

УДК 658.012.011.56

ИТ МЯГКИХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В СЛАБО ФОРМАЛИЗОВАННЫХ ФИЗИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ: ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ АЗОТНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ БЕЗ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ОБЪЕКТА

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.

Рассматривается применение методов сквозной ИТ-инженерии на основе мягких вычислений в задачах интеллектуального управления слабоструктурированными и плохо формализуемыми физическими (классическими) объектами с не доопределенными (скрытыми) параметрами. На примере объекта управления из интеллектуальной робототехники и самоорганизующихся интеллектуальных регуляторов, встроенных в бортовые системы управления, показана эффективность и преимущество применения разработанных интеллектуальных систем управления на основе ИТ мягких вычислений. Применяемая теорема об универсальном аппроксиматоре нечеткими системами с заданной точностью плохо формализованных объектов реализована на инструментарию SCOrtKBTM проектирования баз знаний нечетких регуляторов. Приведен пример существенно нелинейного и динамически неустойчивого автономного интеллектуального робота, имитирующего взаимодействие вентилей давления и расхода азота (первый этап ИТ), а также управляющего давлением и расходом азота в криогенной установке охлаждения сверхпроводящего (СП) - магнита в «мега – сайенс» проекте NICA. В этом случае СП – магнит рассматривается как объект управления со слабоструктурированной, плохо формализуемой моделью с не доопределенными параметрами, индивидуальная информация о которых содержится в обучающем сигнале, измеренного на реальном объекте. Показано преимущество адаптивного нечеткого управления классическими объектами управления как направления применения ИИ в теории и систем управления. Технология мягких вычислений и нечеткий вывод регулятора с применением инструментария SCOrtKBTM позволяют извлекать знания из измеренного (или смоделированного) обучающего сигнала и реализованы на промышленном процессоре, что существенно расширяет возможности эффективного применения ИТ-инженерии и масштабирования на роботизированные производства в проектах типа «Индустрия 4.0 / 5.0 / 6.0».

Ключевые слова: интеллектуальные системы управления, нечёткий нейронный контроллер, генетический алгоритм, сверхпроводящий магнит, ускорительный комплекс.

Для цитирования:

Решетников А. Г., Ульянов С. В. ИТ мягких вычислений в слабо формализованных физических объектах: интеллектуальное управление азотным охлаждением сверхпроводящих магнитов без математической модели объекта // Системный анализ в науке и образовании. 2026. № 2. С. 36–68. EDN: PQOZNH. URL: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/717>.



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>

IT OF SOFT COMPUTING IN WEAKLY FORMALIZED PHYSICAL OBJECTS: INTELLIGENT CONTROL OF NITROGEN COOLING OF SUPERCONDUCTING MAGNETS WITHOUT A MATHEMATICAL OBJECT MODEL

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_46@mail.ru.

This article examines the application of end-to-end IT engineering methods based on soft computing to intelligent control tasks involving weakly structured and poorly formalized physical (classical) objects with undetermined (hidden) parameters. Using the example of a controlled object based on intelligent robotics and self-organizing intelligent controllers integrated into onboard control systems, the effectiveness and advantages of using the developed intelligent control systems based on soft computing are demonstrated. The applied theorem on a universal approximator for fuzzy systems with a given accuracy for poorly formalized objects is implemented using the SCOptKBTM toolkit for designing knowledge bases for fuzzy controllers. An example is given of a highly nonlinear and dynamically unstable autonomous intelligent robot simulating the interaction of nitrogen pressure and flow valves (the first stage of the IT), as well as controlling the nitrogen pressure and flow in a cryogenic cooling unit for a superconducting (SC) magnet in the NICA mega-science project. In this case, the SC magnet is considered a control object with a weakly structured, poorly formalized model with underdetermined parameters, the individual information about which is contained in the training signal measured on the actual object. The advantages of adaptive fuzzy control of classical control objects as an application of a cognitive – rational AI in control theory and systems are demonstrated. Soft computing technology and fuzzy controller inference using the SCOptKBTM toolkit enable knowledge extraction from a measured (or simulated) learning signal and are implemented on an industrial processor, significantly expanding the possibilities for the effective application of IT engineering and scaling to robotic production in Industry 4.0/5.0/6.0 projects.

Keywords: intelligent control systems, fuzzy neural controller, genetic algorithm, superconducting magnet, accelerator complex.

For citation:

Reshetnikov A. G., Ulyanov S. V. IT of soft computing in weakly formalized physical objects: intelligent control of nitrogen cooling of superconducting magnets without a mathematical object model. *System analysis in science and education*, 2026;(1):36-68 (in Russ). EDN: PQOZNH. Available from: <https://sanse.ru/index.php/sanse/article/view/717>.

Введение

В физике высоких энергий особое внимание исследователей фундаментальных проблем строения материи привлекают вопросы, связанные с возникновением Вселенной и, особенно, физические процессы, происходившие после так называемого «большого взрыва». С целью проведения таких исследований в Дубне в Объединённом институте ядерных исследований (ОИЯИ) разработан ионный коллайдер – *Nuclotron based Ion Collider Facility (NICA)* на энергию 4÷11 ГэВ на нуклон [1,2]. Мегапроект *NICA* ставит перед его участниками новые задачи для квантовой

релятивистской физики [3,4], связанные с исследованием кварк-глюонной плазмы вблизи точки фазового перехода ядерной материи [1,2]. Физическая модель объекта управления и его математическая модель относятся к т. н. слабо формализованным моделям, а корректное определение динамики объекта и управления им требует привлечения новых информационных технологий (ИТ) и методов интеллектуального управления [5,6], позволяющих компенсировать неполное знание свойств объекта соответствующей спроектированной базой знаний (БЗ) в системе управления [7,8].

Ситуация с достижением устойчивого управления сложных экспериментальных установок осложняется следующими обстоятельствами: 1) эффектом не сохранения постоянства физических свойств ряда систем в течение сеанса работы ускорительного комплекса и, особенно, от сеанса к сеансу, что требует затрат ресурсов 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 [2,7,9]. Перечисленные обстоятельства и их индивидуальные особенности определяют скрытность (не наблюдаемость) и недоопределённость параметров физических и математических моделей. Отсутствие информации о перечисленных факторах должно учитываться в производственных правилах БЗ интеллектуальных нечетких регуляторов (НР) системы управления. Сквозные ИТ позволяют спроектировать иерархические интеллектуальные системы управления (ИСУ), позволяющие перераспределить степень ответственности принятия решения в зависимости от динамически изменяющейся ситуации.

Для разработки эффективного управления в условиях непредвиденных (нештатных) ситуаций управления физическими объектами с не доопределёнными параметрами выбраны технологии мягких и квантовых вычислений. В данной работе рассмотрены основные этапы и особенности применения технологии мягких вычислений к одной из подсистем, в частности системе азотного охлаждения сверхпроводящего (СП) магнита фабрики магнитов ЛФВЭ ОИЯИ.

Примечание. Традиционные системы управления не учитывают возникновение штатных ситуаций управления и не включают в контур управления человеческий фактор, что не гарантирует своевременного достижения цели управления – получение максимальной интенсивности ускоренного пучка и устойчивое повторение требуемых режимов ускорения с минимальными затратами полезных ресурсов, например, таких, как: время настройки и проведения соответствующих исследований, электроэнергия и т.п. Это связано с тем, что классические методы теории управления обладают методами синтеза и проектирования для хорошо формализованных и хорошо описанных объектов управления (ОУ), функционирующих в заранее известных условия и ситуациях. Для компенсации возникающих в процессе моделирования и эксперимента аппроксимаций и упрощений, требуются новые принципы теории искусственного интеллекта в виде сбора и интеллектуальной обработки больших структурированных данных, робастного интеллектуального управления физическим экспериментом и соответствующего интеллектуального инструментария исследования (*computational intelligence toolkit*), позволяющие ослабить влияние ошибки аппроксимации на качество разработанной модели управления и сформировать робастные модели физических объектов, не чувствительных к изменениям условий функционирования и внутренним изменениям параметров структуры.

В результате возникает проблема разработки модели физического или логического объектов и самого интеллектуального управления робастным физическим и логическим экспериментом с учетом, например, начальной априорной информации об объекте других особенностей. Трудности поиска решения такой задачи, в свою очередь, связаны с необходимостью реализации ряда физических и информационно-термодинамических принципов робастного интеллектуального управления.

В данной работе решение перечисленных вопросов рассмотрено на примере существенно нелинейного и динамически неустойчивого автономного интеллектуального робота, имитирующего взаимодействие вентилей давления и расхода азота (первый этап ИТ), а также управляющего давлением и расходом азота в криогенной установке охлаждения сверхпроводящего (СП) – магнита в «мега – сайенс» проекте *NICA*. В этом случае СП – магнит рассматривается как объект управления со слабоструктурированной, плохо формализуемой моделью с не доопределёнными параметрами, индивидуальная информация о которых содержится в обучающем сигнале, измеренного на реальном объекте.

1. Постановка и метод решения задачи: реализация полученных решений

Исследование процессов управления объектами управления со слабоструктурированной, плохо формализуемой моделью с не доопределенными параметрами, индивидуальная информация о которых содержится в обучающем сигнале, измеренного на реальном объекте имеют свои отличия от традиционных методов управления специфику. Рассмотрим кратко некоторые особенности постановки и выбора метода решения такой задачи.

1.1 Постановка задачи

Необходимо разработать и внедрить в эксплуатацию ИСУ с соответствующей БЗ, позволяющей компенсировать отсутствие информации о математической модели объекта управления (ОУ). Формирование БЗ осуществляется на основе извлечения знаний из обучающего сигнала (ОС), полученного путем измерения реального сигнала с физического ОУ. ОС содержит необходимую информацию о важных качественных особенностях требуемого физического поведения ОУ. Получить сигнал обучения (ОС) без использования математической модели ОУ позволяет применение генетического алгоритма (ГА). 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 – *SCOptKBTM* [10-12].

1.2 Метод решения

Данный подход основан на решении следующих задач ИИ: 1) извлечение объективных знаний из ОС; 2) построение оптимальной структуры ННС для формирования оптимальных видов и параметров функций принадлежности лингвистических переменных в узлах ННС и оптимального количества внутренних слоев ННС для реализации глубокого машинного обучения; 3) построение БЗ для НР на основе извлеченных знаний. Инструментарий ОБЗ *SCOptKBTM* позволяет реализовать теорему об универсальном аппроксиматоре, согласно которой БЗ НР содержит конечное число продукционных правил, учитывает все качественные свойства не доопределенной модели ОУ и реализует компенсацию не известных (скрытых) свойств за счет конечного (информативного) числа продукционных правил БЗ. ОБЗ *SCOptKBTM*, построенный на трех ГА, позволяет получить оптимальную структуру ННС [10,13].

1.3 Особенности методологии проектирования ИСУ на мягких вычислениях

Методология проектирования ИСУ, основанная на технологии мягких вычислений, рассматривает в качестве базиса структуру нечеткого регулятора (НР) как один из вариантов эффективного проектирования традиционных систем автоматического управления (САУ) [7]. С самого момента своего появления (1974г.) модели НР демонстрируют повышенную способность управления динамическими объектами управления (ОУ), которые обладают слабо формализованной структурой или функционируют в условиях неопределенности или неточности исходной информации, непредвиденных ситуациях или информационного риска. В работе представлен первый этап проектирования встраиваемых самоорганизующихся ИСУ с применением программного инструментария *QSCIT (Quantum Soft Computational Intelligence Toolkit)*, основанный на технологии мягких вычислений – *SCOptKBTM*, и предназначенный для проектирования робастных БЗ в самоорганизующихся ИСУ.

1.4 Физическая модель ОУ и метод интеллектуализации процессов управления

В качестве объекта интеллектуализации рассматривается процесс управление давлением азота в криогенной установке испытательного стенда сверхпроводящих (СП) магнитов фабрики магнитов ЛФВЭ ОИЯИ. СП магнит рассматривается как объект управления с плохо формализованной структурой и со многими скрытыми параметрами в модели технологического процесса охлаждения [12,14]. Основу интеллектуального управления составляет информационно – термодинамический закон оптимального распределения качественных характеристик управления таких как устойчивость, управляемость и робастность [15-17]. Формирование БЗ осуществляется на основе извлечения знаний из обучающего сигнала (ОС), полученного путем измерения реального сигнала с физического ОУ.

ОС содержит необходимую информацию о важных качественных особенностях требуемого физического поведения ОУ. Получить сигнал обучения (ОС) без использования математической модели ОУ позволяет применение генетического алгоритма (ГА) [12,14,15]. 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 – *SCOptKBTM*. Подробно рассматривается технология проектирования встраиваемых НР на основе физически измеряемого сигнала обучения. Приводится описание процесса извлечения ОС с применением ГА на реальной установке. Представлено разработанное программное обеспечение, используемое в системе *TANGO Control* для настройки и управления экспериментальными установками. Приведено сравнение НР, разработанных с использованием программного инструментария «Оптимизатор Баз Знаний» с классическим ПИД-регулятором. Представлены преимущества и ограничения применения технологии на мягких вычислениях.

1.5 Результат работы

Теоретическое обоснование и экспериментальное доказательство преимущества применения интеллектуальных вычислений (типа мягких вычислений) в разработке ИСУ и проектировании НР, в частности преимущества интеллектуального управления плохо формализованными и слабо структурированными ОУ перед традиционным методом управления человеком – оператором и ПИД – регулятором.

1.6 Промышленное применение

Первый экспериментальный результат получен на реальном физическом объекте в [18] для ИСУ охлаждением СП магнита ускорительного комплекса мега – сайенс проекта разработки коллайдера *MICA* [2]. Экспериментально продемонстрирована работоспособность и эффективность созданной интеллектуальной системы дистанционного управления технологическим процессом охлаждения СП – магнита с гарантированным достижением устойчивой зоны сверхпроводимости [2,19].

В данной работе на примере управления уровнем давления азота в сборнике криогенной установки, как первого этапа процесса охлаждения, рассматривается и обосновывается выбранная структура и проектирование БЗ НР системы интеллектуального управления в процессе охлаждения и заправки азотом.

Рассмотрим конкретный пример и особенности применения разработанной ИТ проектирования интеллектуальных НР на мягких вычислениях в робастном управлении уровнем давления и расходом жидкого азота в криогенной системе охлаждения СП – магнита [14,19].

2. Технологические особенности управления криогенной системе охлаждения СП – магнита как физического объекта управления

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

Процесс охлаждения жидким азотом состоит из двух этапов: 1) *азотный* режим, в котором охлаждение экрана и выходных элементов тоководов выполняется азотом, 2) *гелиевый* режим, в котором азот применяется в том числе и для охлаждения гелия, который в свою очередь охлаждает ядро и входные тоководы магнита.

При этом, оба этапа сопровождаются периодической заправкой азота каждые 1-2 часа. Температурный режим магнита должен пройти несколько стадий для достижения режима сверхпроводимости и его последующей поддержки.

Эффективность прокачки, охлаждения магнитного элемента и поддержание режима сверхпроводимости зависит, в том числе, и от давления в системе охлаждения и уровня азота в сборнике. При этом необходимо учитывать увеличение и уменьшение расхода азота в процессе

нагрева и охлаждения магнитного элемента с учетом заложенной неточности исполнительного элемента (вентилia).

Перечисленные технологические качественные характеристики процесса охлаждения учитываются в производственных правилах БЗ НР.

На Рис. 1 представлен контур управления первого уровня, реализованный в виде пропорционально-интегрально-дифференциального (ПИД) регулятора с настраиваемыми параметрами регулирования (K_p , K_i , K_d).

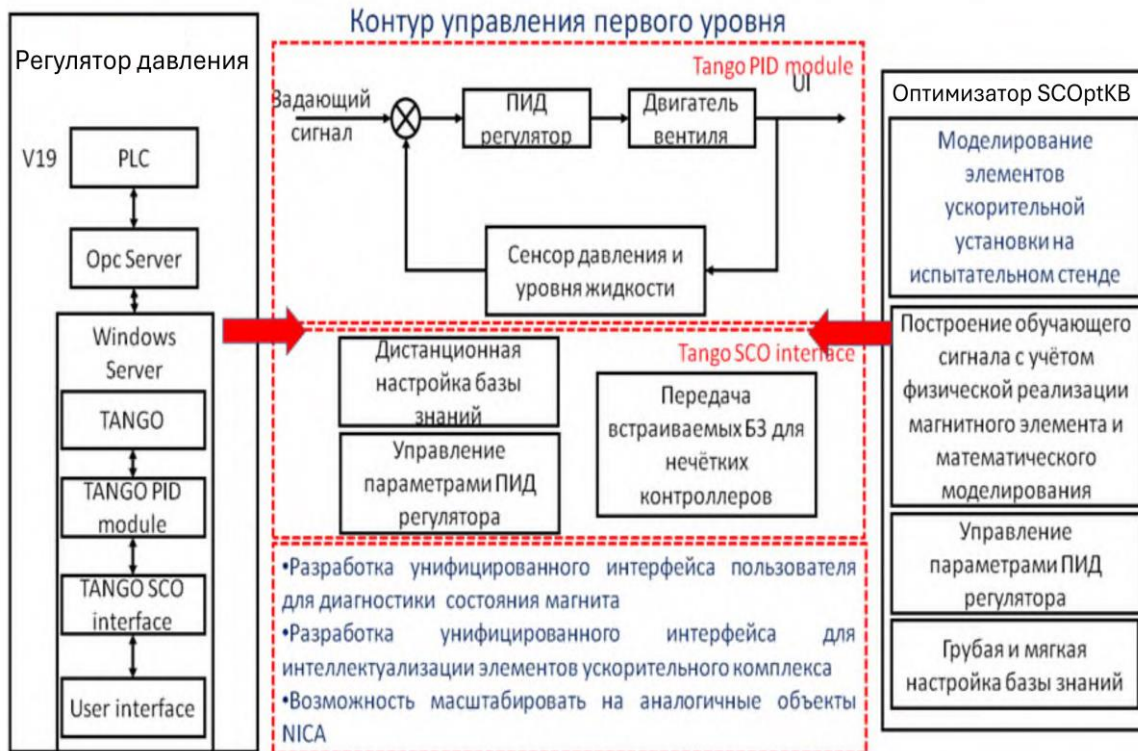


Рис. 1. Контур управления первого уровня, на основе встраиваемого программного ПИД- регулятора

Выбор оптимальных параметров управления зависит как от перечисленных особенностей в реализации отдельного магнитного элемента, так и при управлении группой магнитных элементов.

Подход с применением квантовых и мягких вычислений предполагает извлечение оптимальных траекторий изменения параметров управления из различных информационных источников (математическое моделирование, реальный физический сигнал, экспертные оценки, экспериментальные данные) и формирование БЗ встроенных НР для управления параметрами регулятора, а также квантового нечеткого регулятора для управления группой взаимосвязанных магнитных элементов.

Одной из основных идей применения интеллектуального управления является разработка унифицированного инструментария проектирования встраиваемых в физическую установку самоорганизующихся ИСУ с целью повышения эффективности и надежности ее функциональности при эксплуатации ОУ [10,11].

Кратко рассмотрим программно-алгоритмическую платформу процесса проектирования встраиваемых нечетких контроллеров для действующего макета дистанционного управления технологического процесса охлаждения СП – магнита.

Основу программно-алгоритмической платформы составляют технологии интеллектуальных вычислений (мягкие и квантовые вычисления, квантовые нечеткие алгоритмы управления и квантовое нечеткое программирование [14-16]). Применение указанных технологий в системе охлаждения СП магнитов позволяет гарантированно достигать зоны устойчивой сверхпроводимости, при этом улучшая оптимальные показатели по противоречивым критериям качества (температура, расход азота, быстродействие, поддержание требуемого уровня давления, сложность управления).

Сам процесс проектирования основан на принципе сохранения нижнего (исполнительского) уровня классического управления [16], что позволяет учесть особенности комплекса системы управления СП магнитом, состоящего из разнородных модулей со своими протоколами передачи данных и управления (Рис. 2).

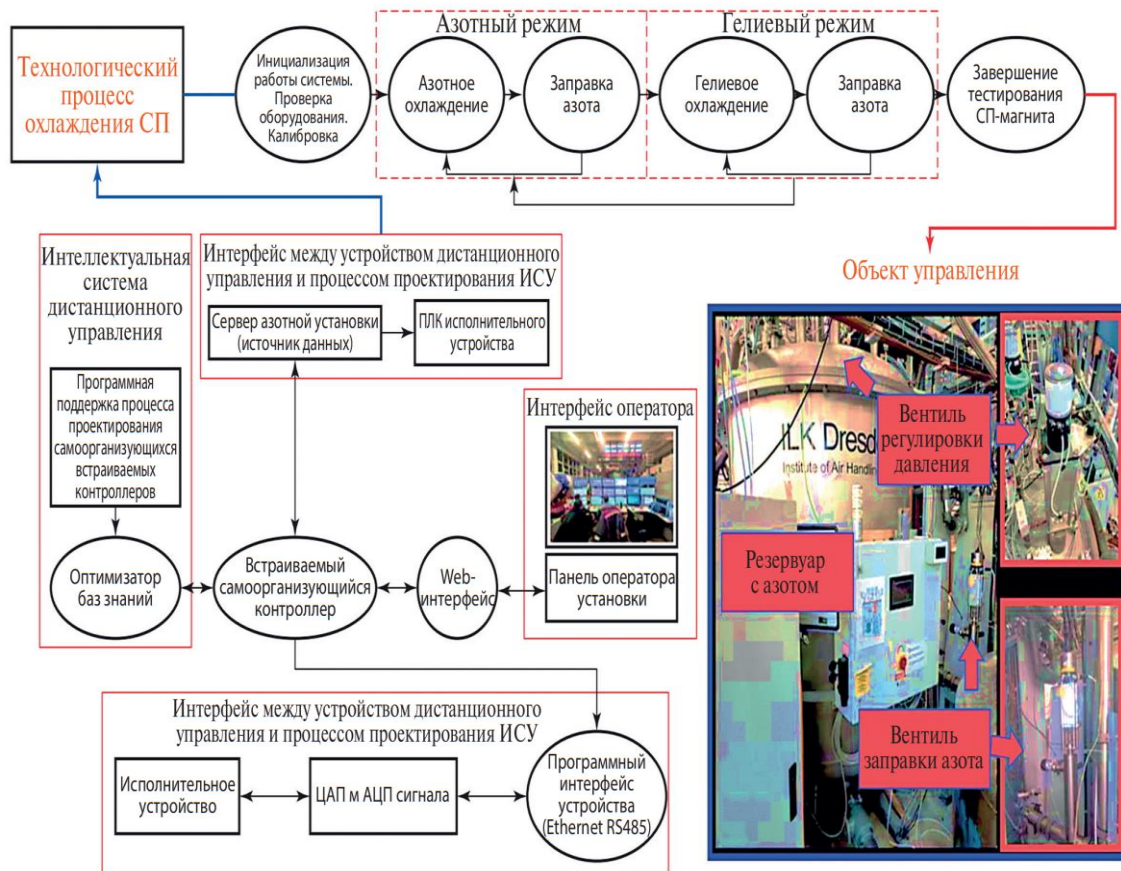


Рис. 2. Структурная схема системы связи и подсистем ИСУ с удалённым объектом управления

Такого рода системы в теории интеллектуальных систем называют плохо формализуемыми и слабоструктурированными [10,11], исследования подобных систем являются актуальными в задачах управления в мегасайнс проектах типа NICA [2,5,6].

Интеллектуальные регуляторы, принципы работы которых основаны на новых сквозных (end-to-end) квантовых информационных технологиях, внедрены на действующем комплексе с использованием классических технологий управления технологическими системами на основе фреймворка TANGO Controls [9,12]. 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 в сборнике криогенной установки, как первого этапа процесса охлаждения, рассматривается и обосновывается выбранная структура системы интеллектуального 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.

В азотном режиме охлаждения, динамика давления в накопительной ёмкости достаточно стабильна, что позволяет придерживаться расчетного времени охлаждения с соблюдением всех технологических этапов процесса испытания. Однако, с учётом наличия нескольких испытательных сателлитов общего канала заправки азота, целесообразно сокращать время заправки каждого

сателлита. На Рис. 3 представлен график изменения температуры входа и выхода канала подачи гелия, верхнего и нижнего ярма линзы СП – магнита в процессе криогенных испытаний.

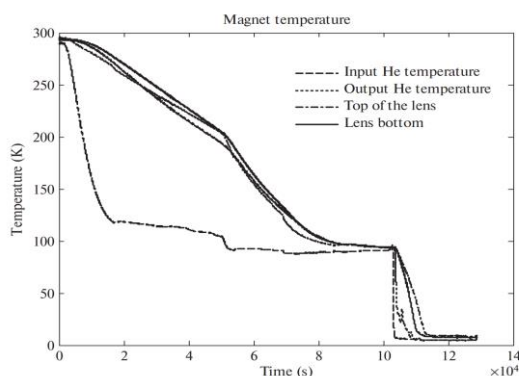


Рис. 3. Показания датчиков температуры линзы СП магнита и гелиевого канала в процессе криогенных испытаний

В процессе заправки азотом сначала сбрасывается давление в накопительной ёмкости до атмосферного, затем производится открытие вентиля заправки (подачи) азота (V20) (Рис. 2, вентиль заправки азота), вызывающее резкий рост давления, достигающего пикового значения с последующим снижением и выходом на стабильный рабочий режим.

После закрытия вентиля подачи азота (V20), давление в системе начинает расти, выполняется включение автоматической системы управления для отработки вентилем регулировки давления (V19) переходного процесса, обеспечивая максимальную скорость набора давления при минимальном перерегулировании и времени установки требуемого состояния. Критерием оценки качества управления в азотном режиме является минимизация отклонения давления от целевого значения. Дополнительным, но безусловно важным, критерием является и сам расход полезного ресурса – азота.

Второй (гелиевый) режим может сопровождаться резким понижением давления азота или, наоборот, его ростом. Оператор, управляющий установкой, может регулировать этот процесс вручную, приоткрывая вентиль подачи азота, тем самым управляя динамикой давления в сообщающихся сосудах и делая ее более стабильной. В этом режиме основным критерием является поддержание заданного значения давления, поскольку изменение давления будет влиять и на качество охлаждения, и на состояние сверхпроводимости.

На примере криогенного стенда фабрики магнитов, рассмотрим особенности технологического процесса охлаждения СП магнита. Основной задачей криогенного стенда научно экспериментального отдела СП магнитов и технологий (НЭОСМТ) Лаборатории физики высоких энергий им. В.И. Векслера и А.М. Балдина (ЛФВЭ) ОИЯИ является проведение криогенных испытаний СП магнитов типа «Нуклотрон» и получение экспериментальных данных, основываясь на основе которых магниты будут размещаться на кольцах ускорительного комплекса NICA. Для двух колец проекта NICA (синхротрона бустера и кольца коллайдера) необходимо изготовить более 250 магнитов и провести для них криогенные испытания, удовлетворяющие всем технологическим параметрам.

Особенностью одновременного управления и процессом заправки, и поддержанием заданного значения давления является использование (по аналогии с моделью двойного перевернутого маятника с не доопределёнными параметрами) скрытой нелинейной связи между вентилем регулировки давления и вентилем заправки азота.

Система управления криогенным стендом СП – магнитов на принципе отклонения и компенсации ошибки управления на основе глобальной отрицательной связи разработана в ЛФВЭ с использованием *TANGO Controls*. В её состав входят: система термометрии и система управления сателлитными рефрижераторами, запись и хранение состояний аппаратных средств, программные

модули для сбора и управления данными, система конфигурации, система контроля доступа, веб-служба и клиентские приложения, и т.д.

Применение принципа глобальной отрицательной обратной связи позволяет обеспечить систему устойчивостью и управляемостью. Однако, этого не всегда достаточно для робастного интеллектуального управления [10,11]. В этом случае чувствительность ОУ к изменениям внутренних и внешних условий функционирования высока, и система управления только на основе ПИД-регулятора не обеспечивает гарантированное достижение цели управления [10].

Важно отметить, что в процессе управления важно также иметь возможность оперативно реагировать на возникновение аварийных ситуаций, в частности:

- рост давления выше 1.30 бар,
- уровень азота в сборнике - выше 100% или ниже 40%,
- температуры азотной части тоководов выше 100К.

3. Особенности интеллектуального управления в криогенной системе охлаждения СП – магнита

Приведем краткое описание решаемой задачи технологии и режимов охлаждения СП – магнита, а также используемых методов управления.

3.1. Описание алгоритмической работы установки и её режимов

Дадим краткое описание физической интерпретации работы установки и отметим уже ранее перечисленные физико – технологические особенности её режимов, учитываемые в проектируемых БЗ НР на основе технологии мягких вычислений инструментария *SCOptKBTM*. Как отмечалось ранее, процесс заправки азота в систему охлаждения можно описать в виде последовательности технологических операций из трёх этапов. *Первый* этап — это продувка и охлаждение канала подачи азота, *второй* – поступление азота или его фактическая заправка и *третий*, завершающий, закрытие вентиля подачи азота – завершение заправки. Рассмотрим некоторые технологические особенности процесса заправки азота в криогенную систему охлаждения СП – магнита [18,20], которые учитываются при построении квантовой интеллектуальной системы управления [20-32].

3.2. Критерии качества и методы управления

Процесс заправки азота в систему охлаждения 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) схематично представлено на Рис. 4.

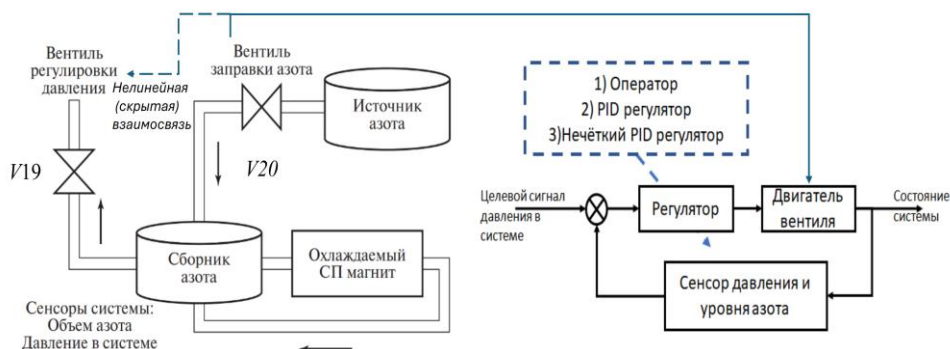


Рис. 4. Схематическое представление установки и технологические этапы

Отметим технологические особенности процесса азотного охлаждения СП – магнита, учитываемые при разработке, соответствующей ИСУ.

1. Существует технологическая необходимость, на первом этапе, полностью открыть вентиль регулировки давления (V19) для сброса давления в системе и ухода от аварийной остановки

испытаний. Стабилизация давления в этой части технологического процесса реализуется за счет работы вентиля подачи азота (V20). Процесс продувки сопровождается резкими скачками давления. В это время происходит охлаждение канала подачи азота и его вскипание на стенках трубы, что и приводит к росту непредсказуемых ситуаций. В момент, когда V20 открыт полностью, а давление выше целевого значения, требуемый уровень давления начинает поддерживать вентиль сброса давления (V19).

2. В начале второго этапа, происходит резкое падение давления, т.к. в систему начинает поступать не газ, а жидкий азот, при этом вентиль подачи азота открыт полностью, чтобы увеличить скорость подачи азота и заправки. Регулировку давления реализует вентиль сброса давления (V19). При достижении требуемого уровня азота в накопительной ёмкости, на заключительном этапе, вентиль подачи азота (V20) начинает плавное закрытие, вызывая просадку давления, которую необходимо компенсировать работой V19. На этом этапе реализуется совместная работа вентиля.

В начале второго этапа, происходит резкое падение давления, т.к. в систему начинает поступать не газ, а жидкий азот, при этом вентиль подачи азота открыт полностью, чтобы увеличить скорость подачи азота и заправки. Регулировку давления реализует вентиль сброса давления (V19).

3. При достижении требуемого уровня азота в накопительной ёмкости, на заключительном этапе, вентиль подачи азота (V20) начинает плавное закрытие, вызывая просадку давления, которую необходимо компенсировать работой V19. На этом этапе реализуется совместная работа вентиля.

Во многом заправка зависит от давления внутри танка (резервуара с азотом, источника азота), также процесс зависит от загруженности смежных сателлитов, т.к. заправка происходит по общему каналу подачи азота (длина которого составляет более 15 метров). Скорость и качество заправки зависит и от типа тестируемого магнита, и от режима испытаний.

В Табл. 1 представлены критерии оценки качества системы управления.

Табл. 1. Технологические этапы заправки, типы структур управления и критериев оценки качества управления

Технологические этапы заправки, типы структур управления и критериев оценки качества управления					
Этап охлаждения и его описание	Источник обучающего сигнала	Типы контроллеров	Критерий оценки	Факторы	Общие критерии
Начало заправки. Система продувается, канал подачи азота охлаждается. V20 — регулирует давление. V19 — открытый	Генетический алгоритм и Сигнал управления оператора	Классический пропорционально-интегрально-производный регулятор.	Последовательная работа клапанов. V20 и V19 — контроль давления азота	Давление источника азота. Температура трубопровода подачи азота	Температура охлаждаемых элементов. Расход азота. Скорость заправки.
Азотное заполнение. Охлаждение трубки подачи азота завершено, азот поступает в систему. V20 — открыт. V19 — регулирует давление	Генетический алгоритм	Нечеткий контроллер	V19, контролирует давление в системе	Давление источника азота. Тип охлаждающего элемента. Количество проверенных элементов	Давление в системе
Завершение заправки. Закрытие вентиля подачи азота V20	Генетический алгоритм		Совместная работа вентиля V20 — (скорость закрытия и давление азота) V19 — давление в системе	давление в источнике азота. Тестовый режим и работа магнита	
Охлаждение. V19 — регулирует давление. V20 — закрытый	Генетический алгоритм		V19 контролирует давление в системе	Режим тестирования и работа магнита	

Отметим, что на всех этапах 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 сателлитов заправка выполняется последовательно. Промедление в заправке может привести к остановке тестирования магнита.

Таким образом, необходимо реализовать систему управления, поддерживающую требуемое давление в системе с координационным управлением клапанов заправки и сброса давления.

Во многом заправка зависит от давления внутри танка (резервуара с азотом, источника азота), также процесс зависит от загруженности смежных сателлитов, т.к. заправка происходит по общему каналу подачи азота (протяженность которого, как отмечалось, составляет более 15 метров). Скорость и качество заправки зависит от типа тестируемого магнита и режима испытаний.

В конкретном структурном виде (см., Рис. 2) описанный процесс заправки азотом представлен на Рис. 5.



Рис. 5. Технологический процесс заправки азотом

Отметим, что на всех этапах важно поддерживать требуемое давление, что в свою очередь влияет на температурные эффекты охлаждаемых элементов – токовводов и экранов магнита. Так же важным критерием является скорость заправки, так как при загрузке смежных сателлитов заправка выполняется последовательно. Промедление в заправке может привести к остановке тестирования магнита.

Примечание: Физические особенности интеллектуального управления логикой смены технологического процесса с переменной структурой заправки азота. Технологический процесс заправки азота, как следует из изложенного, можно разделить, таким образом, на три стадии с разными по семантике логики 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). На второй стадии, при полностью открытом вентиле подачи азота (V20), в систему поступает жидкий азот, а задачу стабилизации выполняет вентиль регулировки давления (V19). При достижении установленного уровня азота в сборнике, система переходит в завершающую - третью стадию, где выполняется совместная работа двух клапанов (V19 и V20), то есть постепенное закрытие вентилей подачи азота и при этом регулировка уровня давления вентилем давления. В этом случае существует аналогия с управлением поведением системы «каровка перемещения – двойной перевернутый маятник» с моделью существования существенно нелинейной связи между обобщенными координатами вентилей расхода V20 и вентилей давления азота V19 как взаимодействующих объектов управления. 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 структуры «master – slave»). В исследуемом варианте такая нелинейная связь (в отличие от модели перевернутого маятника на каретке) является скрытым параметром и ее учет в управлении возможен на основе квантовых корреляций в квантовом интеллектуальном регуляторе, осуществляющего координационное управление двумя указанными клапанами. Такой подход к квантовому интеллектуальному управлению в полном объеме изложен в следующей работе.

Примечание. Отметим еще раз, что на всех этапах важно поддерживать требуемое давление, что в свою очередь влияет на температурные эффекты охлаждаемых элементов – токовводов и экранов магнита. Так же важным критерием является скорость заправки, так как при загрузке смежных

сателлитов заправка выполняется последовательно. Промедление в заправке может привести к остановке тестирования магнита.

Таким образом, необходимо разработать и реализовать систему управления, поддерживающую требуемое давление в системе с координационным управлением вентилей заправки и сброса давления.

Описание технологии проектирования БЗ с применением мягких вычислений представлено ниже в п. 4.3. В данном разделе предварительно обсуждаются особенности второго этапа ИТ проектирования робастных ИСУ на основе встраиваемых в контур управления квантовых интеллектуальных регуляторов.

Рассмотрим кратко особенности программно-аппаратной поддержки выбираемой системы управления.

4. Особенности программно – алгоритмической поддержки ИСУ в криогенной системе охлаждения СП – магнита

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

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

В качестве ядра технологии разработки квантового и нечётких регуляторов рассматривается программный оптимизатор баз знаний (ОБЗ) [14-16].

На Рис. 6 представлена схема интеллектуального управления физической установкой с использованием оптимизатора баз знаний (ОБЗ).

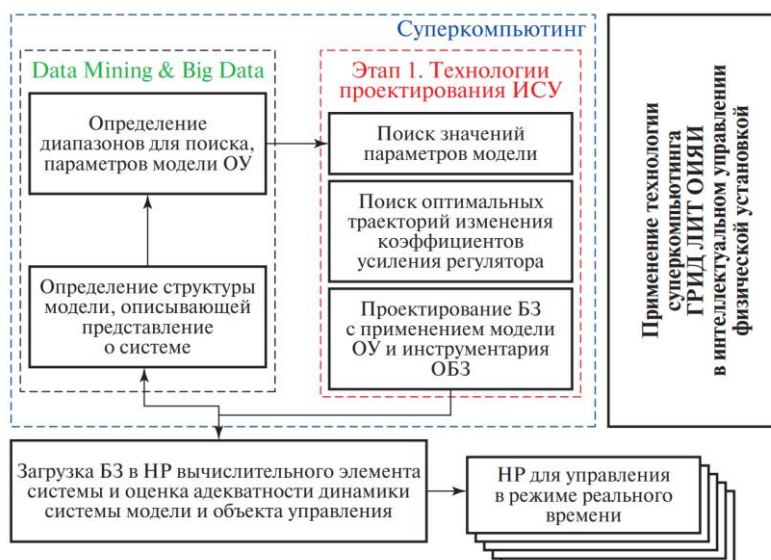


Рис. 6. Проектирование БЗ с применением модели ОУ и инструментария ОБЗ

Показана тесная зависимость верификации и идентификации объекта управления (ОУ) с применением технологий и методов обработки и анализа данных, в том числе методов кластеризации на основе выявления информативных признаков на этапах проектирования БЗ.

При этом возможен гибридный подход для формирования как индивидуальной БЗ, так и иерархически связанных БЗ многоагентной системы.

В частности, обрабатываемые результаты журналов функционирования используются для выявления ошибок управления и коррекции управляющих воздействий. При этом основные функции интеллектуального управления – верификация моделей, идентификация ОУ, формирование обучающих сигналов, обучение квантовых нейронных сетей с применением квантовых генетических алгоритмов [17,29,30] требует затрат больших вычислительных ресурсов.

Для этого ОБЗ представляет собой комплекс из трех распределенных частей – расчетная, работающая удаленно на мощных вычислительных станциях; вторая часть, встраиваемая в объект управления (ОУ) и реализующая алгоритмы взаимодействия с установкой; и интерфейсная часть, предоставляющая доступ к программной и устанавливаемой оператором части. В частности, обучающая выборка, полученная от *TANGO Controls* [33,34], обрабатывается квантовым генетическим алгоритмами в расчетной части ОБЗ. Обмен данными и запуск обработки реализована по распространенному протоколу SSH, который обеспечивает безопасное соединение и возможность передачи данных и программ между агентами.

Встраиваемая компонента *TANGO Controls* собирает показания параметров установки и пересылает данные, относящиеся к заданному временному интервалу времени для последующей обработки. Приняв входные значения, расчетная часть ОБЗ оценивает эффективность предыдущего решения – загруженной БЗ в нечеткий регулятор (НР) – и осуществляет формирование новой или корректировку используемой БЗ для проверки следующего решения.

Оптимизация БЗ с использованием дистанционного соединения с ОУ (см., Введение) непосредственно с ОБЗ даёт ряд преимуществ:

- позволяет не разрабатывать математическую модель и при этом получать знания о качественном поведении ОУ для построения БЗ;
- дистанционное соединение позволяет оптимизировать БЗ в определённых (типовых) условиях функционирования, и тем самым создавать множество БЗ с высоким качеством управления для различных ситуаций управления.

Отметим, что универсальность технологии дистанционной настройки и передачи БЗ позволяет объекту управления (ОУ) принимать БЗ от блока ОБЗ, или от других ОУ. Это даёт возможность управления структурно новыми объектами, такими как коллективы автономных роботов, многоагентные системы, сложные автоматизированные производства и распределенные системы и др.

Кроме того, данная технология позволяет ОУ обновлять и адаптировать БЗ под конкретную ситуацию управления, в т.ч. нештатную ситуацию, в режиме реального времени функционирования.

Построение НР представляет собой настройку функций принадлежности, применяемых в процессе фазификации и дефазификации, а также формирование правил БЗ. Процесс построения НР может быть выполнен с помощью программного обеспечения Оптимизатор Баз Знаний SCOptKB™ [35,36], однако для этого необходимо сформировать обучающий сигнал.

Таким образом, для построения НР необходимо создать качественный обучающий сигнал. Одновременно это является первым этапом технологии построения квантового нечеткого регулятора [19,22] для ОУ со слабо формализованными (не учитываемыми в математической модели) параметрами.

4.1 Формирование обучающего сигнала с применением генетического алгоритма в режиме реального времени

Формирования обучающего сигнала для НР, без использования математической модели возможно, с применением генетического алгоритма в режиме реального времени. На примере системы стабилизации давления рассмотрим задачу извлечения обучающего сигнала с реального объекта управления, функционирующего в режиме реального времени.

В контексте такой задачи, весь процесс стабилизации давления представляется в виде интервала времени, необходимого для стабилизации давления из условно начального состояния в требуемое - рабочее. Интервал времени, разбивается на некоторое число малых временных отрезков, где каждому присваиваются определённые значения коэффициентов ПИД-регулятора. Таким образом, набор коэффициентов для каждого отрезка времени и их последовательность, представляет собой

траекторию изменения коэффициентов усиления и отдельное проверяемое решение («индивидум» генетического алгоритма). Записываемые данные изменения ошибок управления и соответствующих интервальных коэффициентов ПИД-регулятора во время работы криогенной установки в режиме стабилизации давления составляют обучающий сигнал [20,37,38].

Пример изменения давления и коэффициентов усиления представлен на Рис. 7.

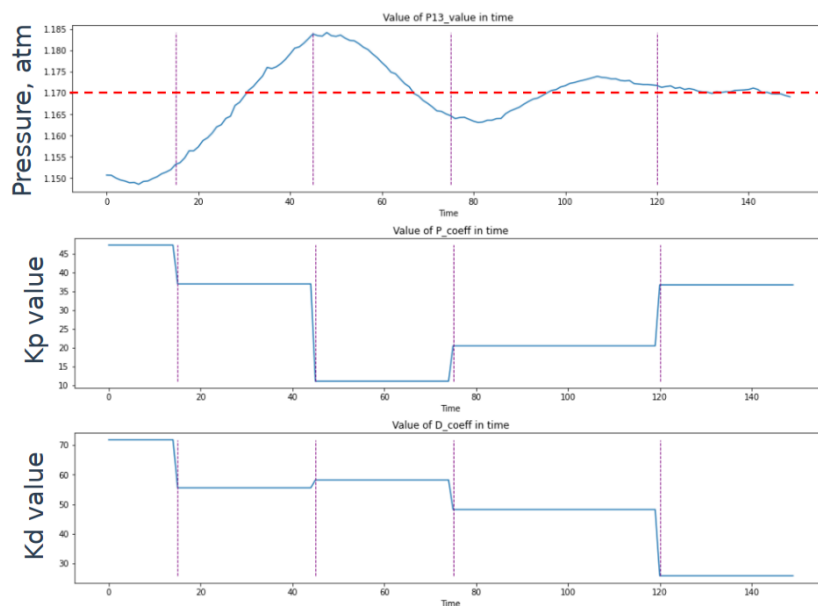


Рис. 7. Пример траектории изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора (приведены примеры двух коэффициентов K_p и K_d).

В качестве обучающего сигнала рассматривается структура данных в виде входных сигналов (ошибок управления) e_p , e_i , e_d и соответствующие им выходных - оптимальных коэффициентов усиления K_p , K_i , K_d проектируемого ПИД-регулятора.

Задача формирования обучающего сигнала сводится к задаче поиска оптимальной траектории изменения коэффициентов усиления ПИД-регулятора. Для поиска оптимальной траектории изменения коэффициентов ПИД-регулятора был выбран генетический алгоритм (ГА) не случайно. Применение ГА получило широкое распространение в решения конкретных инженерных задач, из-за его проблемной независимости, отсутствия необходимости подсчета градиенты целевой функции для каждого решения, и возможности применения без использования сложных аналитических расчетов. Кроме того, ГА был апробирован для получения обучающего сигнала, позволяющего проектировать БЗ НР для объектов без математической модели на примере задачи «каретка - перевернутый маятник».

В алгоритме применено двухточечное скрещивание с вероятностью 0.3. Вероятность мутации была установлена равной 0.1. Также был применён элитный отбор - 10% лучших траекторий изменения коэффициентов переходили в следующее поколение без изменений. Было проверено 10 поколений по 50 решений (особей) в каждом. Для каждого коэффициента были определены интервалы допустимых значений, при выборе которых были использованы значения эмпирически подобранных коэффициентов ПИД регулятора. ГА функционирует в режиме реального времени на испытательном стенде фабрики магнитов. Обеспечение одинаковых начальных условия обучения, для каждой проверяемой траектории, реализуется за счет сброса давления до одной и той же заранее заданной величины. Каждая траектория состояла из пяти временных интервалов со своими коэффициентами ПИД-регулятора. Для каждого проверяемого решения процесс стабилизации длился 10 минут. Оценка качества проверяемой траектории рассчитывалось как интеграл модуля ошибки отклонения от целевого значения давления. Сходимость результатов работы ГА определена по нисходящей линии тренда на графике значений функции пригодности с каждой новой проверяемой траекторией (Рис. 8).

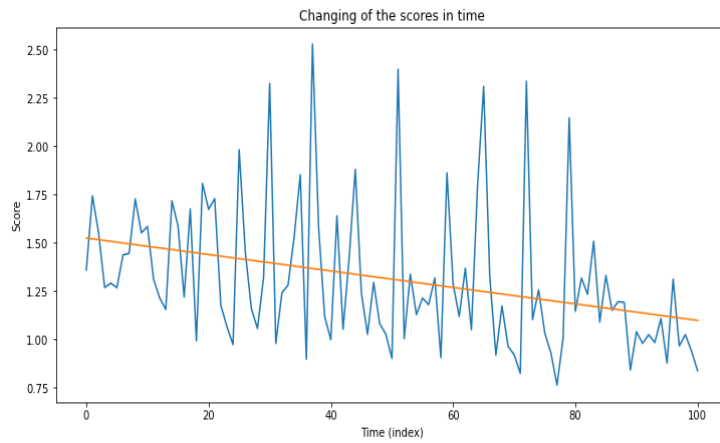


Рис. 8. Изменение значения функции пригодности с каждым новым проверяемым решением

В результате были выбраны лучшие наборы коэффициентов ПИД-регулятора для каждого временного интервала и составлена таблица обучающего сигнала, состоящая из значений ошибок отклонения давления от целевого значения и соответствующих им коэффициентов ПИД-регулятора (Рис. 9).

	A	B	C	D	E	F
1	err	err_i	err_d	P_coeff	I_coeff	D_coeff
2	0.020254	0.020254	0.020254	49.3988	37.68156	148.257
3	0.0204835	0.0407375	0.000229478	49.3988	37.68156	148.257
4	0.0211214	0.0618589	0.000637889	49.3988	37.68156	148.257
5	0.0222429	0.0841018	0.00112152	49.3988	37.68156	148.257
6	0.0229059	0.107008	0.000663042	49.3988	37.68156	148.257
7	0.0230844	0.130092	0.000178456	49.3988	37.68156	148.257
8	0.0229796	0.153072	-0.000104785	49.3988	37.68156	148.257
9	0.0229883	0.17606	0.00000870228	49.3988	37.68156	148.257
10	0.0228355	0.198896	-0.000152826	49.3988	37.68156	148.257
11	0.0223869	0.221282	-0.000448585	49.3988	37.68156	148.257
12	0.0218146	0.243097	-0.000572324	49.3988	37.68156	148.257
13	0.0212793	0.264376	-0.00053525	49.3988	37.68156	148.257
14	0.0194484	0.283825	-0.00183094	49.3988	37.68156	148.257
15	0.0185505	0.302375	-0.000897884	49.3988	37.68156	148.257
16	0.0173177	0.319693	-0.00123286	49.3988	37.68156	148.257
17	0.0219506	0.0219506	0.0219506	40.9325	35.73909	122
18	0.023212	0.0451626	0.00126135	40.9325	35.73909	122
19	0.0239828	0.0691453	0.000770807	40.9325	35.73909	122
20	0.0249614	0.0941067	0.000978589	40.9325	35.73909	122
21	0.025906	0.120013	0.000944614	40.9325	35.73909	122
22	0.026039	0.146052	0.000133038	40.9325	35.73909	122
23	0.0265942	0.172646	0.000555158	40.9325	35.73909	122
24	0.0262448	0.198891	-0.000349402	40.9325	35.73909	122
25	0.0264202	0.225311	0.000175476	40.9325	35.73909	122
26	0.0257682	0.251079	-0.000652075	40.9325	35.73909	122
27	0.0252986	0.276368	-0.000476579	40.9325	35.73909	122
28	0.0235265	0.299894	-0.00176203	40.9325	35.73909	122
29	0.0224968	0.322391	-0.00102973	40.9325	35.73909	122
30	0.0220129	0.344404	-0.000483871	40.9325	35.73909	122
31	0.0196379	0.364042	-0.00237501	40.9325	35.73909	122
32	0.0189618	0.383004	-0.000676155	44.6813	32.31615	134.796
33	0.0174587	0.400462	-0.00150311	44.6813	32.31615	134.796
34	0.0153422	0.415805	-0.00211644	44.6813	32.31615	134.796
35	0.0143106	0.430115	-0.00103164	44.6813	32.31615	134.796
36	0.0120376	0.442153	-0.00227296	44.6813	32.31615	134.796

Рис. 9. Пример таблицы обучающего сигнала

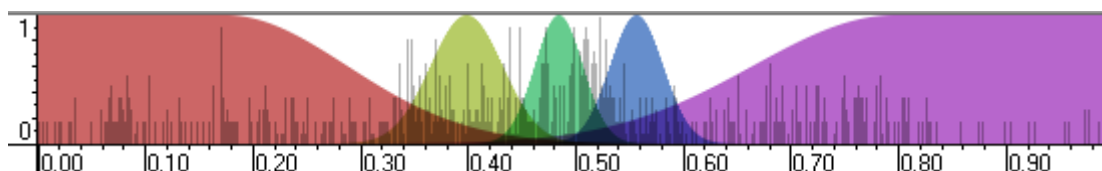
При проверке каждой траектории были введены блокировки, предотвращающие выход системы из зоны допустимых значений. При превышении давления вентиль сброса давления полностью открывался, а решение, которое привело к сильному скачку давления помечалось как неэффективное путём возвращения заведомо большого значения функцией пригодности.

Рассмотрим далее процесс проектирования БЗ для управления давлением в системе.

4.2 Особенности проектирование БЗ НР

Построение терм множеств лингвистических переменных является важным этапом формирования БЗ нечётких систем, и, в особенности, нечётких регуляторов (НР).

Структура терм множества лингвистической переменной характеризуется числом и типом функции принадлежности, характеризующих элементы терм – множества данной переменной Рис.10.



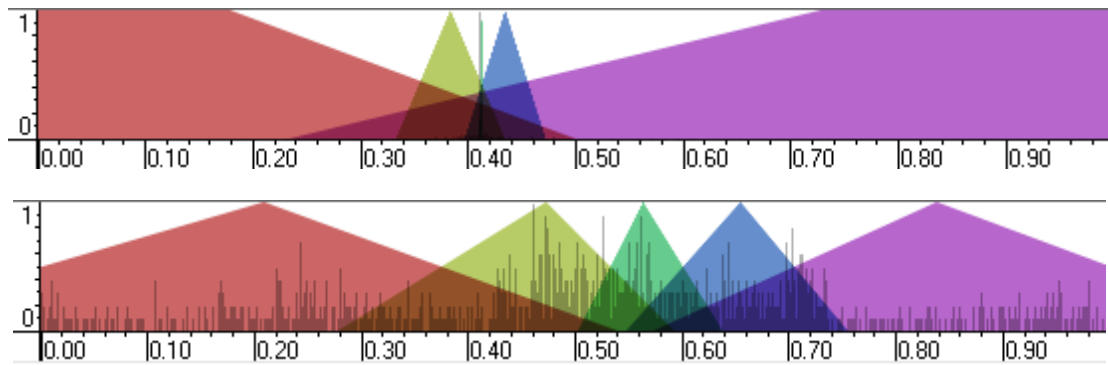


Рис. 10. Нечеткие множества лингвистических переменных входных сигналов

В практике создание БЗ нечётких систем, построение терм – множеств осуществляется экспертом на основании опыта, либо БЗ интерактивно подбирается, до достижения ее оптимальной структуры. Выбор структуры лингвистических переменных косвенно влияет на объем и адекватность получаемой базы продукционных правил. Для формирования БЗ в ИСУ применялся разработанный программный инструментариий Оптимизатор Баз знаний.

Рассмотрим основные этапы проектирования БЗ рассмотрены в [10,11,36,39].

Этап 1. Определение типовой ситуации обучения (определение внешних шумов, начальных условий, ограничений и времени задержки).

Этап 2. Построение обучающего сигнала (рассмотренного в предыдущем разделе) происходит на основе извлечения оптимальной траектории изменения коэффициентов усиления с применением ГА в типовой ситуации с выбранным критерием оптимизации и областью поиска.

Этап 3. Выбор модели нечеткого вывода, где пользователь конкретизирует тип нечеткой модели вывода, операцию нечеткого «И» (произведение или минимум), число входных и выходных переменных интеллектуальной системы управления. В нашем примере это модель Сугено.

Пусть n_1, n_2, n_3 есть количество функций принадлежности, описывающих ошибку управления e , ее скорость и интеграл, тогда общее число нечетких правил будет $n_1 \times n_2 \times n_3$. Само нечеткое (продукционное) правило в Базе Знаний выглядит следующим образом:

$$IF \ e \text{ is } A_1 \ \text{and} \ \dot{e} \text{ is } B_1 \ \text{and} \ \int e \text{ is } C_1 \ \text{THEN} \ K_p = D_{111}, K_d = E_{111}, K_i = F_{111},$$

где A_1, B_1, C_1 - функции принадлежности, описывающие ошибку управления e , ее скорость и интеграл (Рис. 6.17). Конечный результат нечеткого вывода в заданной БЗ вычисляется по следующим формулам:

$$K_p = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} D_{ijk} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)}, \quad K_d = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} E_{ijk} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)}, \quad K_i = \frac{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} F_{ijk} \right)}{\left(\sum_{i=1}^{n_1} \sum_{j=1}^{n_2} \sum_{k=1}^{n_3} \omega_{ijk} \right)},$$

где $\omega_{ijk} = A_i(e) \cdot B_j(\dot{e}) \cdot C_k(\int e)$, и « \cdot » - символ операции нечеткого умножения.

Этап 4. Создание лингвистических переменных для входных значений (ошибка управления, скорость ошибки управления, интегральная ошибка управления) ИР. С помощью генетического алгоритма (ГА₁) на основе ОС определяется оптимальное число функций принадлежности для каждой входной лингвистической переменной, а также выбирается оптимальная форма представления их функций принадлежности (треугольная, Гауссовская и т.д.). В качестве критерия оптимальности той или иной конфигурации лингвистических переменных используется максимум совместной информационной энтропии и минимум информации о сигналах в отдельности. На Рис.11 показан пример построения лингвистических переменных с помощью ОБЗ.

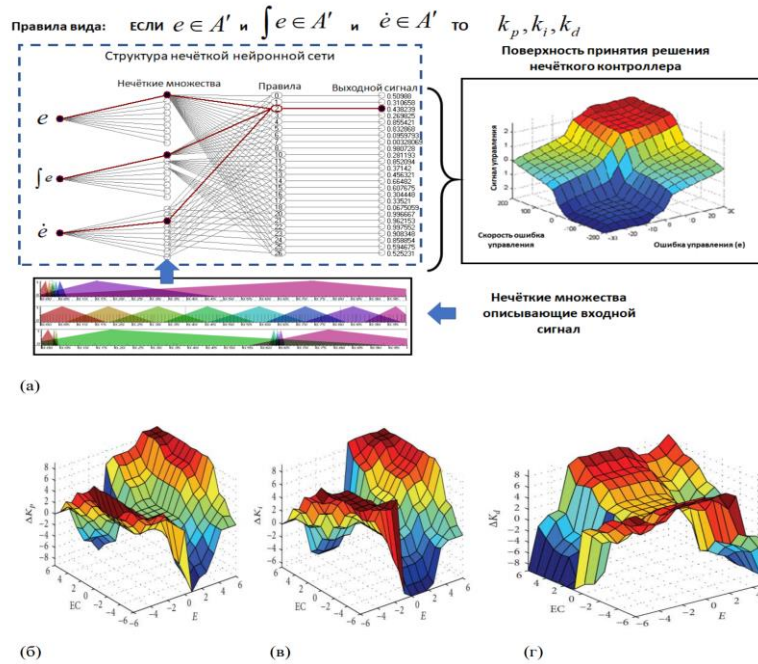


Рис. 11. Пример построения лингвистических переменных с помощью ОБЗ [Структура базы знаний в виде структуры нечёткой нейронной сети, вид функций принадлежности и поверхности управляющего нечеткого вывода НР (а); Функции принадлежности для K_p (б); Функции принадлежности для K_i (в); Функции принадлежности для K_d (г)].

Как видно из рисунка, для описания входных значений ошибки управления ОБЗ с помощью ГА выбрал восемь функций принадлежности.

Этап 5. Создание, оптимизация и настройка базы правил. На этапе создания БЗ используется специальный алгоритм отбора наиболее «робастных правил» в соответствии с разработанными критериями:

1) «суммарный» критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют следующему условию: $R_{total_fs}^l \geq TL$, где TL (threshold level) - заданный (вручную или выбранный автоматически) уровень активации правила. $R_{total_fs}^l$ вычисляется по следующей формуле:

$$R_{total_fs}^l = \sum_{k=1}^N R_{fs}^l(t_k), \text{ и } R_{fs}^l(t_k) = \prod [\mu_{j_1}^l(x_1(t_k)), \mu_{j_2}^l(x_1(t_k)), \dots, \mu_{j_n}^l(x_n(t_k))],$$

где t_k моменты времени, $k = 1, \dots, N$, N равно числу точек в управляющем сигнале; $\mu_{jk}^l(x_k), k = 1, \dots, n$ - функции принадлежности входных переменных, l - индекс правила в БЗ; символ « Π » обозначает операцию нечеткой конъюнкции (в частности, может интерпретироваться как произведение).

2) «максимальный» критерий: выбрать только те правила, которые удовлетворяют условию: $\max_t R_{fs}^l(t) \geq TL$.

Далее с помощью серии ГА происходит оптимизация БЗ и ее настройка. Пример построенной с помощью ОБЗ оптимальной БЗ для НР, решающего задачу управления нашего ОУ, показан на Рис. 12.

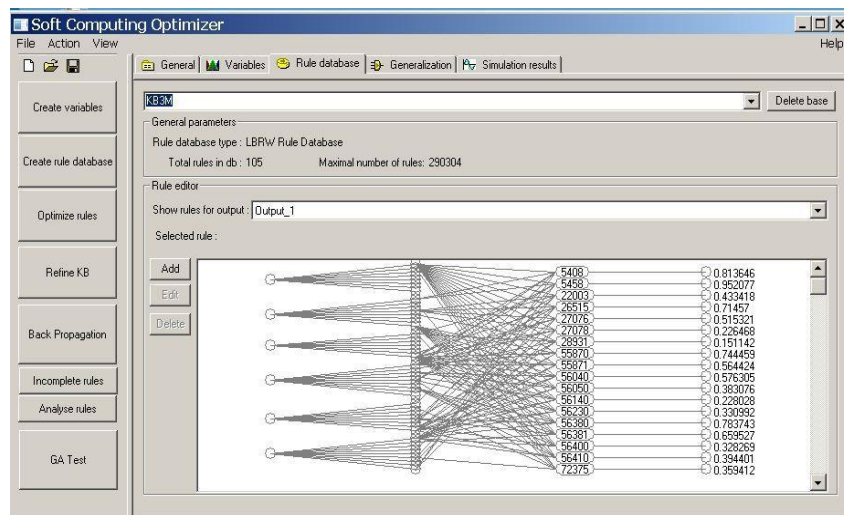


Рис. 12. Пример построенной с помощью ОБЗ оптимальной БЗ

Как видно из Рис. 12, полная структура БЗ для данного НР состоит из 125 продукционных правил, однако ОБЗ выбрал оптимальную структуру БЗ, состоящую из 105 правил. В процессе проектирования ИСУ были получены две БЗ:

- на основе обучающего сигнала полученного с применением ГА;
- на основе сигнала, полученного из данных о работе оператора.

В Табл. 2 приведены характеристики полученных с помощью ОБЗ баз знаний

Табл. 2. Характеристики баз знаний, полученных с помощью ОБЗ

Характеристика	БЗ1	БЗ2
Модель нечеткого вывода	Сугено	Сугено
Вид функций принадлежности	Треугольный	Треугольный
Количество функций принадлежности входных переменных:	[3 3 3].	[55 5].
Количество правил	8 из 27	105 из 125

На Рис.13 приведен результат аппроксимации выходных сигналов НР (синяя линия) и обучающего сигнала (зеленая линия) с заданной точностью.

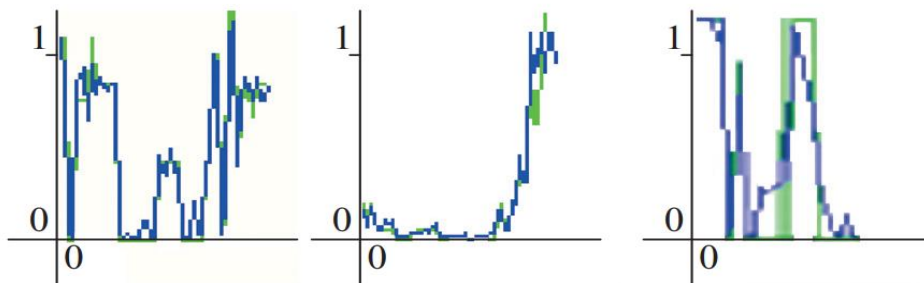


Рис. 13. Результаты аппроксимации выходных сигналов нечеткого контроллера (синяя линия) и обучающего сигнала (зеленая линия)

В следующем разделе приведены результаты моделирования применения рассмотренных систем управления.

4.3 Сравнение различных методов управления в режиме азотного охлаждения СП магнита

Рассмотрим результаты проведённых исследований технологией мягких вычислений в режиме азотного охлаждения.

На Рис. 14 представлена временная зависимость для уровня давления (в барах) при азотном охлаждении за период около 40 мин.

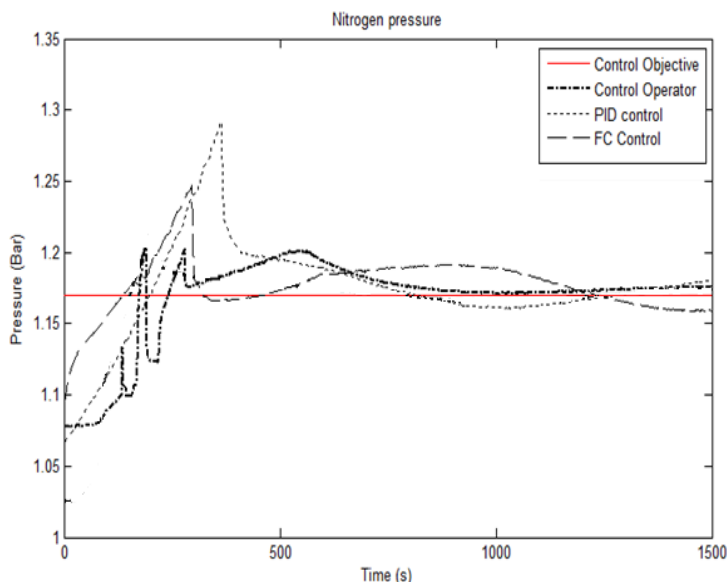


Рис. 14. Давление в азотном сборнике при азотном охлаждении

Обозначения, следующие: Control Objective – целевое значение давления (1.17 бар), Control Operator – значение давления при управлении оператором, PID Control – автоматизированное управление штатными средствами регулятора, FC Control – автоматизированное управление с помощью нечеткого регулятора.

Хорошо видно, что с задачей стабилизации давления в сборнике все регуляторы за 40 мин. в целом справляются. Однако, анализ результатов показывает, что классический ПИД-регулятор обладает низким быстродействием и высоким уровнем перерегулирования (1.29 бар), что является критическим и может рассматриваться как близкое к аварийной ситуации (1.30 бар).

При этом НР демонстрируют высокое быстродействие (время релаксации 210 сек соответственно) при низком уровне перерегулирования (1.24). Оператор достаточно хорошо справился с задачей установки требуемого давления (перерегулирование 1.21 бар и быстродействие 280 сек), однако не смог установить требуемое значение давления (установившейся режим 1.18 бар) (Табл. 3).

Табл. 3. Сравнение критериев качества переходного процесса в азотном режиме охлаждения

Действие	Перерегулирование	Быстродействие	Сложность управления
Оператор	0.013	0.5	0.2
PID ПИД)	0.021	0.78	0.5
FC (НР)	0.017	0.65	0.91

Рисунок 15 демонстрирует расход полезного ресурса (азота) установки.

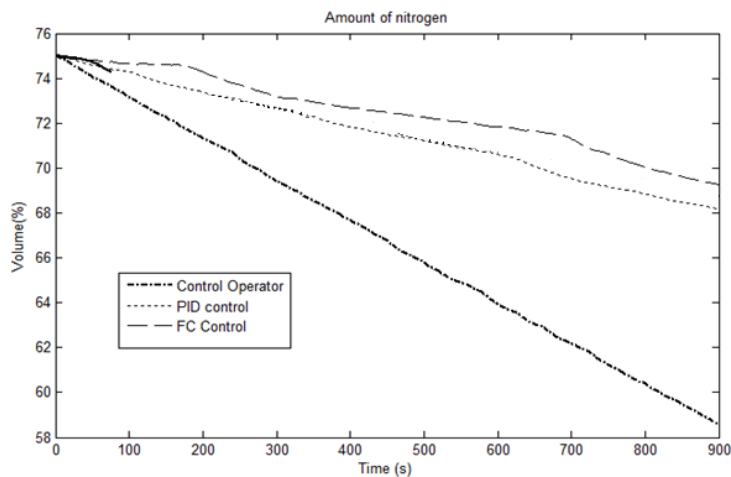


Рис. 15. Расход азота в накопительной ёмкости

Хорошо видно из Рис.15, что автоматическое управление за счет непрерывного контроля демонстрирует более эффективное использование полезного ресурса и позволяет сократить расход на 50%, в частности ПИД-регулятор – на 50%, нечеткий регулятор НР – на 54%.

Одним из основных критериев качества системы управления является сложность управления. Невысокая сложность управления позволяет повысить срок службы исполнительных механизмов системы за счет более «мягкого и простого» управления.

На Рис.16(а) представлено изменение выходных значений пропорционального коэффициента усиления НР и управляющей силы ПИД-регулятора (Рис.16(б)); FC1 и FC2 – нечеткие контроллеры, спроектированные в различных ситуациях обучения.

На Рис. 16 (б) изображены траектории управляющих команд в процентах от уровня закрытия вентиля регулировки давления ($V19$) при различных режимах управления и демонстрируют существенное снижение сложности физической реализуемости сил управления НР.

В качестве оценки качества системы управления рассмотрим сумму абсолютного значения отклонения давления от целевого сигнала.

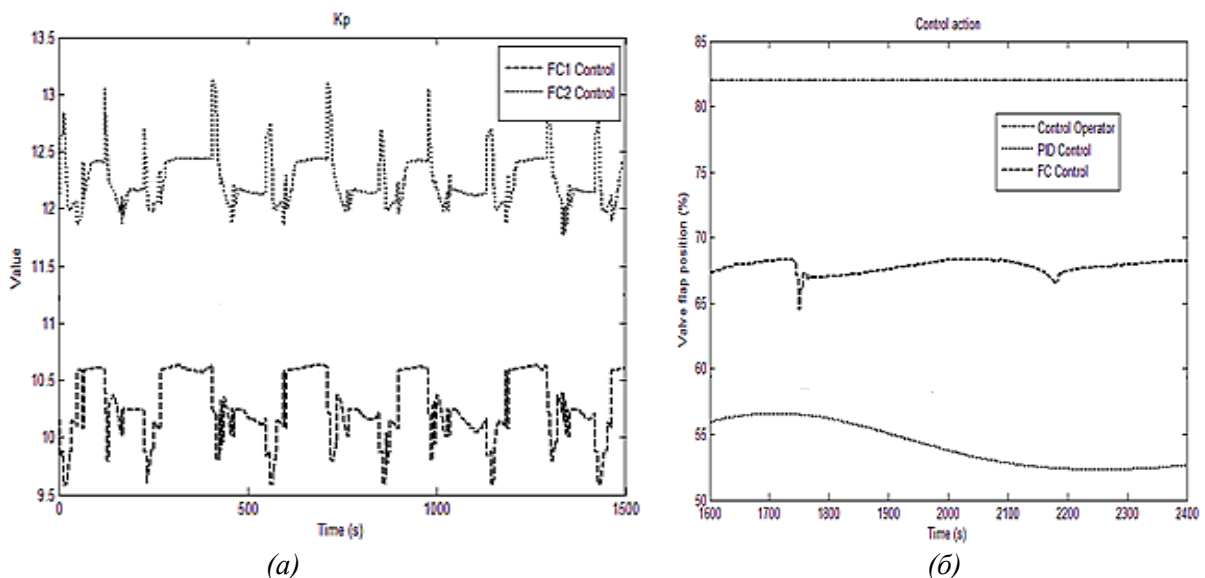


Рис. 16. Управляющее воздействие: (а) выходные значения нечетких регуляторов (FC1, FC2) для пропорциональных коэффициентов усиления K_p ; (б) траектории управляющих сигналов, выполняемых оператором, ПИД-регулятором и нечетким регулятором

Рисунок 17 показывает, что применение нечеткого ПИД-регулятора с интегрированными БЗ, позволяет улучшить достижение заданного уровня давления в накопительной ёмкости (уменьшить отклонение от требуемой величины).

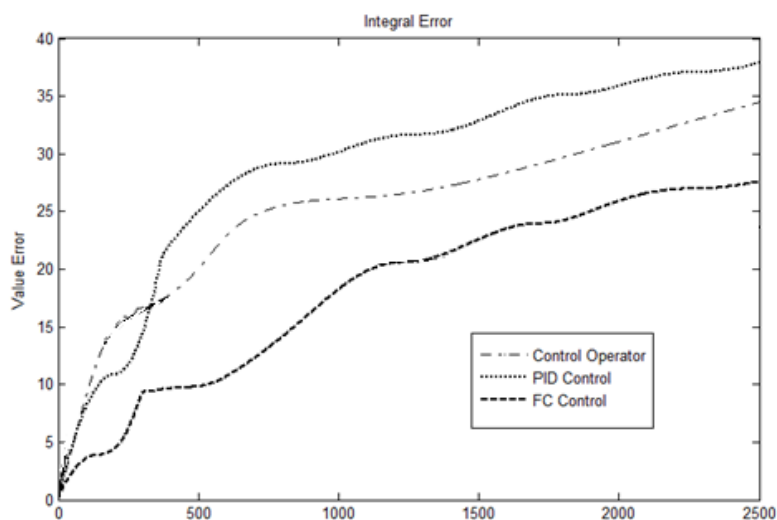


Рис. 17. Оценка качества регуляторов при управлении в режиме азотного охлаждения

Более того, с точки зрения расхода полезного ресурса, НР уменьшает расход азота более чем на 20%, т.е. позволяют сократить количество заправок азотом. Очень важной задачей управления в данном режиме является поддержание требуемого уровня давления при заправке азота.

Дело в том, что охлаждение должно быть непрерывным, а сам процесс заправки подразумевает снижение давления для поступления азота, при этом давление в источнике азота по сообщаемым сосудам влияет на давление в сборнике. Сложность этого режима заключается в необходимости поддержания заданного давления (для непрерывного охлаждения) и одновременной заправки накопительной ёмкости.

В этом случае важную роль играет совместное использование вентиля регулировки давления (V19) и заправки азота (V20). Обычно оператор открывает клапан V19 для сброса давления, заправляет азотом систему, а затем приступает к выравниванию давления. К данному технологическому этапу возможно применение автоматического режима, причём для одновременного синхронного управления как клапаном V19, так и клапаном подачи азота V20. Далее будет рассмотрен такой вариант квантового координационного управления. Для автоматического режима управления V19 в данном разделе были рассмотрены ПИД-регуляторы и НР.

На Рис. 18 представлены результаты, иллюстрирующие процесс регулировки давления при заправке азота.

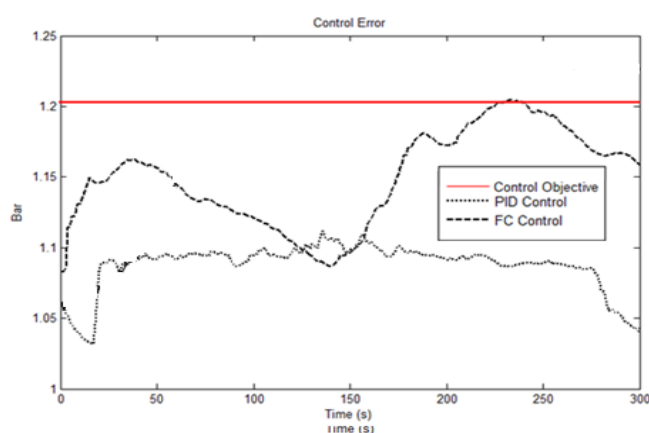


Рис. 18. Давление азота при его заправке в гелиевом режиме охлаждения токовыводов и экранов

На Рис.20 представлен обобщенный график понижения температуры азотного экрана СП магнита при управлении с помощью НР.

Предварительные результаты на Рис.19 показывают, что отопление СП - магнита в процессе заправки устраивает регламенты испытаний. Автоматическое управление на основе НР позволяет поддерживать требуемый уровень давления в процессе заправки, что позволяет уменьшить отопление

магнита и поддерживать температуру в заданных диапазонах. В следующем разделе мы рассмотрим задачу координационного управления двумя вентилями – регулировки давления и заправки азота.

Данное обстоятельство показывает возможность применения интеллектуального управления при охлаждении СП магнитов в условиях оптимизации по критерию противоречивых показателей качества управления.

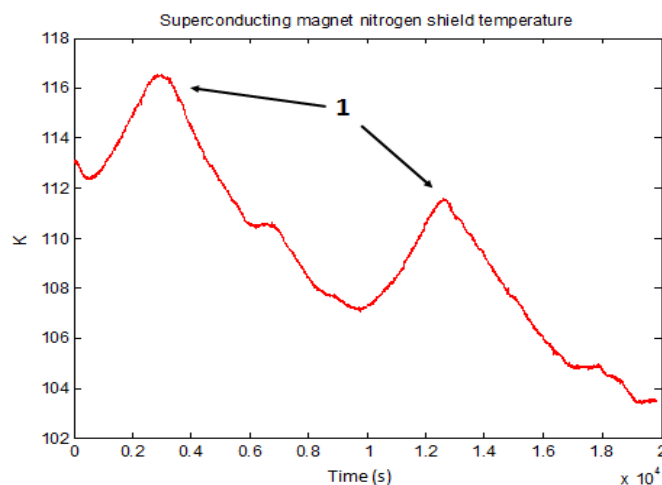


Рис. 19. Температура азотного экрана СП магнита. Стрелками (1) показан повышение температуры во время заправки

На Рис. 20 представлена температура охлаждаемых элементов при различных типах управления.

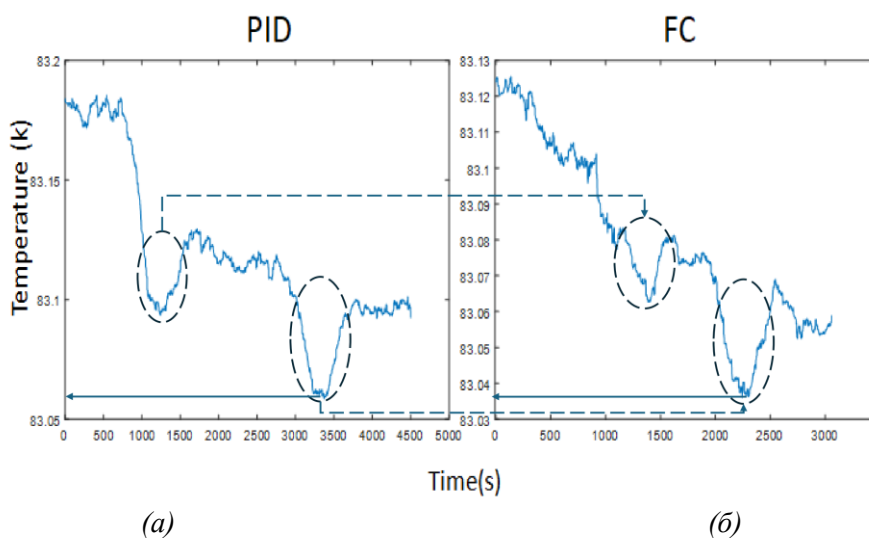


Рис. 21. Температура охлаждаемых элементов на этапе заправки при управлении: а) ПИД - регулятором, б) нечетким регулятором

Из Рис. 19 и 20 видно, что при реализации нечеткого координационного управления «скачки» температуры значительно меньше. Данное обстоятельство показывает эффективность применения технологий интеллектуального управления в подобных системах.

Анализ представленных результатов дополнил и усилил результаты работы [31,32.39].

Роль дистанционного управления БЗ в этом примере заключается в передаче встраиваемых БЗ в ИСУ удаленного ОУ. В свою очередь, разработанный инструментариум реализует механизмы создания, настройки и передачи параметров управления в виде сигналов управления, полученных из БЗ НР, не изменяя нижний исполнительный уровень существующей системы (не нарушая принцип проектирования ИСУ). Подробное изложение такого подхода приведено в [22-25].

Проведенные исследования показывают, что применение мягких вычислений в задаче управления давлением, повышают надёжность функционирования системы, уменьшая количество

расхода азота и эффективно реализованы в разработанной интеллектуальной системе дистанционного управления охлаждением СП - магнита.

В данной работе приведено описание действующего программно – алгоритмического комплекса дистанционного управления и его аппаратной реализации первого этапа с применением технологии мягких вычислений, реализующий разработку второго этапа в виде встраиваемых квантовых самоорганизующихся интеллектуальных регуляторов для повышения уровня устойчивого функционирования процесса азотного охлаждения СП-магнита с учетом возникновения возможных нештатных ситуаций. Второй этап подробно представлен в следующей работе.

Таким образом, реализация представленных механизмов позволила получить высокий уровень качества управления, в том числе, за счет использования мягких вычислений и разработанных технологий проектирования ИСУ. Такой подход позволяет сократить влияние экспертных оценок в процессе обучения и настройки, снижает информационный риск влияния человеческого фактора на принятие решения, в том числе, в условиях возникновения нештатных ситуаций или непредвиденных ситуаций управления.

Параметры ПИД-регуляторов вентилей заправки и сброса давления формируются за счет применения НР. Такой подход позволяет в реальном времени реализовать процесс формирования интеллектуального робастного управления процессом заправки сателлитного сборника азота.

В качестве примечания нужно отметить, что первоначально такой подход к управлению был апробирован на робототехническом полигоне применительно к механической системе «каретка перемещения – перевёрнутый маятник» со скрытыми нелинейными перекрестными связями между обобщенными координатами (степенями свободы). В рамках выполненной работы программно-аппаратные решения, реализующие квантовый координационный регулятор, были внедрены в контур управления криогенной установки.

В рамках выполненной работы программно-аппаратные решения, реализующие квантовый координационный регулятор, были внедрены в контур управления криогенной установки.

4.5 Сравнительный анализ работы различных типов регуляторов

Для демонстрации эффективности НР сравним эффективность работы установки с применением разных типов регуляторов: НР, классический ПИД-регулятор, ручное управление оператора. Сравнение показано ниже для режима заправки, так как этот режим является наиболее сложным с точки зрения управления, поскольку динамика давления неустойчива (аналог перевернутого маятника). Как отмечалось выше, процесс заправки азота в систему охлаждения можно описать в виде последовательности технологических операций из трёх этапов. Первый этап— это продувка и охлаждение канала подачи азота, второй – поступление азота или его фактическая заправка и третий, завершающий, закрытие вентиля подачи азота – завершение заправки.

График изменения давления азота в процессе заправки при управлении ПИД - регулятором приведён на Рис. 21.

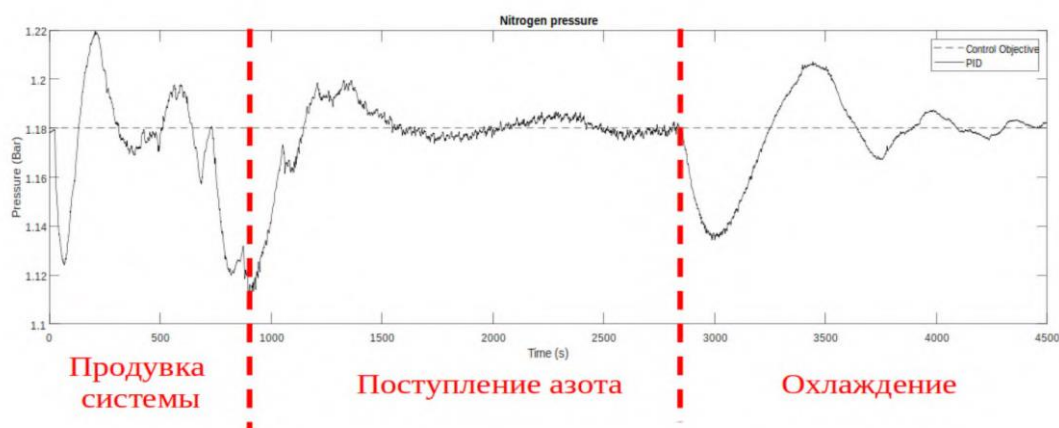


Рис. 21. Изменение давления в установке при работе в режиме заправки под управлением ПИД регулятора

Стабилизация давления в первой части технологического процесса реализуется за счёт работы вентиля подачи азота. Процесс продувки сопровождается резкими скачками давления. В это время происходит охлаждение канала подачи азота и его вскипание на стенках трубы, что и приводит к непредсказуемым перепадам давления. В момент, когда вентиль подачи азота открыт полностью, а давление отличается от целевого значения, требуемый уровень давления начинает поддерживать вентиль линии сброса давления.

В начале второго этапа, происходит резкое падение давления, т.к. в систему начинает поступать не газ, а жидкий азот, при этом вентиль подачи азота открыт полностью, чтобы увеличить скорость подачи азота и заправки. Регулировку давления реализует вентиль сброса давления. В случае, если вентиль сброса давления открыт полностью (что происходит крайне редко), предусмотрено возвращение управления к вентилю подачи азота, до тех пор, пока он не откроется полностью вновь.

На заключительном этапе, при достижении требуемого уровня азота в накопительной ёмкости вентиль подачи азота начинает плавное закрытие, вызывая падение давления, которое необходимо компенсировать работой вентилем сброса давления. На этом этапе реализуется совместная работа вентилях.

Во многом заправка, как отмечалось, зависит от давления внутри хранилища азота, но также на процесс заправки влияет режим заправки смежных резервуаров, т.к. заправка происходит по общему каналу подачи азота, длина которого составляет более 15 метров. Скорость и качество заправки зависят также от типа тестируемого магнита и режима испытаний.

Для сравнения качества управления рассмотрим три типа управления: ручное управление оператора, классический ПИД-регулятор и НР.

НР был сформирован на основе полученного обучающего сигнала с помощью программного обеспечения SCOptKB™ [35-38]. Коэффициенты усиления классического ПИД-регулятора были подобраны на основе обобщения опыта операторов криогенной установки и многократно протестированы в условиях реального эксперимента. Ниже приведены графики изменения давления при работе трёх типов регуляторов.

На Рис. 22 представлен график изменения давления при ручном режиме управления оператором.

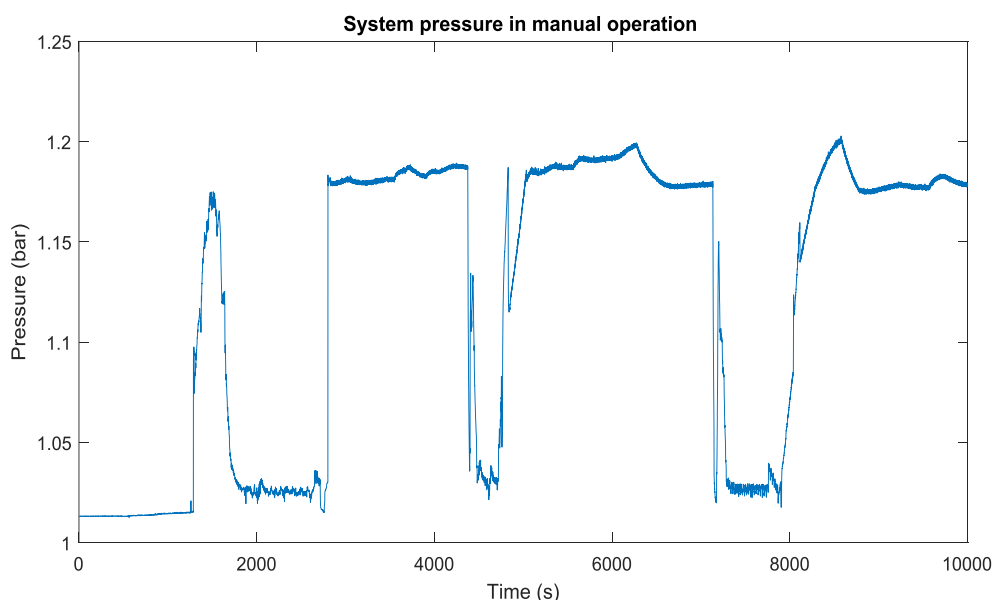


Рис. 22. Давление азота при управлении оператором

Рисунок 23 иллюстрирует давление в системе при работе классического ПИД - регулятора с постоянными параметрами.

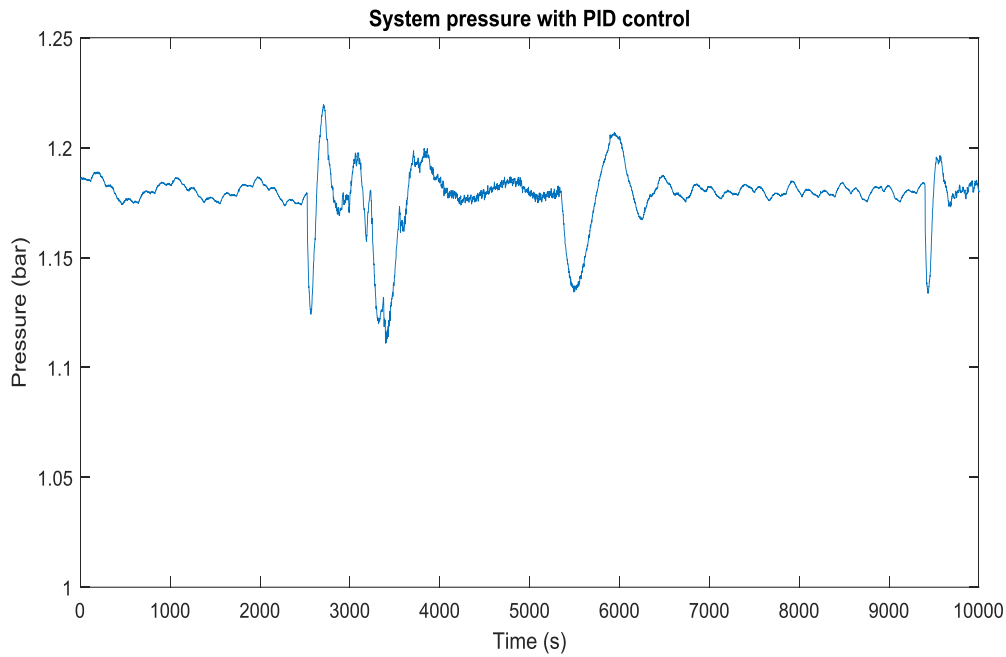


Рис. 23. Давление азота при ПИД управлении

На Рис. 24 представлена динамика давления при управлении НР.

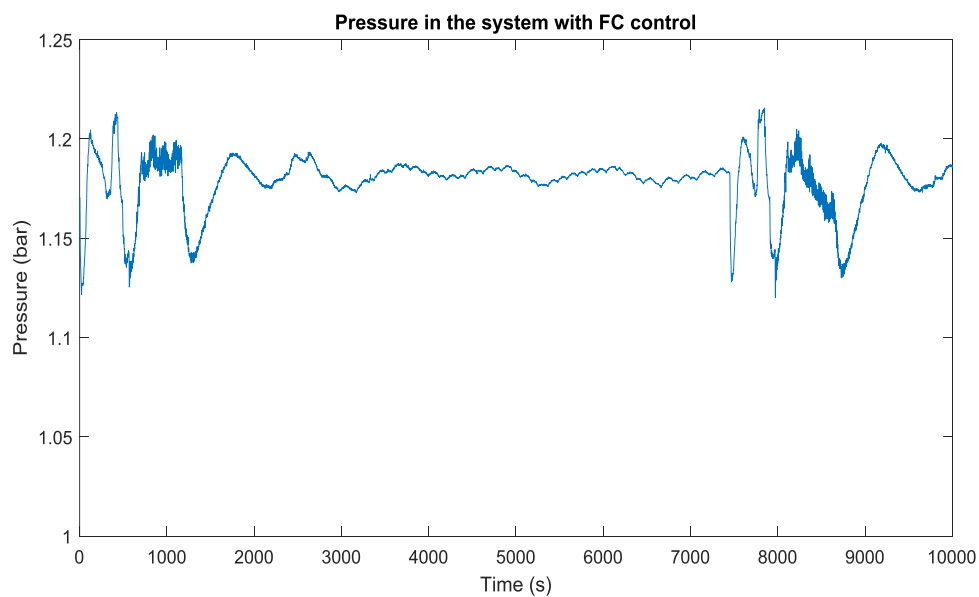


Рис. 24. Давление азота при НР – управлении

Проведем оценку качества управления на основе интегральных показателей качества управления [20].

На Рис. 25 приведены графики изменения давления в системе при работе в режиме заправки для отмеченных ранее этапов 2 и 3. Процесс заправки завершается снижением давления ниже целевого значения, так как вентиль подачи азота перекрывается, и установка переходит в штатный режим работы.

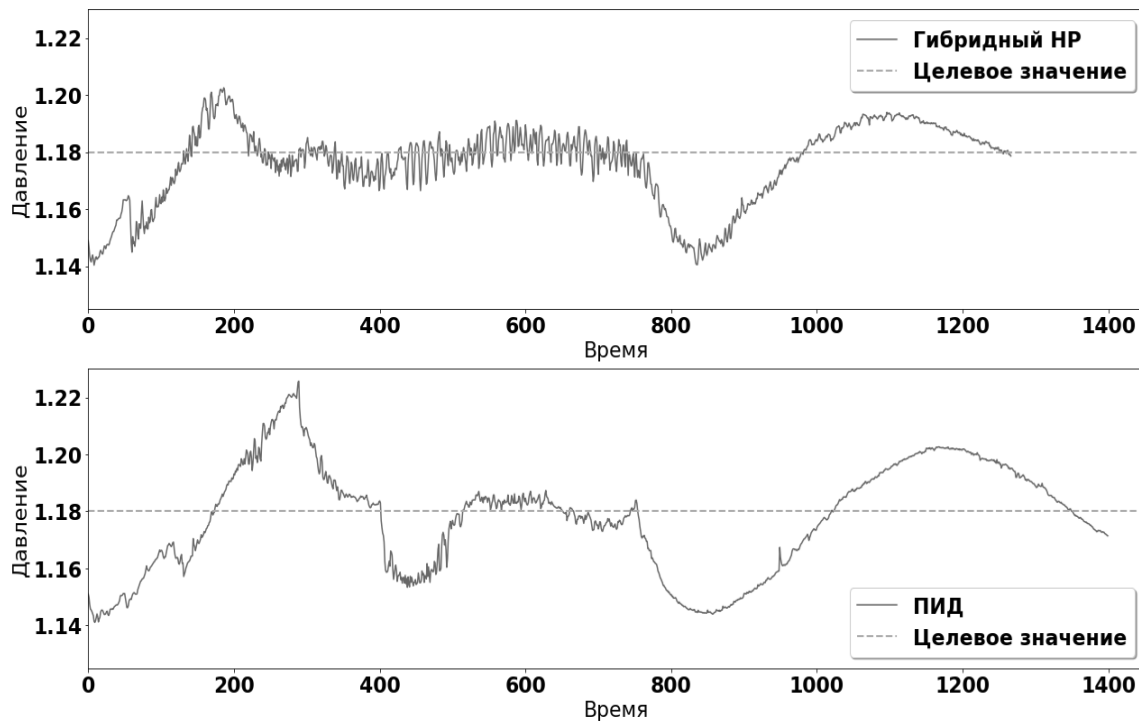


Рис. 25. Сравнение работы двух регуляторов в режиме заправки

На Рис. 26 представлены временные зависимости интегральной ошибки для гибридного ИР и классического ПИД-регулятора.

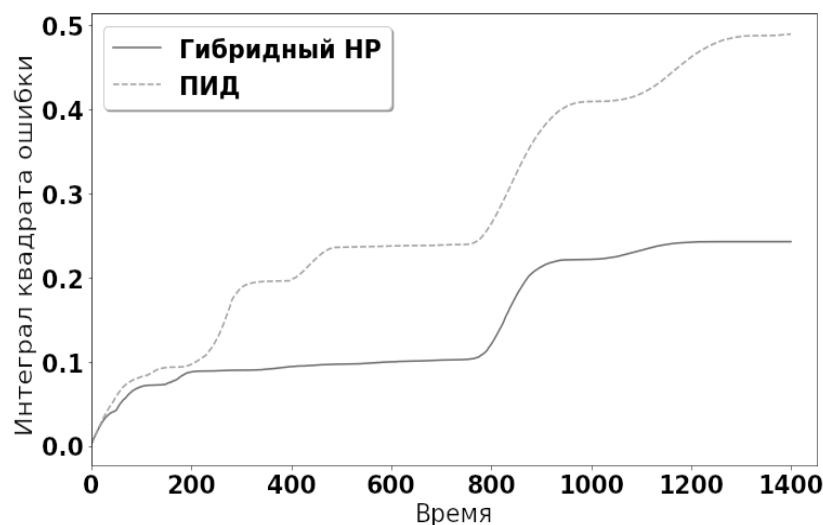


Рис. 26. Изменение интегральной ошибки в процессе работы регуляторов

Хорошо видно, что величина ошибки в случае использования ПИД-регулятора практически вдвое превышает аналогичную величину для гибридного ИР-регулятора во всем диапазоне измерений.

На Рис. 27 представлены фазовые портреты изменения ошибки и скорости ошибки управления для различных видов регуляторов с выделенными зонами притяжения (аттракторы) устойчивости процесса управления.

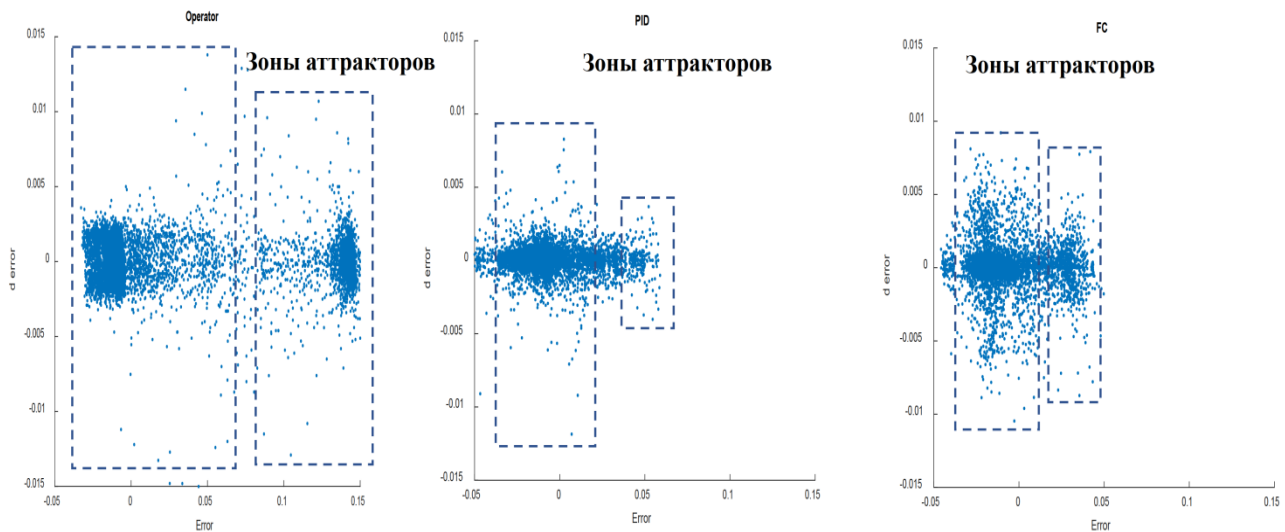


Рис. 27. Фазовые портреты динамического поведения регуляторов

На Рис. 28 приведены законы изменения параметров коэффициентов усиления исследуемых типов регуляторов.

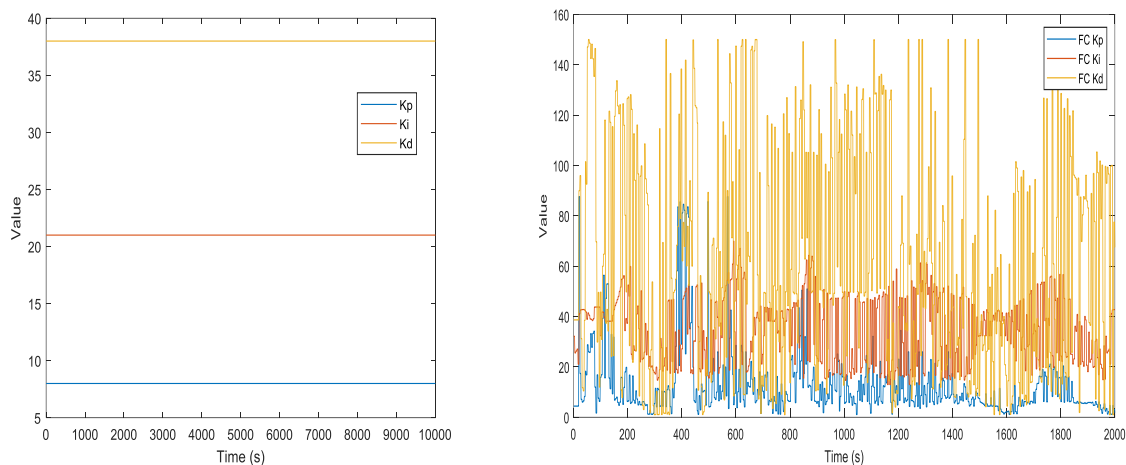


Рис. 28. Коэффициенты усиления (а) классического ПИД регулятора и (б) нечёткого регулятора

Результаты, представленные на Рис. 22 - 28, свидетельствуют о повышении управляемости и устойчивости динамики давления азота в системе на этапе заправки при применении НР.

Проведем оценку устойчивости управления на основе фазового портрета функционирования регулятором.

Из результатов на Рис. 27 следует, площадь зоны аттрактора (аналог экспоненты Ляпунова) нечеткого регулятора меньше соответствующих величин, полученных от управления оператором и ПИД-регулятором. Этот факт объясняется тем, что БЗ НР формировалась на основе физического (информационно – термодинамического) закона об оптимальном распределении устойчивости, управляемости и робастности, а также минимума производства и скорости производства энтропии в ОУ и регуляторе.

Скорость производства энтропии регулятором определяется скоростью ошибки управления. Из Рис.27 видно, что нечеткий контроллер имеет меньшую скорость изменения ошибки управления и, следовательно меньшую скорость производства энтропии (потери полезного ресурса). Разработанная БЗ нечеткого регулятора позволяет компенсировать неполноту информации об ОУ и сформировать оптимальное управление с минимальными потерями полезного ресурса.

5. Энтропийные характеристики работы и расход полезного ресурса регуляторами

5.1 Сравнение энтропийных показателей качества управления

Производство и скорость производства энтропии регулятора характеризуют потерю полезного ресурса регулятором и влияют на перераспределение качеств управления таких как устойчивость, управляемость и робастность [15].

Информационно-термодинамический подход к универсальному описанию динамических объектов управления [5,6] позволяет осуществить переход от модели интеллектуального к модели когнитивного управления на основе энтропийных оценок устойчивости нелинейных систем.

Пример: *Лемма об устойчивости нелинейных систем.* Приведенные в [5,6] соотношения между термодинамической экс-энергией и Гамильтонианом системы позволили сформулировать Лемму об устойчивости Гамильтоновых систем. Условно граница устойчивости определяется условиями теорем Ляпунова и Четаева следующим образом: для заданной производной функции Ляпунова как декомпозиции и суммы скорости производства экс-энергии \dot{W} и скорости диссипации экс-энергии $T_0\dot{S}_i$ выполняется условие

$$\dot{V} = \dot{W} - T_0\dot{S}_i = \sum_{j=1}^N Q_j \dot{q}_j - \sum_{l=1}^{M-N} Q_l \dot{q}_l, \quad (1)$$

где Q_j определяет вектор обобщенных сил и скорость необратимого производства энтропии определяется в виде $\dot{S}_i = \sum_k F_k X_k = \frac{1}{T_0} \sum_k Q_k \dot{q}_k \geq 0$.

Закон управления является оптимальным по Ляпунову если минимизирует первую по времени производную функции Ляпунова на всем пространстве допустимых управлений. В общем случае множество коэффициентов усиления обратной связи оптимизируются минимизацией ошибки управления. Функция Ляпунова определяется как полная энергия ошибки эквивалентности соответствующему Гамильтониану H в виде $V = H$. Тогда концепция оптимальности по Ляпунову следует непосредственно из условия $\dot{W} = 0$ в (1) и максимизации $T_0\dot{S}_i$, при которых производная функции (Гамильтониана) по времени или модифицированная мощность (работа / энергия) записывается в виде

$$\dot{V} = \dot{H} = -T_0\dot{S}_i = -\sum_{j=1}^N Q_j \dot{q}_j = -\sum_{j=1}^N F_j \dot{R}_j,$$

не зависит от динамики системы и определяется как кинематическая величина, применимая к другим системам. Отметим, что F_j означает множество сил, действующих на механическую систему и \dot{R}_j означает инерционную линейную скорость точки, в которой приложена сила. Пассивное управление робототехнических систем следует непосредственно при $\dot{W} = 0$ в (1). Информационные функции Ляпунова рассмотрены в [6].

Разработка робастной интеллектуальной системы управления (далее — ИСУ) в условиях динамически изменяющихся параметров среды (выход датчиков из строя, старение и т. д.) крайне затруднена. Несмотря на то, что некоторые из условий возможно спрогнозировать, полностью охватить все ситуации единой базой знаний (далее — БЗ) проблематично. Используя нетрадиционный набор интеллектуальных инструментариев, таких как Оптимизатор Баз Знаний на мягких вычислениях (далее — ОБЗ) и квантовый нечёткий вывод (далее — КНВ), в данной работе предлагается решение такого рода проблем путем внедрения самоорганизации в процесс проектирования БЗ ИСУ, с применением КНВ, встроенный в инструментарий проектирования БЗ на квантовых вычислениях QCOptKB™ и введения в контур управления когнитивных регуляторов, БЗ которых формируются из сигналов ментальных команд электроэнцефалограмм (далее - ЭЭГ) коры головного мозга (далее - ГМ) человека - оператора.

5.2 Энтропийные характеристики работы и расход полезного ресурса регуляторами

Рассмотрим энтропийные характеристики работы регулятора. Далее представлена формула (см., ч. 4.2) расчета скорости производства энтропии и её интегрального показателя.

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

Далее на Рис. 30 представлено сравнение скоростей производства энтропии регуляторами.

Рассмотрим энтропийные характеристики работы регулятора. Далее представлена формула расчета скорости производства энтропии и её интегрального показателя.

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

Далее на Рис. 29 представлено сравнение скоростей производства энтропии регуляторами.

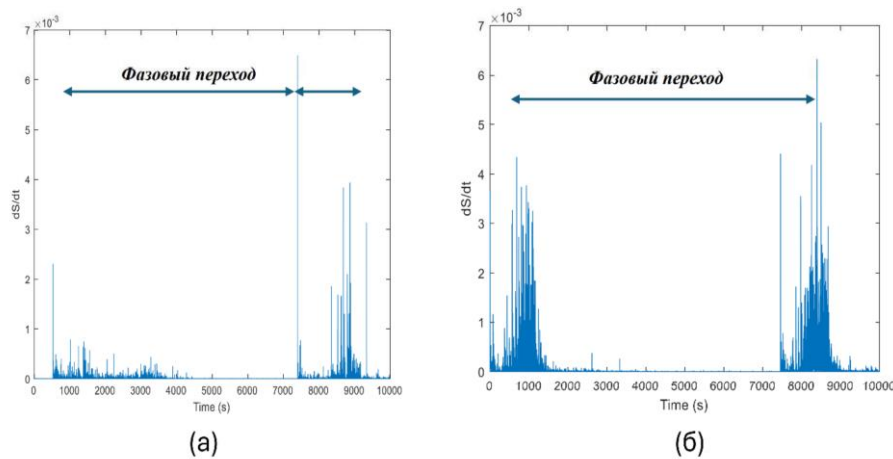


Рис. 29. Скорость производства энтропии (а) для ПИД-регулятора; (б) для НР

Скорость производства энтропии ПИД регулятора ниже скорости производства энтропии в интеллектуальных регуляторах.

На Рис. 30 приведены фазовые портреты термодинамического поведения регуляторов.

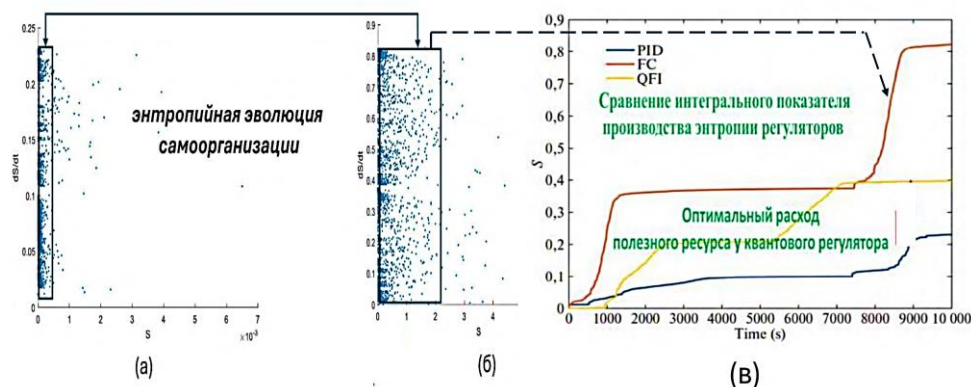


Рис. 30. Энтропийный фазовый портрет (а) для ПИД-регулятора; (б) для НР; и (в) сравнение интегрального показателя производства энтропии регуляторов

Низкий уровень качества управления и низкий уровень энтропии связаны. Сам объект управления и его режимы работы обладают высокой сложностью и степенью неопределённости. Компенсировать сложность объекта управления необходимо соответствующим уровнем интеллектуальности регуляторов, отнимая производство энтропии ОУ, согласно информационно-

термодинамическому закону интеллектуального управления. Нечёткие интеллектуальные регуляторы обладают более высоким уровнем производства энтропии. Это позволяет им управлять «интеллектуально», в соответствии с заложенными критериями качества на этапах проектирования. Однако, при этом возрастает сложность самого управления, что сказывается на сроках службе исполнительного оборудования.

В рамках представленных результатов поставленной задачи предложена информационная технология для создания распределенной ИСУ на основе встраиваемых в контур управления интеллектуальных нечетких регуляторов, позволяющая эффективно встраиваться в уже работающую систему управления без изменения ее исходной структуры. Разработанный инструментарий позволяет:

- Включаться в системы, работающие на базе фреймворка TANGO Controls или на базе спецификации OPC Unified Architecture (UA) [10].
- Использовать для построения набора продукционных правил БЗ внешние вычислительные ресурсы.
- Дистанционно настраивать различные ОУ, при этом используя реальные данные, полученные непосредственно с датчиков системы.
- Встраивать ИСУ в действующую систему управления нижнего уровня на базе стандартных протоколов обмена данными, повышая эффективность работы.

Применяемый метод для решения поставленной задачи позволил повысить качество управления в автоматическом режиме, существенно уменьшить расход азота и поддерживать на требуемом уровне давление в контуре.

Выводы

На комплексе NICA развивается широкая программа прикладных исследований и в этих условиях эффективное решение задачи создания интеллектуальной системы управления комплексом NICA подразумевает применение современных интеллектуальных вычислений и «робастных» информационных технологий, представляющих собой совокупность методов теории интеллектуального управления, которые обеспечивают хорошее качество управления, даже если объект управления отличается от расчётного или его математическая модель неизвестна.

Необходимость применения Интеллектуальных информационных технологии (ИИТ) обусловлена необходимостью повышения эффективности решения задач автоматического управления комплексом NICA, а именно добавлением свойств адаптации, обучения и самоорганизации с целью обеспечения устойчивости, повторяемости и надежности требуемых режимов работы - ускорения ионов, их накопления в кольцах коллайдера, поддержание заданных параметров режима столкновений пучков в физическом эксперименте.

В данной главе было представлено описание основных измерительных и управляющих элементов установки. Анализ показывает, что режимы ручной настройки и управления такой сверх сложной и распределенной системой, потребует развития новых программных инструментариев в сервисный набор оператора установки, которые позволили бы уменьшить время настройки системы и повысить эффективность её функционирования.

Результаты исследований и проведенных экспериментов подтверждают работоспособность разработанных программных инструментов, основанных на мягких вычислениях.

Практическая реализация. В проведённой работе апробированы все этапы технологии проектирования встраиваемых ИСУ на основе мягких вычислений, что позволило:

- осуществить проектирование оптимальной ИСУ с максимальным уровнем надёжности и управляемости сложным объектом управления в условиях неопределённости исходной информации;
- спроектировать робастную систему управления при отсутствии математической модели системы, используя данные, измеряемые на реальной установке.

- Благодаря применению ГА обучающий сигнал может быть создан без использования математической модели установки. Это особенно важно для систем управления, содержащих объект управления с не доопределёнными, слабо формализованными параметрами.
- Подбор траектории изменения коэффициентов классического ПИД-регулятора позволяет добавлять в систему свойства адаптивности и обучаемости без необходимости внесения изменений в существующую систему управления.
- НР может работать в качестве интеллектуальной надстройки над уже работающей системой управления, повышая её устойчивость. Не изменяя существующий исполнительный уровень управления повысить надёжность и эффективность всей системы управления.

Список источников

1. Ulyanov S.V. Self-organized control system. – US Patent: No US 6,411,944 B1. Date of Patent: Jun. 25, 2002. (Filed: Mar 17, 1998).
2. Ульянов С. В., Ульянов В. С. Применение сквозных технологий мягких вычислений в задаче интеллектуального робастного управления одноколесным роботом – велосипедом // Робототехника и техническая кибернетика. – 2020. – Т. 8, № 2. – С. 119-138. – DOI: 10.31776/RTCJ.8204.
3. Computational intelligence for robust control algorithms of complex dynamic systems with minimum entropy production. Pt 1: simulation of entropy-like dynamic behavior and Lyapunov stability / S. Ulyanov, K. Yamafuji, V. Ulyanov [et al.] // Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics. – 1999. – Vol. 3, No 2. – Pp. 82-98.
4. Ulyanov S.V. Self-organizing quantum robust control methods and systems for situations with uncertainty and risk. – US Patent: No US 8,788,450 B2. Date of Patent: Jul. 22, 2014. (Filed: Oct 14, 2011).
5. Когнитивное интеллектуальное управление. Часть 2: квантовый алгоритм нечеткого вывода в интеллектуальной когнитивной робототехнике / С. В. Ульянов, Д. Зрелова, А. В. Шевченко А. А. Шевченко // Робототехника и техническая кибернетика. –2023. – Т. 11, № 2.– С. 133-146.
6. 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>
7. 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, No 6. – Pp. 908-961.
8. Информационно-термодинамическая неопределенность в интеллектуальных самоорганизующихся нечетких системах управления и извлекаемая из скрытой квантовой информации работа для формирования термодинамической управляющей силы / С. В. Ульянов, Д. П. Зрелова, А. А. Шевченко, А. В. Шевченко // Нечеткие системы и мягкие вычисления. – 2023. – Т. 18. – № 2. – С. 151–200. – DOI: 10.26456/fssc94.
9. 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.
10. Ulyanov, S. Intelligent Cognitive Robotics : Quantum self-organization of imperfect knowledge bases: quantum intelligent force control and information-thermodynamic law of extracted informed useful work. Vol.2 / S. Ulyanov. – Москва : Курс, 2022. – 472 с. – (Quantum IT ; Volume II).
11. Ulyanov S. V., Ulyanov V. S., Hagiwara T. Robust Quantum Controllers: Quantum Information – Thermodynamic Hidden Force Control in Intelligent Robotics based on Quantum Soft Computing // Arxiv: [quant-ph] 2305.11254v1. – May 12, 2023.
12. Ulyanov S. V. Efficient simulation system of quantum algorithm gates on classical computer based on fast algorithm. – US Patent. – Pub. No.: US 2006/0224547 A 1. – Oct. 5, 2006.

13. Ulyanov S. V. System and method for control using quantum soft computing. — Patent US 6,578,018 B1, Filed Jul. 27, 1999. Date of patent. Jun. 10, 2003.
14. Ulyanov S. V. Method and hardware architecture for controlling a process or for processing data based on quantum soft computing. – US Patent. – Patent No.: US 7,383,235 B 1. – Jun. 3, 2008.
15. Ulyanov S.V. A method of performing a quantum algorithm for simulating a genetic algorithm. – EP 1 672 569 A1. – Date of filing: 20.12.2004. – Date of publication: 21.06.2006 Bulletin 2006/25.
16. Ulyanov S.V., Ulyanov V.S. Software emulator of quantum algorithms for sophisticated simulation on a conventional computer // Software & Systems. – 2024. – Vol. 37, No 1. – Pp. 5-17. – DOI:10.15827/0236-235X.142.005-017.
17. Ульянов С, Решетников А, Рябов Н. Квантовый генетический алгоритм: выбор типа и вида корреляции в квантовом нечетком выводе // Системный анализ в науке и образовании. – 2018. – № 2. – С. 35-54.
18. Self-organized intelligent quantum controller: quantum deep learning and quantum genetic algorithm – QSCOptKB™ toolkit / V. V. Korenkov, A. G. Reshetnikov, S. V. Ulyanov [et al.] // Proceedings of The 6th International Workshop on Deep Learning in Computational Physics. PoS(DLCP2022). – P. 012. – DOI:10.22323/1.429.0012.
19. Интеллектуальная когнитивная робототехника. Ч. 3: Классический симулятор квантовых алгоритмов интеллектуального управления – самоорганизующийся квантовый регулятор и квантовые лагранжевы ФИНС / В. В. Боровинский, А. Г. Решетников, В. С. Ульянов, С. В. Ульянов. – Москва: Курс. – 2024. – 468 с.
20. 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.
21. Information analysis of quantum gates for simulation of quantum algorithms on classical computers / S. V. Ulyanov, S. A. Panfilov, I. Kurawaki, A. V. Yazenin // Quantum Communication, Computing, and Measurement 3. – Boston, MA : Springer US, 2001. – Pp. 207–214.
22. Intelligent cognitive robotics. Vol. IV: Quantum soft computing toolkit for Industry 5.0 / 6.0. / A. G. Reshetnikov, S. V. Ulyanov, D. P. Zrelova, P. V. Zrelov. – М.: Курс. – 2023. – 464 p.
23. Intelligent cognitive robotics. Vol. III: Quantum computational toolkit of quantum self-organized intelligent control system simulator: quantum deep learning on quantum – inspired neural networks and quantum genetic algorithms / A. G. Reshetnikov, S. V. Ulyanov, D. P. Zrelova, P. V. Zrelov. – М.: Курс. – 2023. – 432 p.
24. 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.
25. 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.
26. Nielsen M.A., Chuang I.L. Quantum Computation and Quantum Information. – UK, Cambridge University Press, 2000. – 676 p.
27. Benenti G., Casati G., Strini G. Principles of quantum computation and information. Vol. II. 2. – Singapore: World Scientific, 2004.
28. Ulyanov S. V., Litvintseva L. V., Ulyanov S. S. Quantum information and quantum computational intelligence: Design & classical simulation of quantum algorithm gates. – Universita degli Studi di Milano: Polo Didattico e di Ricerca di Crema Publ. – 2005. – Vol. 80.
29. 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.
30. Ulyanov S. V. Quantum Soft Computing in Control Process Design: Quantum Genetic Algorithms and Quantum Neural Network Approaches // Proc. World Automation Congress Fifth Intern. Symposium on Soft Computing for Industry. – Seville, Spain June 28th-July 1st, 2004 (paper No ISSCI028).
 31. 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.
 32. 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.
 33. Control system of the superconducting magnet test bench for the NICA accelerator complex / G. S. Sedykh, E. V. Gorbachev, A. E. Kirichenko // Proc. of the XXVI International Symposium on Nuclear Electronics & Computing (NEC'2017). – Becici, Budva, Montenegro, September 25 - 29, 2017.
 34. 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>.
 35. Ulyanov S. V. et al. Soft computing optimizer of intelligent control system structures. – US Patent No US 7,219,087 B2. – Date of Patent: May 15, 2007.
 36. Ulyanov S. V. System for soft computing simulation. – US Patent No US 2006/0218108. Filed: Oct. 4, 2005. – Date of Patent: Sep. 28, 2006.
 37. 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.
 38. 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.
 39. 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.