллектуального систем управления (ИСУ) [4,5]. В частности, первый этап исследования управления рассматриваемыми (плохо формализованными и слабо структурированными) физическими объектами был представлен в [1,2] в виде описания системы охлаждения жидким азотом сверхпроводящего (СП) магнита на основе технологий интеллектуальных мягких вычислений (в виде генетического алгоритма и нечетких нейронных сетей). Методы данной ИТ позволяют компенсировать неполное знание свойств ОУ соответствующим конечным числом продукционных правил (теорема об универсальном аппроксиматоре) спроектированной базы знаний (БЗ) в системе управления, полученной в ситуации обучения на основе интеллектуальных вычислений в виде оптимизатора БЗ на мягких вычислениях [1,3]. В случае нештатных ситуаций или проявления неучтенных качественных свойств ОУ в непредвиденных ситуациях управления спроектированные в ситуации обучения БЗ являются не робастными (неточными) и нечеткие регуляторы (НР) не справляются с задачей достижения цели управления [6,7].

В данной работе методы квантовой ИТ - инженерии (на основе нового вида квантовых мягких вычислений [8,9]) применяются в решении задач робастного интеллектуального управления слабо структурированными и плохо формализованными физическими объектами с не доопределенными (ненаблюдаемыми / скрытыми) параметрами и нелинейными взаимосвязями в описании физических и математических модельных представлений. Рассматриваемый класс проблем относится к области алгоритмически неразрешимых классическими алгоритмами задач.

Результаты [1] обобщаются в данной работе на основе применения открытого и экспериментально доказанного [10] синергетического эффекта квантовой самоорганизации неточных БЗ: робастная БЗ квантового интеллектуального координационного регулятора формируется в реальном времени из конечного числа не робастных БЗ за счет извлеченной квантовой информации, скрытой в классических состояниях коэффициентов усиления спроектированных БЗ на мягких вычислениях [1] нечетких ПИД-регуляторов. Данный эффект носит чисто квантовый характер и классических аналогов не имеет [11].

Открытый квантовый синергетический эффект совместно с информационно-термодинамическим законом рационального распределения качеств управления составляют физический закон квантового интеллектуального управления [8,9,11]. Обсуждаются вопросы программно-алгоритмической реализации на классическом процессоре робастного интеллектуального управления в режиме реального времени указанным классом физических объектов.

На основе анализа термодинамического поведения квантового интеллектуального регулятора показано квантовое преимущество координационного управления физическими объектами с плохо формализованной структурой на основе технологий интеллектуальных вычислений в виде квантовых

мягких вычислений [9]. Разработанная отечественная квантовая ИТ основана на программно – алгоритмической платформе инструментария $(SC\&QC)OptKB^{TM}$ квантового «сильного» вычислительного ИИ [12,13]. Зарубежных налогов, как и [1], не имеет [11,14,15].

Актуальность проблемы. Ситуация с определением условий гарантированного достижения робастного устойчивого управления сложными экспериментальными установками осложняется следующими обстоятельствами [4,5,16]: 1) Эффектом не сохранения постоянства физических свойств ряда систем в течение сеанса работы ускорительного комплекса и, особенно, от сеанса к сеансу, что требует дополнительных затрат полезного ресурса на исследование причин и настройку режимов функционирования; 2) Изменением компоновки установки - замена элементов, реконфигурация и реинжиниринг структуры; 3) Работа в различных существенно отличающихся режимах, что требует исследования и учёта индивидуальных характеристик каждого режима с применением методов интеллектуального управления [16]. Перечисленные обстоятельства и их индивидуальные особенности предопределяют скрытность (не наблюдаемость) и не доопределённость параметров физических и математических моделей ОУ. Отсутствие информации о перечисленных факторах должно учитываться, согласно теореме об универсальном аппроксиматоре, в конечном числе продукционных правил БЗ интеллектуальных НР системы управления [4,5,7]. Квантовые сквозные ИТ позволяют на основе принципа компенсации неполноты знания структуры и параметров математической модели ОУ [17] спроектировать иерархические интеллектуальные системы управления (ИСУ), обладающие возможностью перераспределить степень ответственности принятия решения в условиях зависимости от динамически изменяющейся ситуации.

Постановка задачи. На основе программного инструментария квантового «сильного» вычислительного ИИ (интеллект «в большом») [8,12,13] разработать и внедрить в промышленную эксплуатацию ИСУ с соответствующей БЗ, позволяющей конечным числом продукционных правил компенсировать неполноту (отсутствие) информации о математической модели ОУ и обеспечить требуемый уровень робастности управления ОУ, необходимый для гарантированного достижения цели управления.

Обоснование выбранного метода решения. Формирование БЗ осуществляется на основе метода извлечения знаний из обучающего сигнала (ОС), полученного путем измерения реального сигнала с физического ОУ в режиме обучения технологической эксплуатации [1]. ОС содержит необходимую информацию о важных качественных особенностях требуемого поведения ОУ. Получить ОС без использования математической модели ОУ позволяет ИТ мягких вычислений применением генетического алгоритма. Квантовые алгоритмы работают с качественными характеристиками исследуемого объекта без количественных вычислений [8] и совместно с технологией мягких вычислений реализуют синергетический эффект формирования робастной БЗ квантового интеллектуального самоорганизующегося регулятора из не робастных (неточных) БЗ конечного числа НР [10,11].

Назначение разработанной ИСУ. Система предназначена для интерактивного моделирования, обучения и анализа систем управления с использованием технологии интеллектуальных мягких вычислений (генетических алгоритмов (ГА) и нечетких нейронных сетей (ННС)) в виде оптимизатора БЗ на мягких вычислениях – $SCOptKB^{TM}$ [6,7]. Для разработки эффективного управления в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций управления физическими ОУ с не доопределенными параметрами выбраны технологии квантового «сильного» вычислительного ИИ в виде квантовых мягких вычислений и инструментария $QCOptKB^{TM}$ [9,12,15]. Отечественные инструментари (SC&QC)OptKBTM составляют программно – алгоритмический базис квантового «сильного» вычислительного ИИ и включает в себя алгоритм квантового глубокого обучения [12,13]. В данной работе рассмотрены основные этапы и особенности применения технологии квантовых мягких вычислений к одной из подсистем коллайдера проекта NICA, в частности системе азотного охлаждения сверхпроводящего (СП) магнита [18-20] фабрики магнитов ЛФВЭ ОИЯИ [16].

Результат работы. Теоретическое обоснование и экспериментальное доказательство преимущества эффективного применения интеллектуальных вычислений (типа квантовых мягких вычислений) в разработке робастных ИСУ и проектировании гибридных квантовых нечетких ПИД - регуляторов, в частности преимущества квантового интеллектуального управления плохо формализованными и слабо структурированными ОУ перед традиционным методом управления человеком – оператором, ПИД – регулятором и НР (интеллект «в малом»).

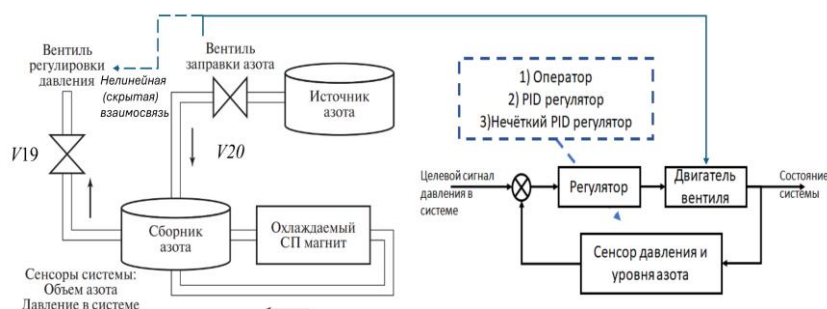
Промышленное применение. Первый экспериментальный результат получен на реальном физическом объекте в [14] для ИСУ охлаждением СП магнита ускорительного комплекса «мега – сайенс» проекта разработки коллайдера NICA [18]. Экспериментально продемонстрирована работоспособность и эффективность созданной интеллектуальной системы дистанционного управления технологическим процессом охлаждения СП - магнита с гарантированным достижением устойчивой зоны сверхпроводимости [19,20].

Принцип компенсации неполноты описания слабо формализованного объекта. Проблема исследования определения необходимого уровня физической строгости и математической корректности описания слабо структурированных и плохо формализованных физических объектов с точки зрения логической непротиворечивости точности аппроксимации рассматривалась в [5,8,17] и выполнения физических (информационно – термодинамических) ограничений конструктивно обсуждалось в [21,22]. В данной работе решение перечисленных вопросов рассмотрено с позиции теории и систем управления на основе принципа компенсации неполноты извлекаемых знаний описания плохо формализованного ОУ конечным оптимальным числом продукционных правил в БЗ НР (теорема об универсальном аппроксиматоре), реализованный в инструментарии *SCOptKBTM* [7] и формирования робастного самоорганизующегося квантового регулятора с применением синергетического эффекта самоорганизации неточных БЗ [11] и инструментария *QCOptKBTM* [23].

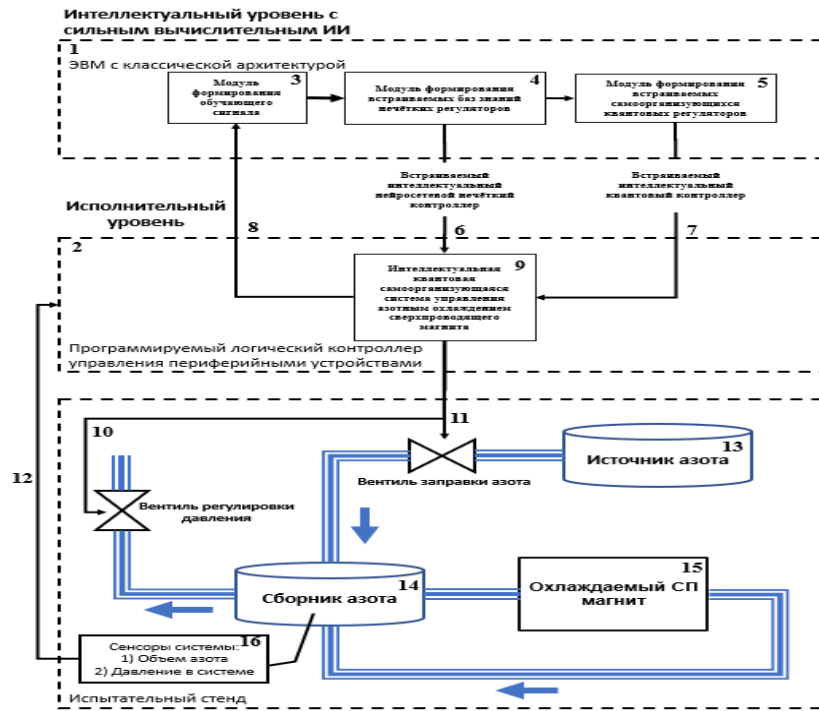
Смежные работы. В качестве наглядного примера (Benchmark) выбран существенно нелинейный (со скрытыми перекрестными по обобщенным координатам связями) и динамически неустойчивый автономный интеллектуальный робот [10], имитирующий скрытое нелинейное взаимодействие вентилей давления и расхода азота, а также управляющего давлением и расходом азота в криогенной установке охлаждения СП - магнита в «мега – сайенс» проекте NICA [20]. В этом случае СП – магнит рассматривается как ОУ со слабо структурированной, плохо формализуемой моделью с не доопределенными параметрами [14], индивидуальная информация о которых содержится в ОС, измеренного на реальном ОУ.

1. Физические особенности интеллектуального управления логикой смены режима технологического процесса с переменной структурой заправки азотом

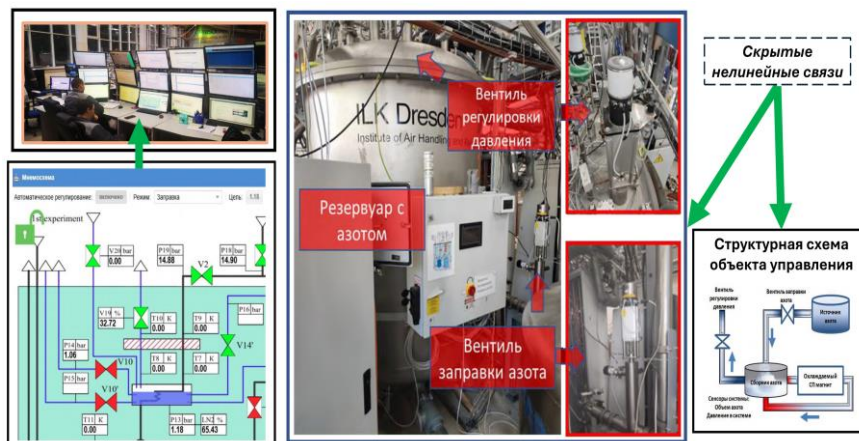
Процесс заправки азота в систему охлаждения определяется в виде последовательности технологических операций из трёх этапов (продувка и охлаждение канала подачи азота; поступление азота или его фактическая заправка; и закрытие вентиля подачи азота – завершение заправки). На Рис. 1 показана принципиальная схема управления процессом охлаждения СП – магнита жидким азотом и различие автономного (Рис. 1 (а)) и координационного (Рис. 1 (б)) принципов управления работой вентилей давления и расхода жидкого азота. Таким образом, технологический процесс заправки азота обладает переменной структурой и его можно разделить на три стадии с разными по семантике логиками выполнения технологических задач. На первом этапе происходит охлаждение канала подачи азота, в систему поступает газообразный азот и давление в системе регулируется вентилем подачи азота; при этом вентиль регулировки давления (*V19*) полностью открыт и влияет на расход азота, регулируемого вентилем подачи азота (*V20*).



(а)



(б)



(в)

Рис. 1. Схема охлаждения СП-магнита жидким азотом (а) схема управления без координационного управления (б) схема координационного управления клапанами давления и расхода азота на основе квантового регулятора: (в) общий вид интеллектуальной системы дистанционного управления азотным охлаждением СП – магнита

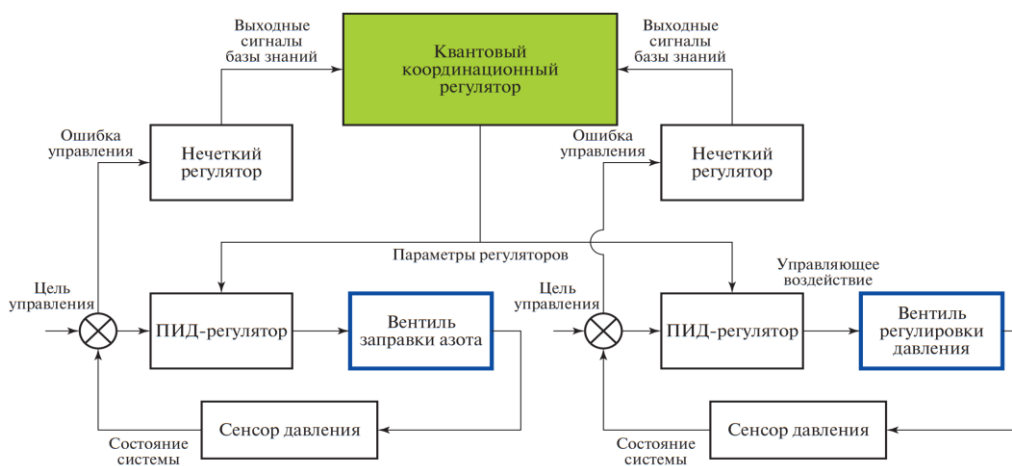
На второй стадии, при полностью открытом вентиле подачи азота (V_{20}), в систему поступает жидкий азот, а задачу стабилизации выполняет вентиль регулировки давления (V_{19}). При достижении установленного уровня азота в сборнике, система переходит в завершающую - третью стадию, где выполняется совместная работа двух вентилях (V_{19} и V_{20}), то есть постепенное закрытие вентиля подачи азота и при этом координируется регулировка уровня давления вентилем давления. В этом случае существует аналогия с управлением поведением системы «каретка перемещения – двойной перевернутый маятник» (рассмотренной ранее в [10]) с моделью существования скрытых (hidden) существенно нелинейной связи между обобщенными координатами вентиля расхода V_{20} и вентиля давления азота V_{19} как ОУ [23].

Примечание: физическая особенность координационного управления вентилями расхода и давления азота. На Рис. 1 (а) показана нелинейная (скрытая) взаимосвязь, не учитываемая в системе автономного управления вентилями давления (V_{19}) и расхода (V_{20}) азота; на Рис. 1 (б) приведена

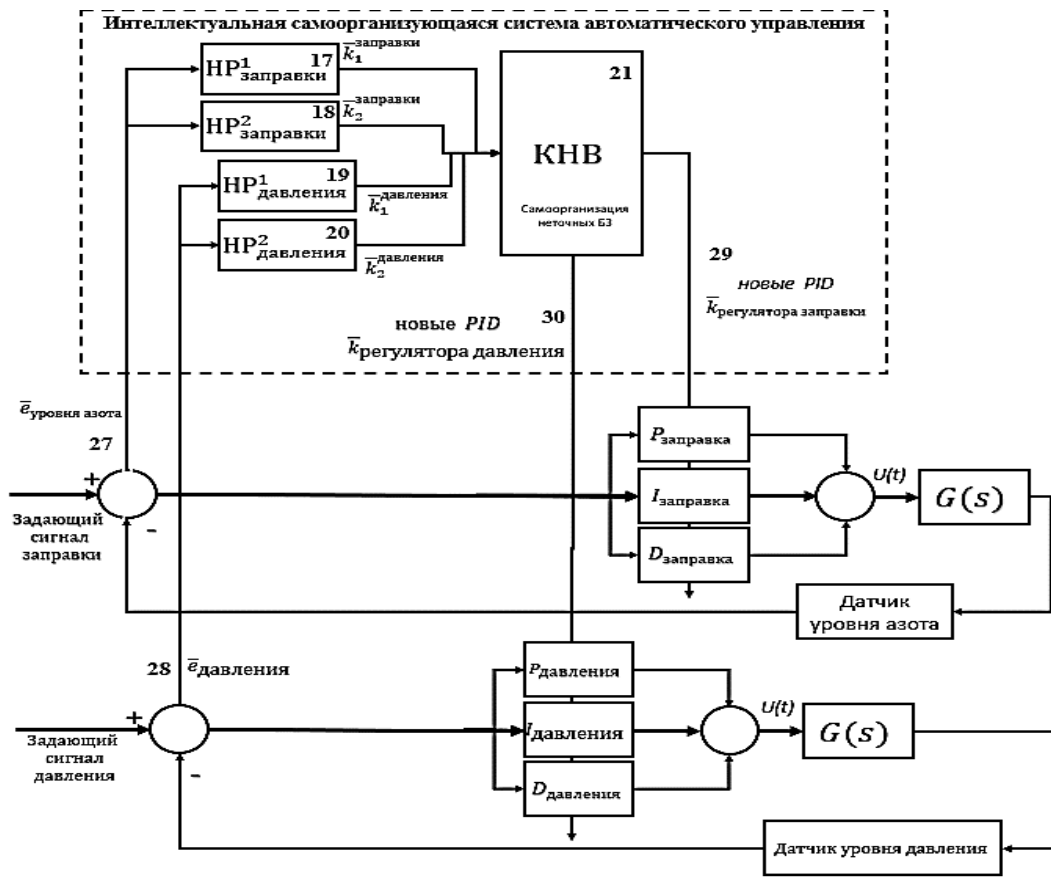
структурная схема координационного управления вентилями давления ($V19$) и расхода ($V20$) азота с учетом квантовых корреляций между коэффициентами усиления гибридных ПИД-регуляторов управления указанными вентилями на основе инструментария квантового «сильного» вычислительного ИИ. В этом случае инструментарий квантовой программной инженерии (SC&QC)OptKBTM [12] реализует принцип компенсации неполноты знаний о скрытых (не измеряемых) взаимосвязях модели ОУ за счет формирования необходимого оптимального количества продукционных правил в БЗ НР. Действие управляющей силы на одну из обобщенных координат приводит к изменению другой обобщенной координаты. При смене стадии процесса охлаждения СП – магнита объекты меняются «ролями», переходя из ведущего объекта в ведомые (аналог системы с переменной структурой «master – slave»). В исследуемом варианте такая нелинейная связь является скрытым параметром (в отличие от модели перевернутого маятника с сухим трением крепления предмета на каретке, которое отсутствует в уравнении движения системы [10]). Учет скрытых взаимосвязей в управлении на Рис. 1 (а) возможен на основе извлечения знаний о квантовых корреляциях из реального ОС в квантовом интеллектуальном регуляторе на основе квантового генетического алгоритма в КНВ, осуществляющего координационное управление двумя указанными вентилями (см., Рис. 1 (б)). Такой подход к квантовому интеллектуальному управлению изложен в данной работе.

2. Система квантового интеллектуального координационного управления в криогенной системе охлаждения СП – магнита

Рассмотрим кратко особенности программно-аппаратной поддержки выбираемой системы дистанционного управления азотного охлаждения на Рис. 1 (в). На Рис. 2 представлена структура координационной системы управления азотного контура криогенной установки с применением технологий квантовых мягких вычислений на основе инструментария квантового «сильного» вычислительного интеллекта – (SC&QC)OptKBTM.



(а)



(б)

Рис. 2. Структурная схема интеллектуального координационного управления вентилями давления и расхода азота с учетом квантовой логики скрытых нелинейных взаимосвязей Принципиальная схема координационного управления на основе квантового координационного регулятора (а); Структурная реализация координационного управления (б)

На Рис. 3 приведена методика формирования квантового нечеткого логического вывода (КНВ) квантового самоорганизующегося регулятора на основе эффекта самоорганизации неточных БЗ НР с учетом выбранного вида и типа квантовой корреляции.

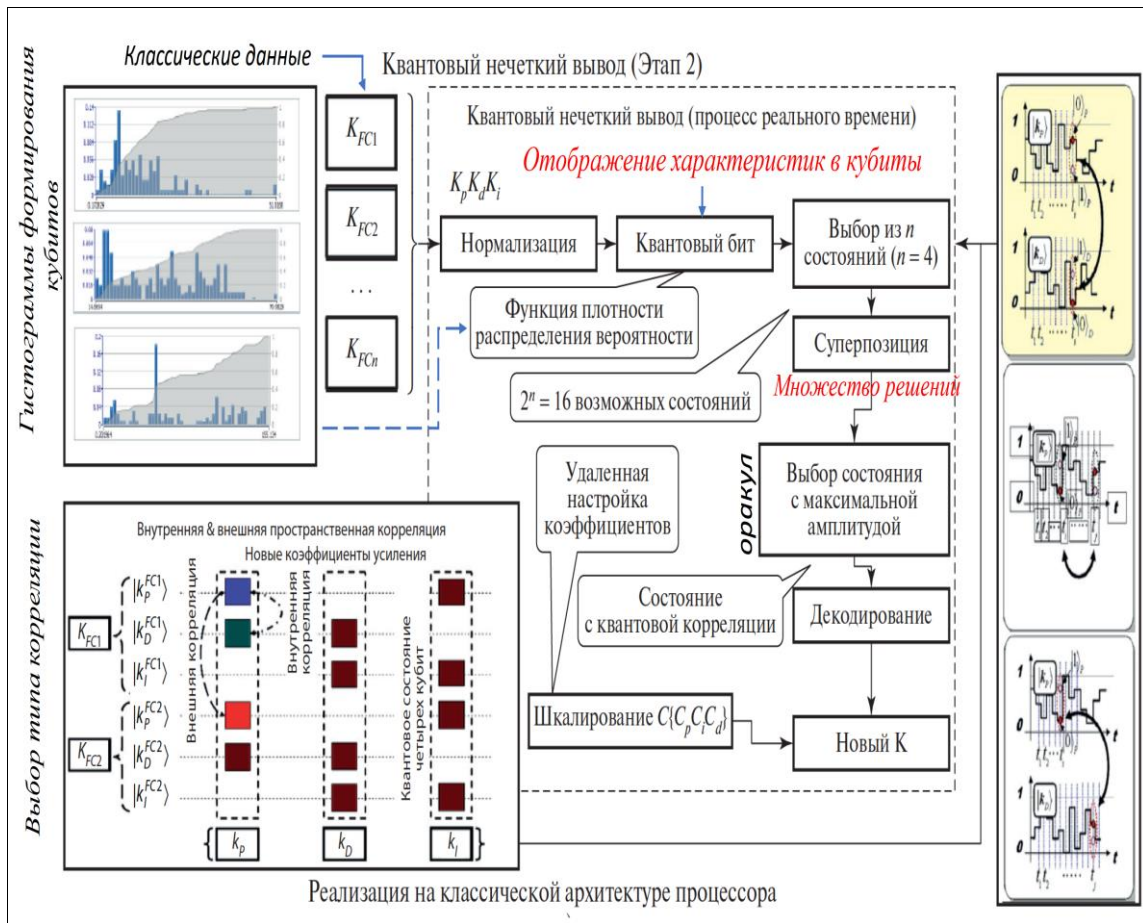


Рис. 3. Структурная схема формирования БЗ квантового нечеткого регулятора на основе квантового нечеткого вывода (В левом верхнем углу показан процесс вычисления гистограмм формирования кубита; в середине приведена структура КНВ и в левом / правом нижнем углах показаны тип и вид квантовой корреляции)

Примечание. Рисунок 2 иллюстрирует наличие двух контуров обратной связи для управления давлением, в режимах эксплуатации и заправки. При этом по технологической схеме происходит поочередная и совместная работа контуров управления. Отметим, что на всех этапах технологического процесса с переменной структурой охлаждения азотом СП – магнита важно поддерживать требуемое давление, что в свою очередь влияет на температурные эффекты охлаждаемых элементов – токовыводов и экранов магнита. Так же важным критерием является скорость заправки, так как при загрузке смежных спутников заправка выполняется последовательно. Промедление в заправке может привести к остановке тестирования магнита. Перезапуск технологического процесса приносит большие экономические потери.

Выбор вида и типа квантовой корреляции между коэффициентами усиления гибридного нечеткого ПИД-регулятора определяется встроенным в структуру КНВ квантовым генетическим алгоритмом на основе [24]: выбрана пространственная квантовая корреляция.

На Рис. 4 приведена структурная реализация КНВ встроенного в контур управления квантовой самоорганизующейся ИСУ.

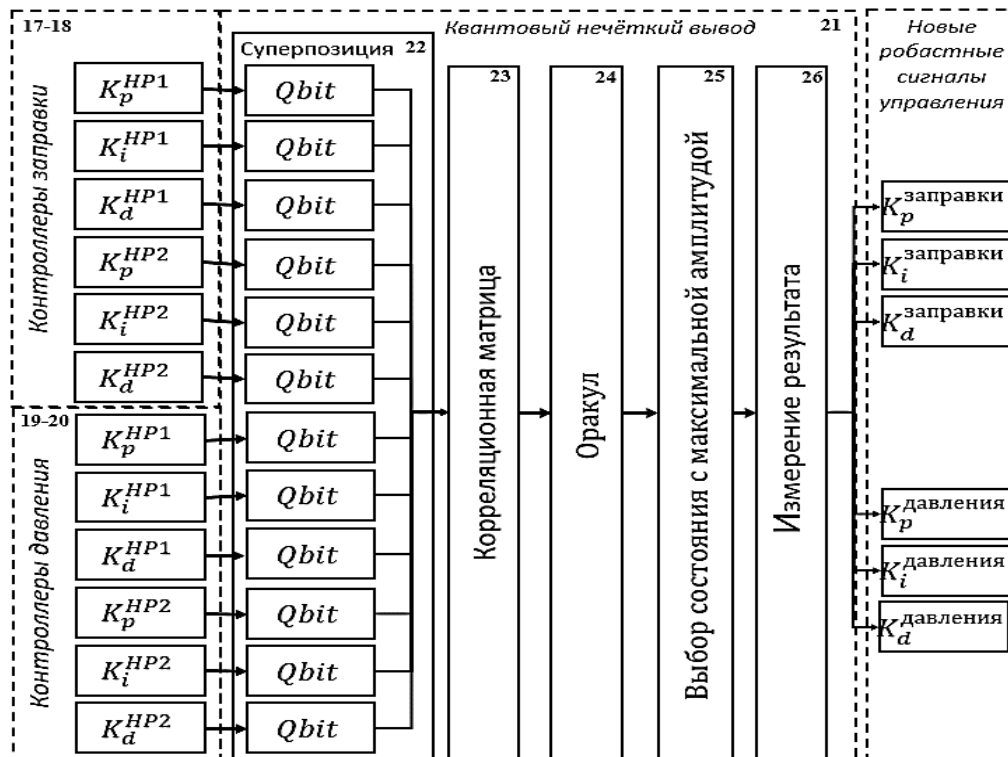


Рис. 4. Структурная реализация КНВ в самоорганизующемся квантовом регуляторе

ИСУ может работать по нескольким алгоритмам в зависимости от выбранного оператором режима:

- режим гибридного нечёткого ПИД -регулятора – режим эксплуатации установки на основе ИСУ на мягких вычислениях (интеллект «в малом»);
- режим обучения глубокой нейронной сети (с дистанционной настройкой);
- режим генетического алгоритма – режим извлечения знаний из реальных траекторий работы установки;
- режим квантового регулятора – интеллектуальный (интеллект «в большом») режим функционирования, характеризующийся повышенной надёжностью и качеством управления.

Сам процесс проектирования основан на принципе сохранения нижнего (исполнительского) уровня классического управления, что позволяет учесть особенности комплекса системы управления СП магнитом, состоящего из разнородных модулей со своими протоколами передачи данных и управления [25]. Такого рода системы в теории интеллектуальных систем называют плохо формализуемыми и слабоструктурированными [6,10,11], исследования подобных систем являются актуальными в задачах управления в мега-сайенс проектах типа *NICA* [4-6]. Интеллектуальные регуляторы, принципы работы которых основаны на новых сквозных (end-to-end) квантовых ИТ, внедрены на действующем комплексе с использованием классических технологий управления технологическими системами на основе фреймворка *TANGO Controls* [3,18,25]. При этом реализованы программные средства дистанционного управления со встроенными самоорганизующимися квантовыми регуляторами, позволяющие гарантированно достигать цели управления. В данной работе на примере управления уровнем давления азота и расхода азота в сборнике криогенной установки, как первого этапа процесса охлаждения, рассматривается и обосновывается выбранная структура системы интеллектуального координационного управления.

Целью управления является проверка поддержания устойчивого состояния уровня давления в азотном сборнике, действующего на температуру обмотки магнита в состоянии сверхпроводимости, которое необходимо удерживать в точке равновесия допустимого диапазона изменения тока, температуры и магнитного поля.

Подробное описание принципов и особенностей работы квантового регулятора со встроенным КНВ на квантовом генетическом алгоритме приведено в [12,13,23]. В данной работе основное

внимание уделено программно-алгоритмической реализации и результатам применения квантового самоорганизующегося регулятора, встроенного в контур управления ИСУ.

3. Особенности программно – алгоритмической поддержки квантовой самоорганизующейся ИСУ в криогенной системе охлаждения СП – магнита

В [12,13,23] были рассмотрены принципы и методы построения моделей квантового «сильного» вычислительного ИИ на основе инструментария квантового глубокого обучения с применением квантовых нейронных сетей и квантового генетического алгоритма [24]. В данном разделе рассмотрены дополнительные особенности моделей ИТ-инженерии квантового глубокого обучения при применении инструментария оптимизации БЗ интеллектуальных регуляторов на основе *QCOptKBTM* в задачах квантового интеллектуального управления.

3.1 Особенности инструментария QCOptKBTM на основе КНВ и связь со структурой квантового глубокого обучения

Описание особенностей квантового глубокого обучения позволяет точнее и глубже освоить возможности инструментария *QCOptKBTM*, который включает в себя этапы обучения и извлечения (из исходных данных) сигнала обучения за счет инструментария *SCOptKBTM* на технологии мягких вычислений, и далее рассматривается как классические данные (см. Рис. 3). За счет операторов квантовых вычислений классические данные далее кодируются на сфере Блоха кубитами (амплитудное кодирование), квантовым генетическим алгоритмом осуществляется оптимальный выбор типа и вида квантовой корреляции между искомыми решениями в суперпозиции всего множества решений, и квантовый оракул совместно с конструктивной интерференцией извлекают искомым результат путем классического измерения. Таким образом, разработанный интеллектуальный инструментарий *SCOptKBTM* и *QCOptKBTM* включает принципы квантового глубокого обучения, и также (как в случае технологии мягких вычислений) формирует оптимальную структуру теперь квантовой нейронной сети; за счет применения квантового генетического алгоритма при установлении типа квантовой корреляции между закодированными в кубитах решениями в квантовой суперпозиции ускоряет поиск искомого решения.

3.2 Погружение квантового глубокого обучения в QCOptKBTM ПО - инструментарий

Рассмотрим кратко суть введенного на Рис. 3 и 4 алгоритма КНВ и его структурную связь с квантовым глубоким обучением. Согласно [12,23] в квантовом глубоком обучении на первом этапе формируется множество классических данных (обучающая выборка), затем осуществляется кодирование качественных характеристик в кубиты на сфере Блоха и применяется операция отображения в Гильбертово пространство. Далее применяется в качестве обработки ОС выбранный алгоритм квантового обучения и производится измерение результата. Поскольку основной задачей квантовых алгоритмов является определение качества исследуемого объекта, то извлечение знаний о качественных характеристиках ОУ из экспериментального ОС инструментарием (*SC&QC*)*OptKBTM* позволяет избежать трудностей эмпирического построения квантовых нейронных сетей, а также позволяет автоматически сформировать структуру квантового координационного регулятора, решив задачу универсального квантового аппроксиматора. На Рис. 3 приведен алгоритм реализации КНВ, содержащий перечисленные этапы квантового глубокого обучения. В [11] показано, что алгоритм КНВ является, в свою очередь, частным случаем квантового алгоритма самоорганизации и формирует синергетический эффект самоорганизации неточных БЗ. На Рис. 3 приведено описание основного функционала КНВ и способ извлечения квантовой информации, скрытой в классических состояниях. В результате, согласно [12,23], представлено функциональное описание блоков квантового глубокого обучения и алгоритм обработки квантовых данных на основе КНВ в виде разновидности квантового поискового Гровер - подобного алгоритма. На Рис. 5 приведено описание интерфейса формирования новых коэффициентов усиления ПИД-регуляторов по схеме на Рис. 4.

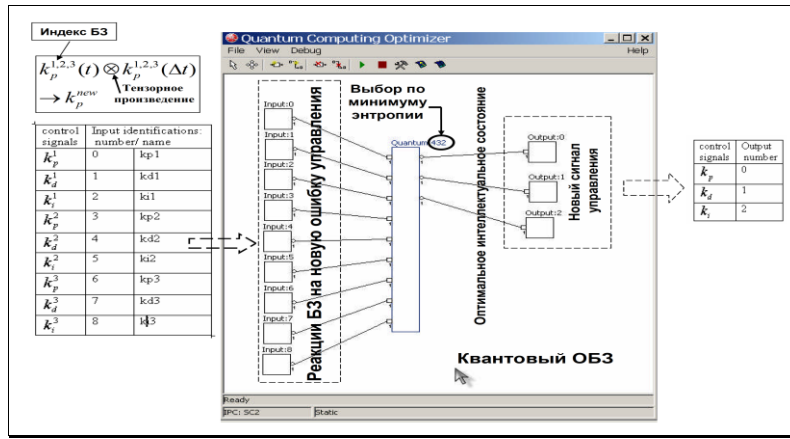


Рис. 5. Интерфейс формирования новых коэффициентов усиления ПИД-регуляторов

Квантовый генетический алгоритм встроен в структуру КНВ после блока «Суперпозиция» и осуществляет выбор вида и типа квантовой корреляции [24]. На Рис. 3 (в левом верхнем блоке) в качестве иллюстрации представлены гистограммы распределения выходных сигналов НР. Нормированное интегральное распределение этого сигнала рассматривается как источник информации о состоянии работы НР и используется при формировании логического кубита. **Примечание.** Физически классическая корреляция отвечает за самоорганизацию структуры на макроуровне; квантовая и смешанная корреляции отвечают за извлечение скрытой квантовой информации на микроуровне для реализации процесса квантовой самоорганизации БЗ и передачу информации с микро - на макроуровни соответственно. С помощью различных квантовых корреляций (типов внутренней, внешней и видов пространственной, временной и пространственно – временной) осуществляется обмен информацией и координационное управление между коэффициентами усиления проектируемого робастного интеллектуального квантового регулятора. На основе извлеченной скрытой квантовой информации формируется как результат дополнительная «термодинамическая» сила управления как новый информационный ресурс совершения квантовым регулятором полезной работы [12]. Данный синергетический эффект носит чисто квантовый характер, классических аналогов не имеет [10,11] и, как следствие, приводит к квантовой самоорганизации неточных БЗ; создается в реальном времени робастная БЗ квантового самоорганизующегося интеллектуального регулятора из конечного числа неточных (не робастных) БЗ НР [11].

На Рис. 6 представлен интерфейс программного инструментария с выбранной квантовой пространственной корреляцией.

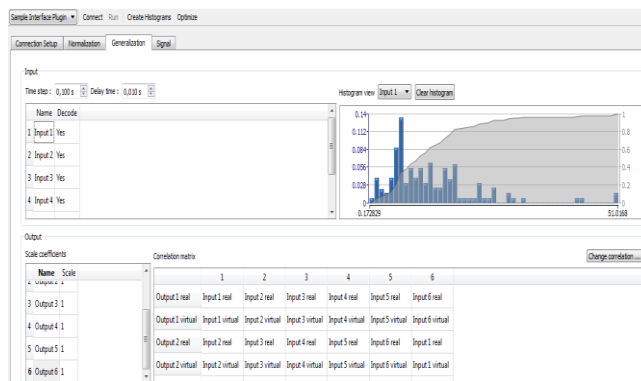


Рис. 6. Интерфейс программного инструментария QCOptKB™

Перейдем к практическому применению разработанной модели КНВ для формирования процессов управления коэффициентами усиления ПИД-регуляторов регулировки давления и заправки азота. Основная идея применения квантового координационного управления заключается в поиске и использовании скрытых взаимосвязей на основе корреляций между работой клапанов регулировки давления и подачи азота (см., Рис. 1 (а) и Рис. 2). Для этих целей, на основе различных ситуаций

управления и с применением ГА в [1-3] были спроектированы НР, изменяющие коэффициенты усиления классического ПИД регулятора и используются в данной работе.

В следующем разделе приведены результаты применения рассмотренных систем управления.

4. Анализ производительности и показатели качества работы регуляторов на этапах продувки и заправки

Проведем анализ производительности разработанных регуляторов.

Пример: этап продувки системы охлаждения азотом. На Рис. 7 и Рис. 8 представлены экспериментальные графики, иллюстрирующие величину давления на первом этапе продувки и сброса давления.

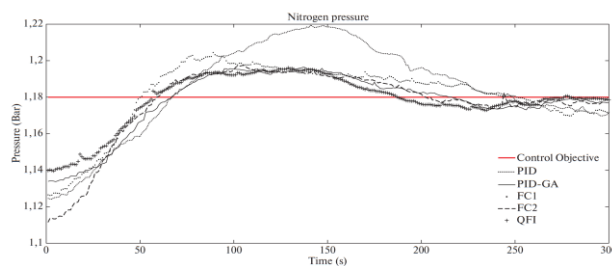


Рис. 7. Давление при продувке системы (при работе разных регуляторов)

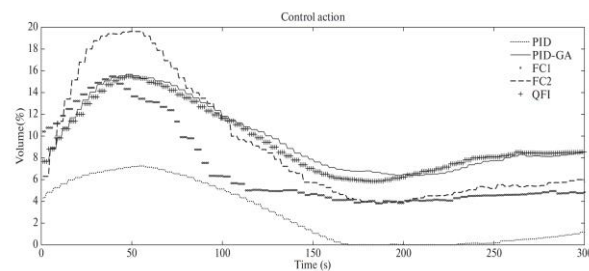


Рис. 8. Сравнение показателей работы регуляторов для сброса давления

На Рис. 9 представлен расход азота во время продувки системы.

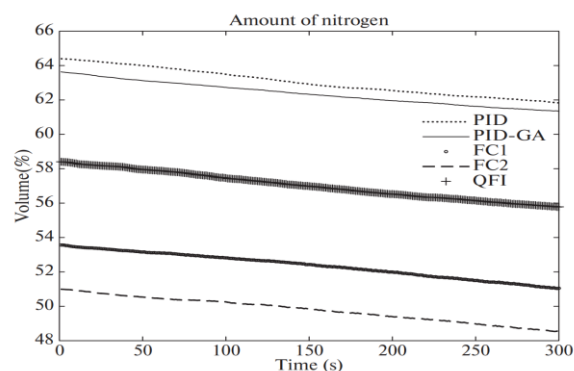


Рис. 9. Уровень азота расход азота во время продувки системы

Для всех регуляторов этот процесс имеет одинаковую скорость и не зависит от типа управления. На этот этап сильно влияет давление в источнике азота. Так как вентиль регулировки азота открыт, то расход продолжается. Отметим, что на данном этапе, вентиль сброса давления открыт, а величину давления поддерживает вентиль заправки V20. При этом он выполняет работу регулировки давления. Сам процесс продувки достаточно скоротечен и по-своему каждый раз не однозначен, т.к. на давление влияет давление в исходном хранилище азота, температура трубы подачи азота.

На Рис. 10 представлена динамика силы управления вентилем V20 при различных моделях регуляторов.

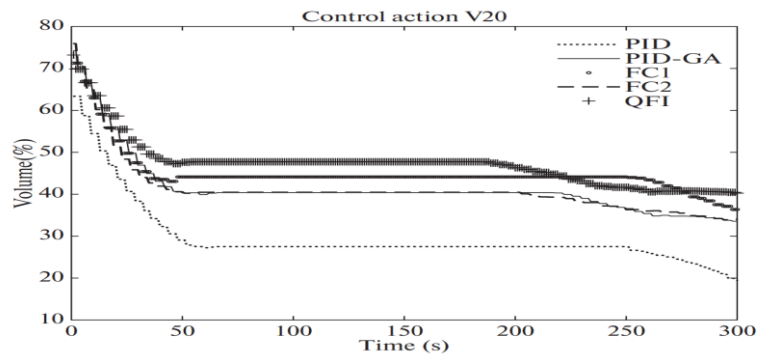


Рис. 10. Работа вентиля V20 на этапе продувки системы

Рассмотрим интегральный показатель качества управления (Рис. 11).

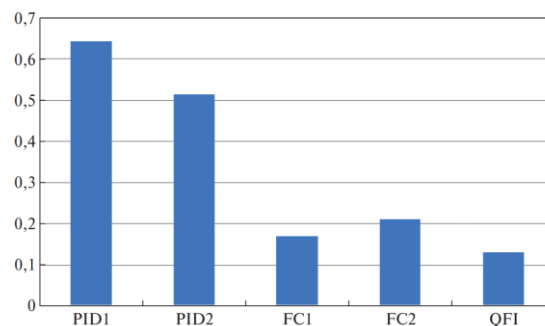


Рис. 11. Сумма квадратичная ошибка этапа продувки

Из результатов на Рис. 11 следует, что квантовый регулятор имеет более высокую степень гарантированного достижения цели управления на этапе продувки системы. В режиме продувки квантовый регулятор стабилизировал требуемый уровень давления с наилучшим качеством управления. Рассмотрим сравнение характеристик регуляторов этапа продувки из Табл. 1.

Табл. 1. Характеристики регуляторов этапа продувки

Тип регулятора	Быстродействие	Перерегулирование	Сложность управления
PID1	63	1,218	0,17
PID2	63	1,195	0,14
FC1	48	1,205	0,56
FC2	52	1,197	0,74
QFI	51	1,193	0,13

Из Табл. 1 следует, что качество управления квантового регулятора лучше характеристик управления от применения других регуляторов: среднеквадратичная ошибка и перерегулирование у квантового регулятора меньше, чем соответствующие величины других регуляторов. По быстродействию ИСУ получили самую высокую оценку. При этом квантовый регулятор находится между лучшим нечётким контроллером и вторым нечетким контроллером, которые лежат в основе КНВ. По оценке перерегулирования квантовый контроллер получил наилучшую оценку. Сложность реализации управления у квантового регулятора также оказалась ниже остальных регуляторов.

Пример: этап заправки. На этапе заправки, в накопительную ёмкость начинает поступать жидкий азот. При этом вентиль подачи азота открыт полностью, а давление регулирует вентиль регулировки давления. График стабилизации давления на этапе заправки представлена на Рис. 12.

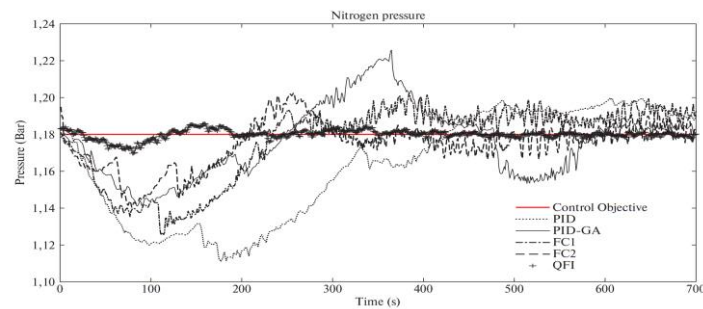


Рис. 12. Изменение давления во время проведения этапа заправки

Из Рис. 12 видно, что на этапе заправки квантовый регулятор держит требуемый уровень давления значительно лучше других испытываемых регуляторов. Затрачиваемая сила управления вентилем V19 регуляторами на этапе поступления азота представлена на Рис. 13.

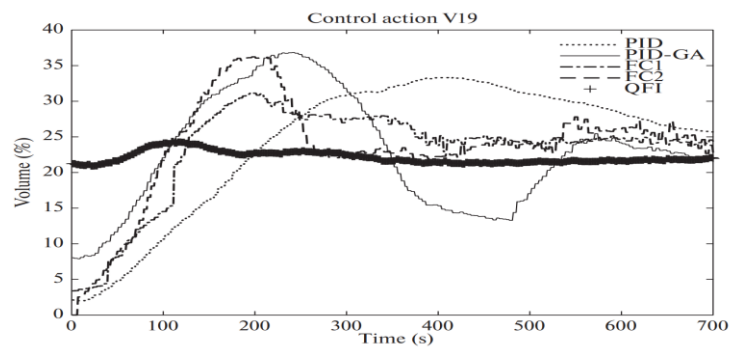


Рис. 13. Работа регулятора V19 во время поступления азота при управлении регуляторами различного типа

Уровень и скорость поступления азота зависит от давления в источнике азота. На Рис. 14 показано изменение уровня поступления азота в систему при управлении разными типами регуляторов.

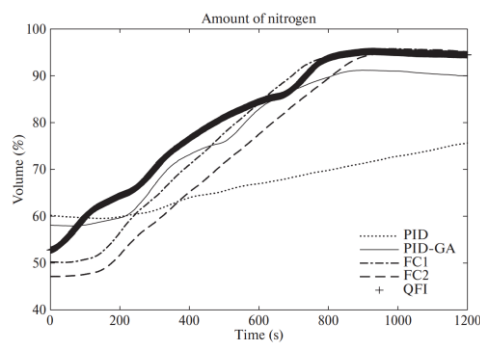


Рис. 14. Изменение уровня азота во время выполнения этапа заправки при разных типах регуляторов

Рассмотрим интегральный критерий качества управления Интеграл квадратичной ошибки регуляторов на этапе заправки азота представлен на Рис. 15.

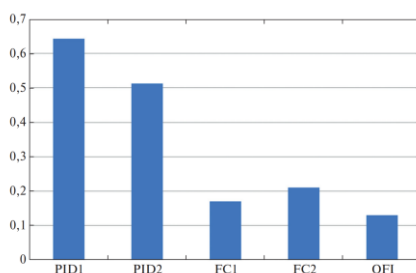


Рис. 15. Интеграл квадратичной ошибки этапа заправки азота

Данный критерий показывает, что квантовый регулятор имеет более высокую степень достижения цели управления на всём этапе заправки системы. Приведем в Табл. 2 прямые показатели качества работы регуляторов на этапе заправки.

Табл. 2. Показатели качества работы регуляторов на этапе заправки

Тип	Быстродействие	Перерегулирование	Сложность управления
PID	400	1.94	0.17
FC2	117	1.213	0.56
QFI	94	1.19	0.13

Квантовый регулятор на этапе заправки показал наибольшее быстродействие, низкий уровень перерегулирования и нижний уровень сложности реализации управляющих команд.

5. Применение квантового координационного регулятора: термодинамический анализ расхода полезного ресурса

Эффективность применения квантового интеллектуального регулятора в контуре управления автономными вентилями давления ($V19$) и подачи ($V20$) жидкого азота обсуждается в данном разделе. Рассмотрена дополнительная физическая интерпретация полученных экспериментальных результатов для указанных ОУ и приведены экспериментальные результаты применения квантового координационного интеллектуального управления взаимодействующими через скрытые связи вентилями давления ($V19$) и подачи ($V20$) жидкого азота на основе встроенного в контур управления координацией работы вентилях квантового интеллектуального регулятора.

5.1 Сравнение различных методов управления в режиме азотного охлаждения СП – магнита

Для демонстрации эффективности применения технологий интеллектуального квантового управления, сравним работу подсистемы азотного охлаждения с разными типами систем управления: координационного управления на основе КНВ (квантовый координационный интеллектуальный регулятор), нечеткого регулятора (НР), классического ПИД-регулятора и ручного управления оператором. Рассмотренные ранее результаты проведенных исследований в режиме охлаждения, показали, что очень важной задачей управления в данной системе является поддержание требуемого уровня давления при заправке азота от совместного управления двумя вентилями. Поэтому рассмотрим последовательно особенности применения квантового интеллектуального регулятора при автономном управлении вентилями давления $V19$ и расхода азота $V20$, а затем координационное управление данными вентилями на основе результатов, изложенных в [20, 23], а также дополнения новыми экспериментальными результатами.

Пример: Квантовое интеллектуальное управление вентилем давления при заправке жидким азотом. Схема применения квантового регулятора управления автономными вентилями давления и расхода азота и схема гелиевого сателлитного рефрижератора приведена на Рис. 1 и 2. Рассмотрим первый этап квантового интеллектуального управления автономным вентилем давления: квантовое интеллектуальное управление вентилем давления азота в системе охлаждения. Экспериментальные данные измерения системного давления осуществлено по схеме на Рис. 1, б при применении

управления человеком – оператором (а); при применении управления от ПИД – регулятора (б); при применении управления от нечеткого регулятора (в); и при применении управления от квантового регулятора (г). Ниже представлены результаты измерения давления в системе охлаждения при управлении человеком – оператором, ПИД – регулятором, нечетким регулятором и квантовым регулятором соответственно (Рис. 16).

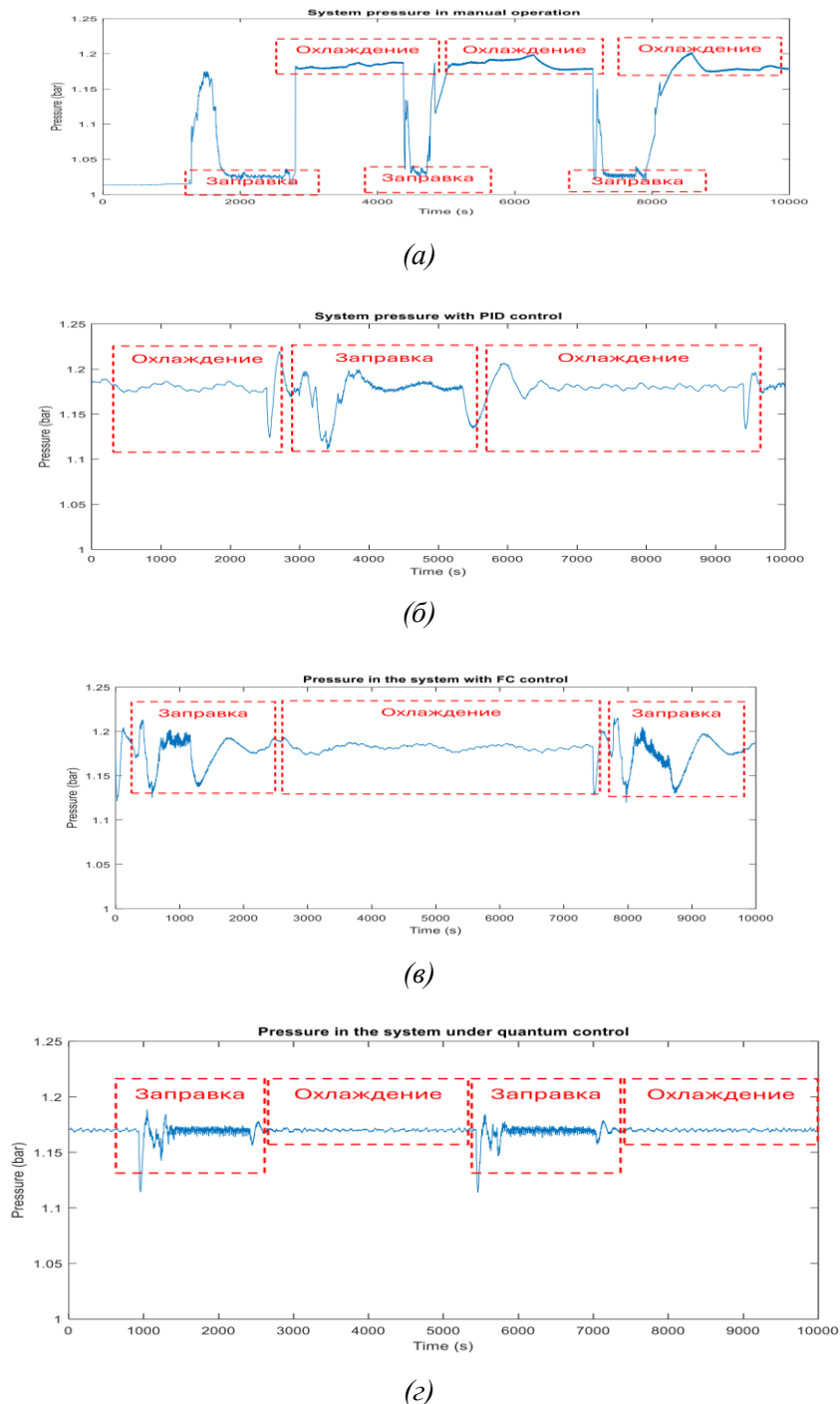


Рис. 16. Давление азота при управлении оператором (а). Давление азота при управлении ПИД-регулятором (б). Изменение давления азота при НР – управлении (в). Давление азота при управлении квантовым интеллектуальным регулятором на основе КНВ (г)

Примечание. На Рис. 16 приведены графики изменения давления в системе при работе в режиме заправки и охлаждения отмеченных ранее этапов 2 и 3. Процесс заправки завершается снижением давления ниже целевого значения, так как клапан подачи азота перекрывается, и установка переходит в штатный режим работы.

Поведение температурного режима, как конечный результат режима охлаждения СП – магнита жидким азотом, при управлении от разных типов регуляторов приведено на Рис. 17.

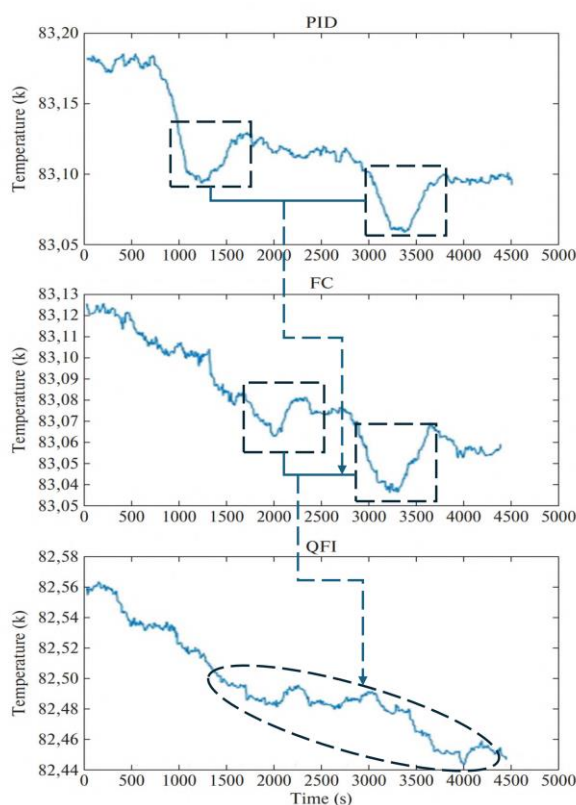


Рис. 17. Поведение температурного режима при управлении от разных типов регуляторов

Представленные результаты демонстрируют наглядно квантовое преимущество над применением традиционных регуляторов по всем показателям и критериям качества управления вентилем давления.

Отметим некоторые характерные особенности полученных результатов. НР был сформирован на основе полученного ОС с помощью программного обеспечения SCOptKB™. Коэффициенты усиления классического ПИД-регулятора были подобраны на основе обобщения опыта операторов криогенной установки и многократно протестированы в условиях реального эксперимента. Квантовый регулятор (в отличие от [18]) применяется как для вентилей сброса давления (и в своей основе QCOptKB™ содержит несколько квантовых нейронных сетей), так и для координационного управления в режиме завершения заправки.

На Рис. 17 приведены графики изменения давления при работе трёх типов регуляторов и оператора. На Рис. 17, (а) представлен график изменения давления при ручном режиме управления оператором. Рисунок 17, (б) иллюстрирует давление в системе при работе классического ПИД-регулятора с постоянными параметрами. На Рис. 17, (в) и, (г) представлена динамика изменения давления при управлении НР и координационным квантовым регулятором на КНВ соответственно. Проведенные исследования показали, что при реализации координационного квантового управления «скачки» температуры значительно меньше, расход полезного ресурса существенно снизился.

5.2 Сравнение энтропийных характеристик показателей качества управления работы и расхода полезного ресурса регуляторами

Информационно-термодинамический подход к универсальному описанию динамических объектов управления [21] на основе физического закона интеллектуального управления в виде рационально компромиссного распределения качеств управления (устойчивость по Ляпунову, управляемость и робастность (минимум потери полезного ресурса) и критерию физической реализации процессов управления по Петрову Б.Н. [8]) позволяет осуществить переход от модели интеллектуального к модели когнитивного управления на основе энтропийных оценок устойчивости

нелинейных систем [21,22]. Далее для иллюстрации и сравнения энтропийных оценок работы регулятора, используем экспериментальные результаты на Рис. 18 полученных ошибок и их скоростей на всех трех этапах работы технологического процесса с переменной структурой азотного охлаждения СП - магнита.

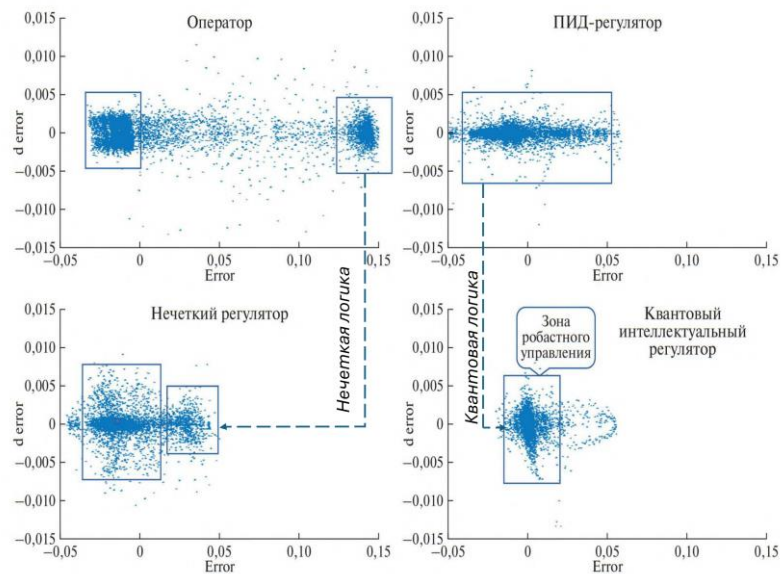


Рис. 18. Фазовые портреты динамического поведения ошибок и оценки устойчивости управления при применении разных видов регуляторов

Результаты анализа на Рис. 18 отчетливо показывают робастность квантового регулятора.

Рассмотрим энтропийные характеристики работы регулятора.

Пример: Энтропийные характеристики работы и расход полезного ресурса регуляторами. Следуя [21,23], применим формулу расчета скорости производства энтропии и её интегрального показателя (производства энтропии) в виде

$$\frac{dS}{dt} = K_D \dot{e}^2; \quad S = \int_0^t K_D \dot{e}^2 dt. \quad (1)$$

На Рис. 19 представлено согласно (1) сравнение скоростей производства энтропии регуляторами.

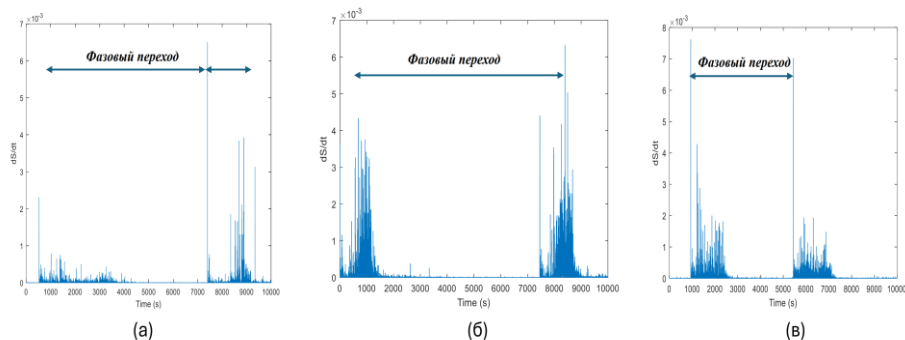


Рис. 19. Скорость производства энтропии (а) для ПИД-регулятора; (б) для НР; и (в) для КИВ

Скорость производства энтропии ПИД - регулятора ниже скорости производства энтропии в интеллектуальных регуляторах. Низкий уровень качества управления и низкий уровень энтропии связаны. Сам ОУ и его режимы работы обладают высокой сложностью и степенью неопределённости. Компенсировать сложность ОУ необходимо соответствующим уровнем интеллектуальности регуляторов, отнимая производство энтропии ОУ, согласно информационно-термодинамическому закону интеллектуального управления [36]. Дополнительно для иллюстрации энтропийных оценок

работы регулятора, рассмотрим энтропийные фазовые портреты (энтропии и её скорости) (Рис. 20 (а) – (в)).

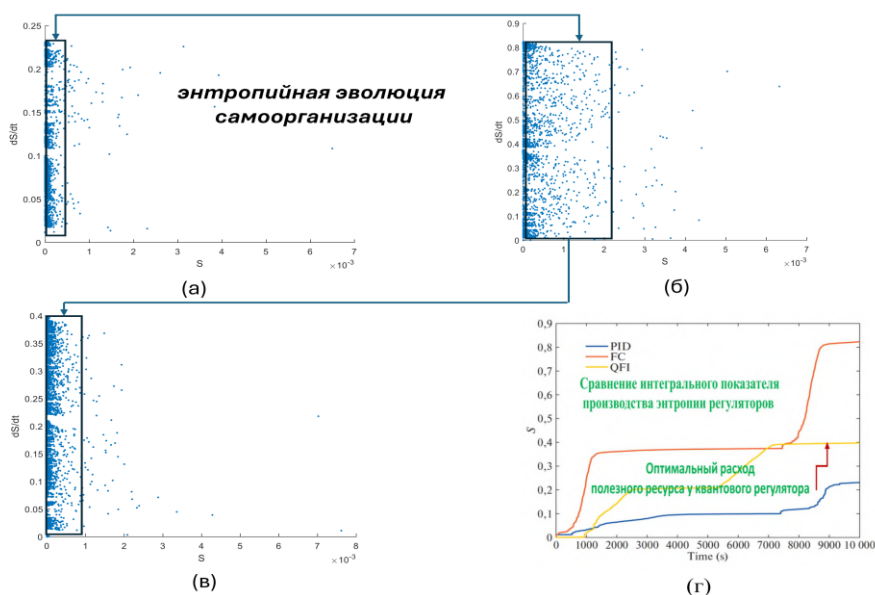


Рис. 20. Энтропийный фазовый портрет (а) для ПИД-регулятора; (б) для НР; (в) для квантового регулятора; и (г) сравнение интегрального показателя производства энтропии регуляторов

Поэтому НР на Рис. 18 следует логике действий человека – оператора, редуцируя ошибку управления более чем в три раза, а квантовый интеллектуальный регулятор, используя свойство НР, редуцирует ошибку управления более чем в два раза по отношению к ПИД – регулятору, устраняя избыточность информации для принятия рационального решения, исключая из динамики поведения второй неустойчивый аттрактор в НР. Энтропийные фазовые портреты на Рис. 20 иллюстрируют количественные оценки затрачиваемого полезного ресурса регуляторами для достижения точностных оценок, представленных на Рис. 18.

Примечание. Отметим, что при построении результатов графических материалов на Рис. 19 и Рис. 20 для оценок согласно (1) использовались *экспериментальные* значения ошибки и скорости ошибки управления, представленные на Рис. 18. Таким образом, приведенные результаты *физически строгие и математически корректны*, согласно [8], для экспериментального доказательства преимущества квантового интеллектуального управления и подтверждения выводов физического закона робастного интеллектуального управления слабо формализованными ОУ на основе квантового алгоритма самоорганизации неточных БЗ конечного числа НР.

Рассмотрим интегральный показатель производства энтропии (Рис. 20 (г)). Из Рис. 20 (г) видно, что производство энтропии квантового регулятора выше, чем производство энтропии ПИД регулятора и ниже, чем производство энтропии НР. Разброс энтропийных состояний энтропии квантового регулятора выше, чем у классического ПИД регулятора (свидетельствует о неспособности ПИД-регулятора снизить производство энтропии у ОУ – низкое производство него-энтропии) и ниже, чем у НР. Этот факт свидетельствует о когнитивно - рациональном распределении потери полезного ресурса квантовым интеллектуальным регулятором для гарантированного достижения цели управления, что согласуется с информационно-термодинамическим законом интеллектуального управления [21]. Квантовые регуляторы обладают рациональным свойством формирования требуемого уровня производства энтропии (затрачиваемой работы и потери полезного ресурса), наследуя минимальную сложность физической реализации у ПИД – регулятора и максимальный уровень интеллектуальности управления у НР. На основе приведенных результатов на Рис. 21 представлена обобщенная эволюция и сравнение точностных характеристик процесса управления давлением при азотном охлаждении СП – магнита и производства энтропии регуляторами на этапе заправки и за цикл (от заправки до заправки).

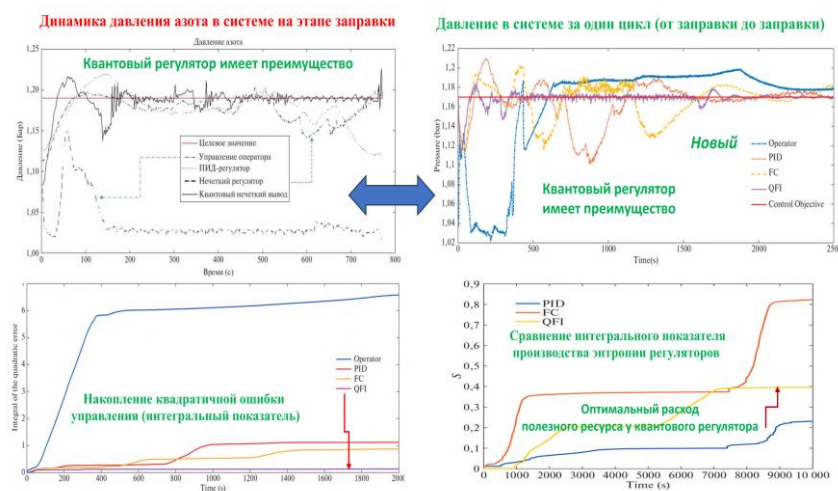


Рис. 21. Эволюция давления азота в системе на этапе заправки и за один цикл (от заправки до заправки) и сравнение накопления ошибки управления и расхода полезного ресурса (производства энтропии) различными видами регуляторов

Полученный экспериментально в данной работе синергетический эффект квантовой самоорганизации неточных БЗ НР управления клапанами давления и расхода жидкого азота основан на предсказанном теоретически и подтвержденном экспериментально синергетическом эффекте формирования дополнительной «термодинамической» силы управления на основе извлеченного количества квантовой информации, скрытого в классических состояниях законов изменения коэффициентов усиления гибридных нечетких ПИД – регуляторов [23].

Следовательно, самоорганизующийся квантовый регулятор на основе инструментария квантового «сильного» вычислительного интеллекта – (SC&QC) *OptKBTM* обладает способностью гарантированного достижения цели управления за счет когнитивно-рационального распределения полезного ресурса. В этом случае имеем программно – алгоритмическую реализацию когнитивно - рационального ИИ и, в отличие от других моделей ИИ, не требуется дополнительной субъективной интерпретации (объяснительной, доверенной и т.п.) результата.

Обсуждение моделей ИИ и анализ результатов. Понятие квантовый «слабый» и «сильный» вычислительный ИИ введено в [7,12,23] (на основе оптимизаторов баз знаний на квантовых и мягких вычислениях для интеллектуальных регуляторов) и отличается от «традиционных» определений (многих работ) «слабого» и «сильного» ИИ. «Объяснительный» и «доверенный» ИИ совместно с моделями «генеративного» ИИ рассматриваются в данной работе с позиции квантовых нейронных сетей реализации прямого и обратного квантового логического нечеткого вывода баз знаний на квантовых мягких вычислениях, изложенных в [13,23]. По своей сути представленные модели отличаются «движком» логического вывода принятия решения, что позволяет объединить сильные стороны разработанных моделей единым логическим выводом на основе моделей квантовой нечеткой логики и больших квантовых моделей обработки естественного языка (*QNLP* – quantum natural language processing). В данной работе квантовый когнитивно – рациональный «сильный» вычислительный ИИ применен для проектирования робастных самоорганизующихся баз знаний в нештатных (непредвиденных) ситуациях управления. Энтропийный анализ экспериментальной работы регуляторов показал, что квантовый интеллектуальный регулятор с «сильным» ИИ обладает объективным свойством (физически строгого и математически корректного доказательства) когнитивно - рационального расхода ресурса для совершения силой управления полезной работы, необходимой для гарантированного достижения цели управления. В оценках использовалась точная математическая модель (1) и экспериментальные данные о скорости ошибки управления. Именно поэтому данное свойство позволяет устранить необходимость субъективной интерпретации результатов «доверенного», «генеративного» и «объяснительного» моделей ИИ.

Таким образом, продемонстрировано квантовое преимущество применения технологии интеллектуальных вычислений в квантовой ИТ – инженерии интеллектуального управления на основе квантового координационного регулятора сложным плохо формализуемым и слабо

структурированным ОУ без знания его математической модели, т.е. решена одна из самых трудных задач промышленного рационально когнитивного ИИ в проекте «Индустрия 4.0 / 5.0 / 6.0».

Выводы

- Разработана отечественная квантовая ИТ-инженерия проектирования робастных самоорганизующихся ИСУ на основе квантового «сильного» вычислительного ИИ для слабоструктурированных ОУ и с плохо формализуемыми математическими моделями описания.
- Физический эксперимент и длительная эксплуатация с 2023г. робастной ИСУ показали робастность интеллектуального квантового регулятора, эффективность и надежность работы криогенной системы азотного охлаждения при смене режимов заправки и возникновения нештатных ситуаций.
- Экспериментально показан синергетический эффект квантовой самоорганизации неточных БЗ на основе КНВ в структуре квантового регулятора в режиме реального времени управления клапаном давления, клапаном расхода жидкого азота и совместной работы клапанов.
- Применение квантового самоорганизующегося регулятора приводит к оптимальному изменению коэффициентов усиления робастного гибридного ПИД – регулятора, минимальной сложности физической реализации и гарантирует достижение цели управления.
- Приведенный результат экспериментально подтверждает существование эффекта квантового преимущества применения квантового поискового алгоритма – КНВ в задачах интеллектуального координационного управления криогенной системой охлаждения СП – магнита жидким азотом.
- Разработанная квантовая сквозная ИТ масштабируема и тиражируема на подобного рода промышленные ОУ.

Список источников

1. Решетников А. Г., Ульянов С. В. Программно-алгоритмическая поддержка интеллектуальных систем управления на технологиях мягких вычислений // Программные продукты и системы. 2025. – №4. – С. 704-714.
2. Интеллектуальная система управления расходом жидкого азота в сборнике криогенной установки контроля СП магнитов: мягкие вычисления / Ю. Г. Беспалов, Д. А. Неополитанский, Д. Н. Никифоров [и др.] // Системный анализ в науке и образовании. – 2022. – №3. – С.138-159.
3. Formation of knowledge bases of fuzzy regulators based on the physical training signal of a nitrogen cryogenic plant using a genetic algorithm / Y. Bepalov, P. Zrellov, M. Katulin [et al.] // Physics of Particles and Nuclei. – 2024. – Т.55, № 1. – Pp. 566–568.
4. Необходимость применения интеллектуальных систем управления в экспериментальных ядерно-физических комплексах (типа NICA). Ч. I: Проблема нештатных ситуаций / О. И. Бровко, А. В. Елисеев, В. Д. Кекелидзе [и др.] // Системный анализ в науке и образовании. – 2019. – № 4. – С. 32-57.
5. Возможности применения сквозных квантовых информационных технологий в интеллектуальных системах управления слабо формализованными физическими объектами (типа комплекс NICA) / В. В. Кореньков, А. Г. Решетников, Г. П. Решетников, С. В. Ульянов// Системный анализ в науке и образовании. – 2018. – №. 4. – С. 10-53.
6. Ульянов С. В. Технологии интеллектуальных вычислений. Мягкие и дробные вычисления в интеллектуальном управлении / С. В. Ульянов, Г. П. Решетников. – Дубна: УНЦ ОИЯИ, 2013.
7. Litvintseva L. V., Ul'yanov S. V., Ul'yanov S. S. Design of robust knowledge bases of fuzzy controllers for intelligent control of substantially nonlinear dynamic systems: II. A soft computing optimizer and robustness of intelligent control systems //Journal of computer and systems sciences international. – 2006. – Т. 45. – №. 5. – С. 744-771.
8. Ульянов С. В. Квантовая релятивистская информатика. Ч. 4: квантовая релятивистская информация и измерения, квантовая релятивистская термодинамика и физические /

информационные пределы квантового управления, квантовые релятивистские вычисления и алгоритмы, квантовая программная инженерия. М.: Курс. 2025.

9. Ulyanov S. V. System and Method for Control Using Quantum Soft Computing. – US Patent No 6,578,018 B1, 2003.
10. Решетников А. Г., Ульянов В. С., Ульянов С. В. Робастное интеллектуальное управление автономным роботом: Квантовая самоорганизация неточных баз знаний – эксперимент // Известия РАН. Теория и системы управления. – 2023. – №5. – С. 127–146.
11. Ulyanov S. V. Self-organizing Quantum Robust Control Methods and Systems for Situations with Uncertainty and Risk. – US Patent No 8788450 B2, 2014.
12. Quantum Engineering of “Strong” Computational AI Robust Control. Part III. Vol. 1: Physical intelligent control quantum law; Quantum algorithm of imperfect knowledgebase self-organization; Quantum intelligent feedback force control and information-thermodynamic stability of port-Hamiltonian control object; Applied SW/HW toolkit SCOptKBTM/QCOptKBTM / V. V. Borovinskiy [et al.]. – М.: Kurs, 2025.
13. Интеллектуальная когнитивная робототехника. Часть 4.1: квантовый «сильный» вычислительный интеллект в интеллектуальном управлении роботизированными автономными системами в «Индустрия 4.0 / 5.0» / Р. Ю. Капков, О. Ю. Тятюшкина, А. Г. Решетников, С. В. Ульянов. – Москва: Курс. – 2024. – 483 с.
14. Способ и система интеллектуального самоорганизующегося координационного управления объектами с неопределенными параметрами в нештатных ситуациях : [патент на изобретение] / Д. Н. Никитин, А. Г. Решетников, С. В. Ульянов. – ФИПС, РФ, 2025. – Заявка: 2025 117 067 от 20.06. 2025.
15. Свидетельство о Государственной регистрации программы для ЭВМ № 2024611065 Интеллектуальная координационная система управления на основе квантового нечеткого вывода для Tango Controls / П. В. Зрелов, М. С. Катуплин, А. Г. Решетников, С.В. Ульянов. – Заявка № 2023689678. – Дата государственной регистрации в Реестре программ для ЭВМ 17 января 2024.
16. Бустер комплекса НИКА: сверхпроводящий синхротрон нового поколения / А. В. Бутенко, О. И. Бровко, А. Р. Галимо [и др.] // Успехи физических наук. – 2023. – Т. 193, № 2. – С. 206-225.
17. Ульянов С. В. Синергизм информации в интеллектуальном управлении и принцип компенсации неполноты извлекаемых знаний. Ч. 1: Парадоксы логики адекватности физических моделей в проблеме Вундгейлера // Системный анализ в науке и образовании. – 2013. – № 1. – С. 65-101.
18. Интеллектуальная система дистанционного управления давлением и расходом жидкого азота в криогенной системе сверхпроводящих магнитов: программно-аппаратная платформа / А. В. Бутенко, С. А. Костромин, Д. Н. Никифоров [и др.] // Письма в ЭЧАЯ. – 2023. – Т. 20, № 2(247). – С. 183–199.
19. Никифоров Д. Н., Решетников А. Г., Ульянов С. В. Квантовое интеллектуальное управление давлением азота в криогенной установке испытательного стенда фабрики магнитов // Физика элементарных частиц и атомного ядра. – 2024. – Т. 55, №. 3. – С. 677–683.
20. Reshetnikov A. G., Ulyanov S. V. Intelligent information technologies based on quantum computing in the task of controlling elements of an accelerator complex // Physics of Particles and Nuclei. – 2024. – Vol. 55, №. 3. – Pp. 566-568.
21. Ulyanov S. V. Quantum Algorithm of Imperfect KB Self-organization. Pt I: Smart Control-Information-Thermodynamic Bounds // Artificial Intelligence Advances. – 2021. – Vol. 3, No 2. – DOI: <https://doi.org/10.30564/aia.v3i2.3171>
22. Термодинамические ограничения и информационные условия устойчивости, управляемости и робастности интеллектуального когнитивного управления // С. В. Ульянов, А. А. Шевченко, А. В. Шевченко, О. Ю. Тятюшкина // Программные продукты и системы. – 2021. – Т. 34, № 4. – С. 524–542. – DOI: 10.15827/0236-235X.136.524-542.
23. Интеллектуальная когнитивная робототехника. Ч. 4.3: Промышленный квантовый «сильный» вычислительный интеллект в интеллектуальном управлении роботизированными

социотехническими системами «Индустрии 4.0/5.0» / В. В. Боровинский, Р. Ю. Капков, А. Г. Решетников, С. В. Ульянов. – Москва: Курс, 2025. – 459 с.

24. Ulyanov S. V. Quantum Fuzzy Inference Based on Quantum Genetic Algorithm: Quantum Simulator in Intelligent Robotics // International Conference on Theory and Application of Soft Computing, Computing with Words and Perceptions. – Cham : Springer International Publishing, 2019. – Pp. 78-85. – https://doi.org/10.1007/978-3-030-35249-3_9.
25. REST API — Tango Controls 10.0.0 documentation. –Tango Controls Community, 2017-2025. – URL: <https://tango-controls.readthedocs.io/en/latest/Reference/bindings/rest-api.html>.