

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ ДАВЛЕНИЕМ И РАСХОДОМ ЖИДКОГО АЗОТА В КРИОГЕННОЙ СИСТЕМЕ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ МАГНИТОВ: ПРОГРАММНО-АППАРАТНАЯ ПЛАТФОРМА

*А. В. Бутенко, П. В. Зрелов, В. В. Кореньков,
С. А. Костромин, Д. Н. Никифоров, А. Г. Решетников¹,
С. В. Семашко, Г. В. Трубников, С. В. Ульянов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Статья посвящена описанию программно-алгоритмической платформы интеллектуального управления (на примере квантовых самоорганизующихся регуляторов в контуре управления) для аппаратной части действующего макета дистанционного управления технологическим процессом охлаждения сверхпроводящего магнита с гарантированным достижением устойчивой зоны сверхпроводимости. При этом обеспечиваются оптимальные параметры качества управления, такие как температура, расход азота, быстродействие, требуемый уровень давления и минимальная сложность реализации управления. Представлено описание действующего макета системы дистанционного управления со встроенными самоорганизующимися квантовыми регуляторами. В статье на примере расхода азота рассматривается и обосновывается выбранная структура интеллектуальной системы управления, экспериментально продемонстрирована работоспособность и эффективность разработанной интеллектуальной системы управления на технологиях квантовых мягких вычислений. Работа выполнена в рамках межлабораторного проекта ЛИТ и ЛФВЭ ОИЯИ.

The paper is devoted to the toolkit description of a software-algorithmic platform for intelligent control (using the example of self-organizing quantum controllers in the control circuit) for the hardware of the current layout of remote control of the cooling process of a superconducting magnet with guaranteed achievement of a stable superconductivity zone. At the same time, optimal control quality parameters, such as temperature, nitrogen consumption, speed, required pressure level and minimal complexity of control implementation, are provided. A description of the current layout of the remote control system with built-in self-organizing quantum regulators is presented. In the paper, the selected structure of the intelligent control system is considered and justified by the example of nitrogen consumption, the operability and efficiency of the developed intelligent control system based on quantum soft computing technologies is experimentally demonstrated. The work was carried out within the framework of the interlaboratory project of MLIT and VBLHEP of JINR.

PACS: 07.05.Bx; 07.05.Hd

¹E-mail: agreshetnikov@jinr.ru

ВВЕДЕНИЕ

Одной из основных идей применения интеллектуального управления является разработка унифицированного инструментария проектирования встраиваемых в физическую установку самоорганизующихся интеллектуальных систем управления (ИСУ) с целью повышения эффективности и надежности ее функциональности при эксплуатации объекта управления (ОУ) [1, 2]. В настоящей работе рассматривается программно-алгоритмическая платформа процесса проектирования встраиваемых самоорганизующихся квантовых контроллеров для действующего макета дистанционного управления технологическим процессом охлаждения сверхпроводящего (СП) магнита.

Основу программно-алгоритмической платформы составляют технологии интеллектуальных вычислений (мягкие и квантовые вычисления, квантовые нечеткие алгоритмы управления и квантовое нечеткое программирование [1–4]). В основе процесса лежат информационные технологии проектирования, разрабатываемые в Лаборатории информационных технологий им. М. Г. Мещерякова (ЛИТ) ОИЯИ. 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 [2], что позволяет учесть особенности комплекса системы управления СП-магнитом, состоящего из разнородных модулей со своими протоколами передачи данных и управления (рис. 1).



Рис. 1. Структурная схема системы связи и подсистем ИСУ с удаленным объектом управления

Такого рода системы в теории интеллектуальных систем называют плохо формализуемыми и слабоструктурированными [1, 2], исследования такого рода систем являются актуальными в задачах управления в мегасайенс-проектах типа NICA [3, 4].

Интеллектуальные регуляторы, принципы работы которых основаны на новых квантовых информационных технологиях, внедрены на действующем комплексе с использованием классических технологий управления технологическими системами на основе фреймворка TANGO Controls [5]. При этом реализованы программные средства дистанционного управления со встроенными самоорганизующимися квантовыми регуляторами, позволяющие гарантированно достигать цели управления.

В статье 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 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.

На рис. 2 представлен график изменения температуры входа и выхода канала подачи гелия, верхнего и нижнего ярем линзы СП-магнита в процессе криогенных испытаний. Блок-схема этого процесса представлена на рис. 3.

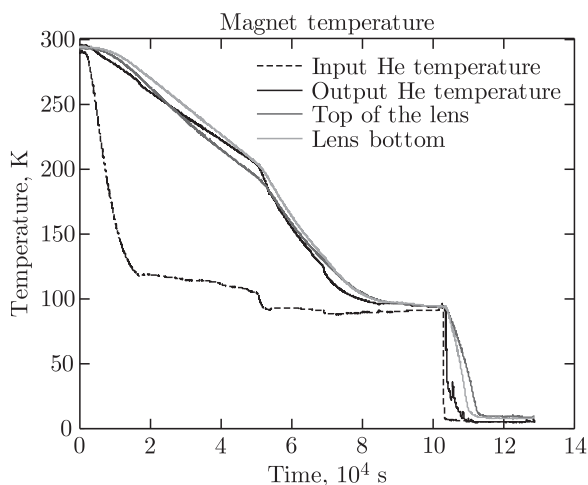


Рис. 2. Показания датчиков температуры линзы СП-магнита и гелиевого канала в процессе криогенных испытаний

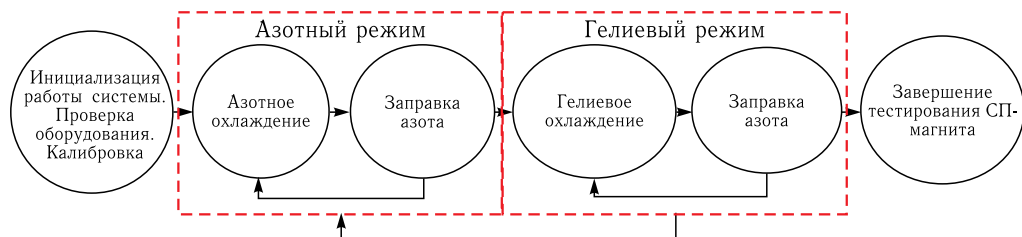


Рис. 3. Режимы функционирования криогенной установки в процессе испытаний

Процесс охлаждения СП-магнита состоит в последовательном сочетании двух режимов — азотного и гелиевого. Жидкий азот используется для охлаждения до уровня 85 К, достигаемого примерно за 80 ч работы, после чего включается режим охлаждения жидким гелием до 4–5 К (см. рис. 2), сопровождаемый дополнительным охлаждением азотом отдельных частей магнита и самого гелия. Охлаждение сопровождается периодической заправкой азота.

Представленные разработки ведутся в рамках межлабораторного проекта «Разработка интеллектуальной автоматизированной системы обеспечения жидким азотом для стенда криогенных испытаний СП-магнитов» в ЛИТ и ЛФВЭ.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС ОХЛАЖДЕНИЯ СП-МАГНИТА НА КРИОГЕННОМ СТЕНДЕ

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, 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.

Для выполнения этой задачи имеются три гелиевых сателлитных рефрижератора (рис. 4), содержащих по два испытательных плеча, которые могут работать последовательно.

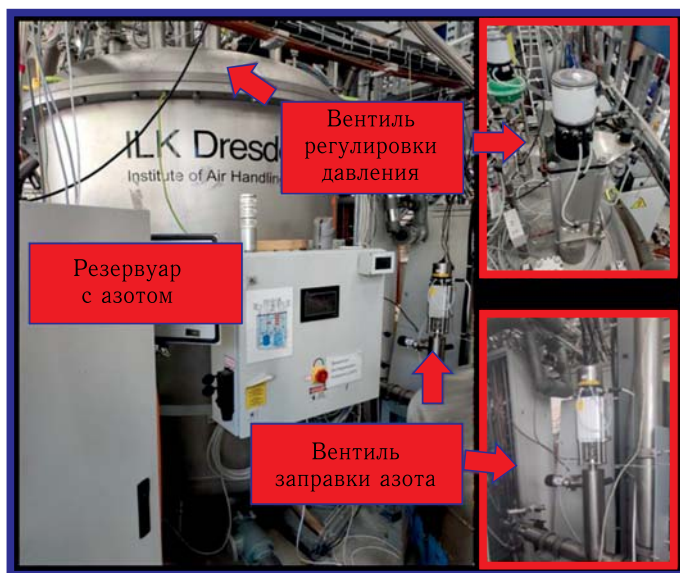


Рис. 4. Установка азотного охлаждения

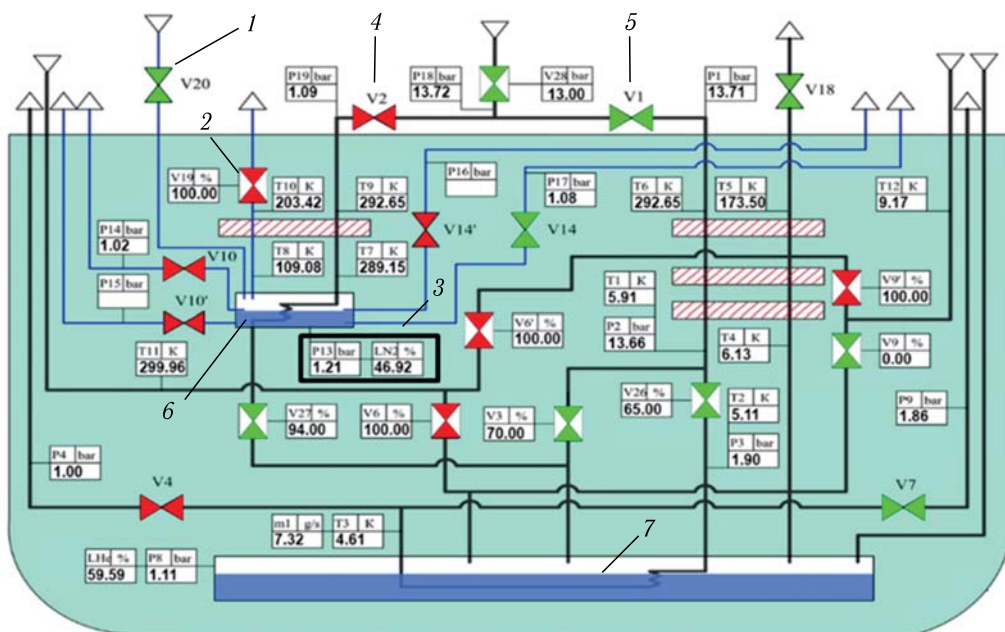


Рис. 5. Интерфейс оператора и схема гелиевого спутникового рефрижератора

Каждое испытательное плечо, в свою очередь, имеет по два высокотемпературных сверхпроводящих (ВТСП) токоввода (15 кА).

Процесс охлаждения и проведения криогенных испытаний (см. рис. 3) можно разделить на несколько этапов. В азотном режиме работы спутникового гелиевого рефрижератора первичный поток гелия к магниту (вентиль V1 открыт — рис. 5, вентиль управления потоками) охлаждается за счет вторичного потока гелия, проходящего через азотную ванну (вентиль V2 открыт — рис. 5, вентиль управления потоками). Основной задачей такого режима охлаждения является достижение следующих температурных значений (T):

- температура на выходе из магнита на уровне $T = 90\text{--}100$ К;
- температура тепловых (медных) экранов на уровне $T = 78\text{--}85$ К;
- температура ВТСП-части токовводов на уровне $T = 78\text{--}80$ К.

На рис. 5 цифрами обозначено: 1 — вентиль заправки азота; 2 — вентиль регулировки давления; 3 — датчики давления азота и объема; 4 и 5 — управление потоками; 6 — азотный рефрижератор; 7 — гелиевый рефрижератор (на основе рисунка из работы [6]).

Основной задачей гелиевого режима охлаждения является достижение температуры на выходе из магнита на уровне 4–5 К.

В целях экономии жидкого азота начало охлаждения ВТСП-части токовводов происходит за несколько часов до начала гелиевого режима охлаждения.

В гелиевом режиме работы спутникового гелиевого рефрижератора первичный поток гелия к магниту охлаждается за счет наличия жидкого гелия в гелиевом сборнике. Вторичный поток (через азотный сборник) перекрыт (рис. 5, вентиль управления потоками).

Основной задачей азотного контура в процессе гелиевого режима охлаждения и криогенных испытаний является поддержание температур тепловых экранов и ВТСП-части токовводов на уровне 78–85 К. Поддержание температур, в свою очередь, возможно только при наличии необходимого по величине показателя давления (1,20–1,22 бар) в азотном рефрижераторе спутника (см. рис. 5).

Процесс охлаждения жидким азотом состоит из двух этапов: 1) азотного режима, в котором охлаждение экрана и выходных элементов токовводов выполняется азотом, 2) гелиевого режима, в котором азот применяется в том числе и для охлаждения гелия, который, в свою очередь, охлаждает ярмо и входные токовводы магнита.

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

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

В процессе заправки азотом сначала сбрасывается давление в накопительной емкости до атмосферного, затем производится открытие вентиля V20 (рис. 5, вентиль заправки азота), вызывающее резкий рост давления, достигающего пикового значения с последующим снижением и выходом на стабильный рабочий режим. После закрытия вентиля V20 давление в системе начинает расти, выполняется включение автоматической системы управления для отработки вентилем V19 переходного процесса с обеспечением максимальной скорости 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 для достижения ее более стабильной. В этом режиме основным критерием является поддержание заданного значения, поскольку изменение давления будет влиять и на качество охлаждения, и на состояние сверхпроводимости.

Система управления криогенным стендом сверхпроводящих магнитов, действующая по принципу отклонения и компенсации ошибки управления на основе глобальной отрицательной связи, разработана [6] в ЛФВЭ с использованием TANGO Controls. В ее состав входят: система термометрии и система управления спутник-ными рефрижераторами, записи и хранения состояний аппаратных средств, программные модули для сбора и управления данными, система конфигурации, система контроля доступа, веб-служба и клиентские приложения и т. д.

На рис. 6, а представлена структурная схема двухуровневой системы автоматического управления процессом охлаждения азотом на фабрике магнитов (разработка ЛИТ). На схеме показаны различные режимы функционирования регулятора кон-

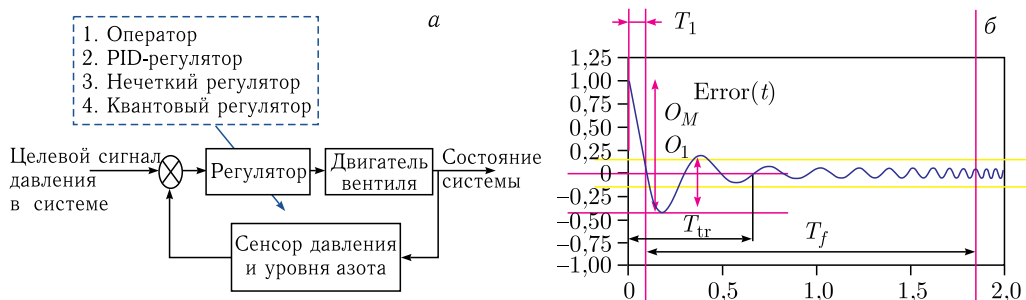


Рис. 6. а) Схема системы охлаждения азотом структуры управления с обратной связью; б) показатели качества переходного процесса (см. текст)

тура управления: ручного (осуществляемого оператором), автоматического на основе PID-регулятора¹, гибридного нечеткого PID-регулятора и квантового регулятора².

Показателями качества процесса управления, реализуемого на основе принципа обратной связи, являются показатели, определяемые непосредственно по переходной характеристике (рис. 6, б). Быстродействие системы T рассчитывается следующим образом:

$$T = 1 - \frac{T_1}{T_f},$$

где T_f — время установления системы и $T_f \geq T_1$. Перерегулирование O рассчитывается по формуле

$$O = 1 - \frac{O_1}{O_M},$$

где O_1 — диапазон устойчивости системы и $O_M \geq O_1$; O_M — размах амплитуд переходного процесса (см. рис. 6, б). Сложность управления P рассчитывается по формуле

$$P = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t=0}^T \left(\frac{dK}{dt} \right)^2 dt},$$

где K — величина управляющего воздействия. Сложность управления отражает оценку проделанной исполнительными механизмами работы за определенный промежуток времени T .

Применение принципа глобальной отрицательной обратной связи позволяет обеспечить систему устойчивостью и управляемостью. Однако этого не всегда достаточно для робастного интеллектуального управления [1]. В этом случае чувствительность объекта управления к изменениям внутренних и внешних условий функционирования высока, и система управления только на основе PID-регулятора не обеспечивает гарантированного достижения цели управления [2].

¹PID (proportional-integral-differential)-регулятор — стандартный пропорциональный интегральный дифференциальный регулятор, работающий по принципу минимума отклонения от задающего сигнала (цели управления) и компенсации ошибки управления. Выходным сигналом PID-регулятора является управляющая сила, действующая на объект управления.

²Разработка ЛИТ ОИЯИ.

Отметим, 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%,
- температуру азотной части тоководов выше 100 К.

Рассмотрим кратко особенности выбираемой системы управления.

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ВСТРАИВАЕМЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Действующая система управления на криогенной установке проверки СП-магнитов, разработанная в научно-техническом отделе пучков ЛФВЭ, использует в качестве программируемого логического контроллера (ПЛК) контроллеры Siemens серии Simatic S7-300. Система управления верхнего уровня (SCADA) представляет собой распределенный программно-аппаратный комплекс, реализованный на фреймворке TANGO Controls. Система работает в ручном и автоматическом режиме и включает в себя блокировки аварийных ситуаций.

Одно из требований к разрабатываемой в рамках межлабораторного проекта «Разработка интеллектуальной автоматизированной системы обеспечения жидким азотом для стенда криогенных испытаний СП-магнитов» технологии проектирования встраиваемых самоорганизующихся интеллектуальных систем управления — сохранение существующего уровня управления за счет реализации встраиваемой программно-алгоритмической надстройки. В том числе сохранение возможности выбора и переключения различных алгоритмов управления, анализа журналов функционирования установки и создания обучающих выборок, дистанционного обучения встраиваемых нечетких нейронных сетей и квантовых регуляторов.

ИСУ может работать по нескольким алгоритмам в зависимости от выбранного оператором режима, к чему относятся:

- режим гибридного нечеткого PID-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 надежностью и качеством управления.

В качестве ядра технологии разработки квантового регулятора рассматривается программный оптимизатор баз знаний (ОБЗ) [7–9].

На рис. 7 представлена схема интеллектуального управления физической установкой с использованием 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 баз знаний (БЗ).

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

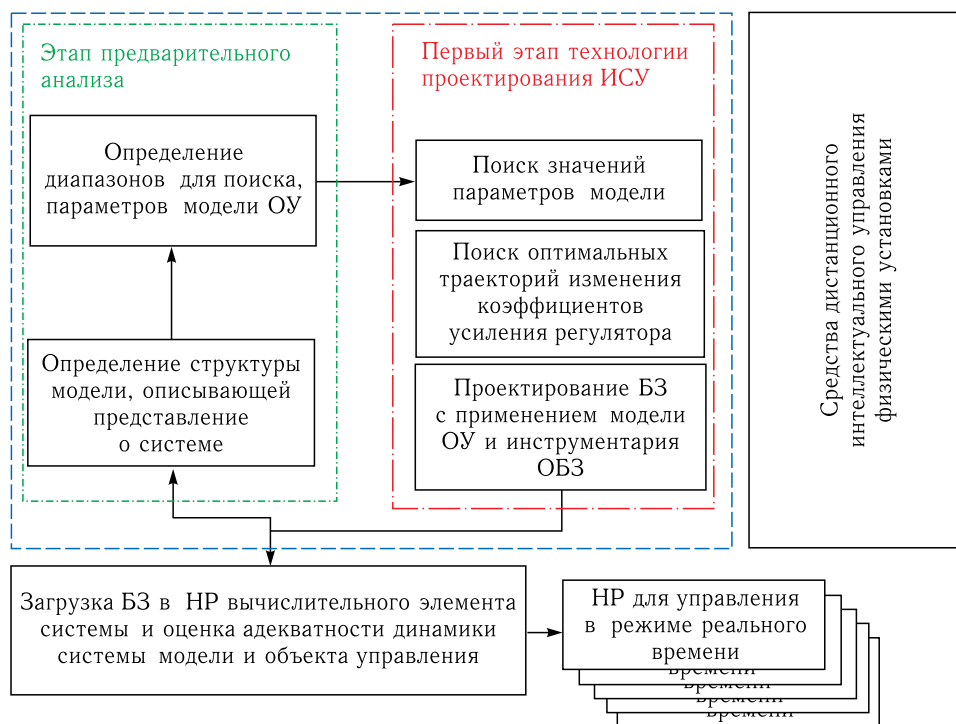


Рис. 7. Проектирование БЗ с применением модели ОУ и инструментария ОБЗ

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 [1] — требуют затрат больших вычислительных ресурсов, для этого ОБЗ представляет собой комплекс из трех распределенных частей: 1) расчетной, работающей удаленно на мощных вычислительных станциях; 2) встраиваемой в объект управления (ОУ) и реализующей алгоритмы взаимодействия с установкой; 3) интерфейсной, предоставляющей доступ к программной и устанавливаемой оператором части. В частности, обучающая выборка, полученная от TANGO Controls, обрабатывается квантовым генетическим алгоритмом в расчетной части ОБЗ. Обмен данными и запуск обработки реализованы 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 [5, 10, 11]. Приняв входные значения, расчетная часть ОБЗ оценивает эффективность предыдущего решения — загруженной в нечеткий регулятор (НР) базы знаний — и осуществляет формирование новой или корректировку используемой БЗ для проверки следующего решения.

Оптимизация БЗ с использованием дистанционного соединения с ОУ непосредственно с ОБЗ имеет ряд преимуществ:

- она позволяет не разрабатывать математическую модель и при этом получать знания о качественном поведении ОУ для построения БЗ;
- дистанционное соединение позволяет оптимизировать БЗ в определенных (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 дает 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 том числе нештатную, в режиме реального времени функционирования.

РЕЗУЛЬТАТЫ СРАВНЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ МЕТОДОВ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ АЗОТНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ СП-МАГНИТА

Рассмотрим результаты исследований, проведенных в режиме азотного охлаждения. На рис. 8 представлена временная зависимость для уровня давления (в барах) при азотном охлаждении за период около 40 мин, где имеются следующие обозначения: 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, QFI control — режим автоматизированного управления с помощью квантового 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 PID-регулятор обладает низким быстродействием и высоким уровнем пере-

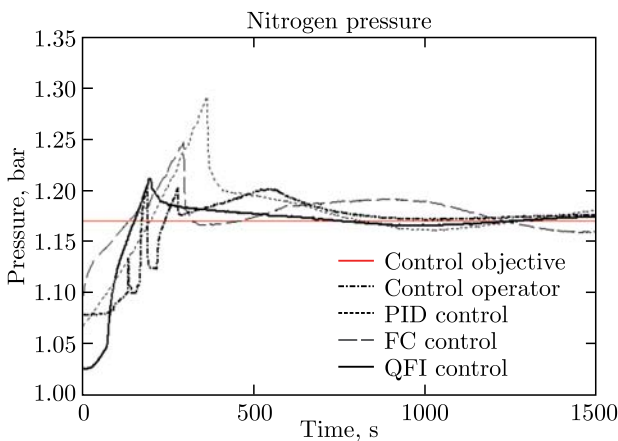


Рис. 8. Давление в азотном сборнике при азотном охлаждении

**Сравнение критериев качества переходного процесса
в азотном режиме охлаждения**

Регулятор	Перерегулирование	Быстродействие	Сложность управления
Оператор	0,013	0,5	0,2
PID	0,021	0,78	0,5
FC (НР)	0,017	0,65	0,91
QFI (КР)	0,012	0,3	0,52

регулирования (1,29 бар), что является критическим и может рассматриваться как близкое к аварийной ситуации (1,30 бар). При этом нечеткий регулятор НР и квантовый регулятор (КР) на квантовом нечетком выводе (КНВ) демонстрируют высокое быстродействие (время релаксации 210 и 215 с соответственно) при низком уровне перерегулирования (1,24 и 1,21 бар соответственно). Оператор достаточно хорошо справился с задачей установки требуемого давления (перерегулирование 1,21 бар и быстродействие 280 с), однако не смог установить требуемое значение давления (установившийся режим 1,18 бар) (таблица).

Рис. 9 демонстрирует расход полезного ресурса (азота) установки.

Хорошо видно, что автоматическое управление за счет непрерывного контроля демонстрирует более эффективное использование полезного ресурса и позволяет сократить расход на 50 %, в частности, PID-регулятор — на 50 %, нечеткий регулятор НР — на 54 %, квантовый нечеткий регулятор КР — на 53 %.

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. 10, а представлено изменение выходных значений пропорционального коэффициента усиления нечетких регуляторов и обобщающего квантового регулятора. FC1 и FC2 — нечеткие контроллеры, спроектированные в различных ситуациях обучения.

На рис. 10, а на основе квантовой информационной термодинамики экспериментально подтверждено существование нового синергетического эффекта проектирования робастной БЗ из неробастных БЗ за счет извлечения скрытой в классических

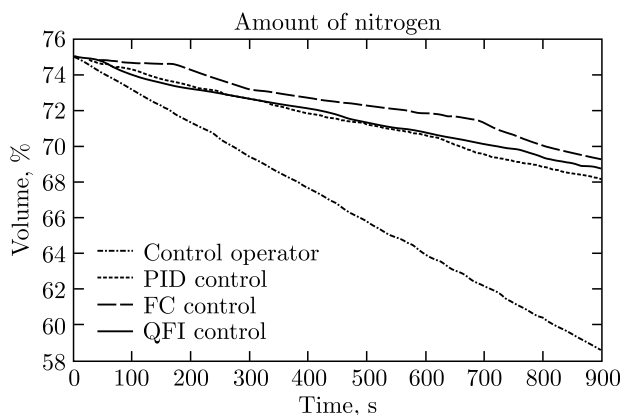


Рис. 9. Расход азота в накопительной емкости

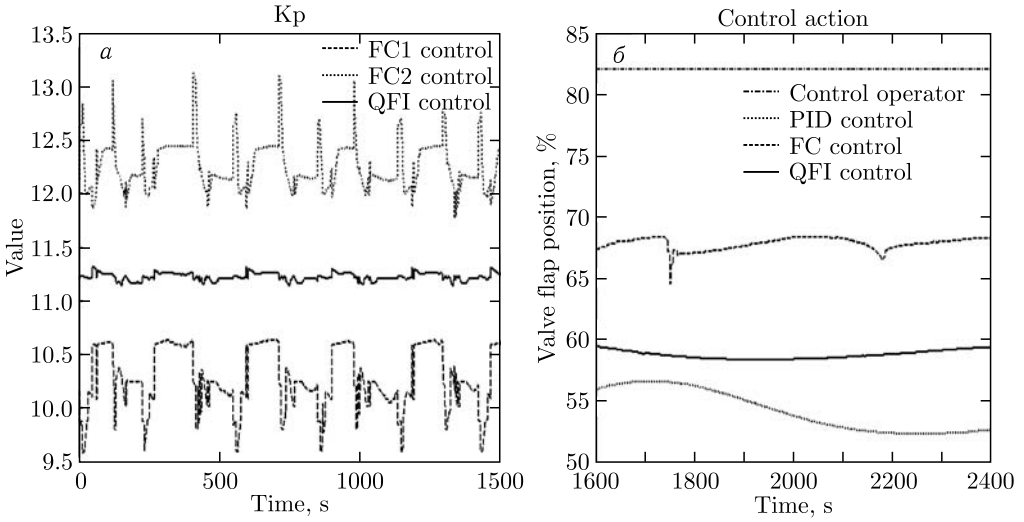


Рис. 10. Управляющее воздействие: а) выходные значения нечетких регуляторов (FC1, FC2) и обобщающего их квантового регулятора (QFI); б) траектории управляющих сигналов, выполняемых оператором, PID-регулятором, нечетким регулятором и квантовым регулятором

состояниях квантовой информации, позволяющей совершить дополнительную полезную работу за счет новой термодинамической управляющей силы. На рис. 8, 9, 11 и 12 данный эффект наглядно продемонстрирован экспериментально. На классическом уровне данный эффект принципиально получить невозможно [2].

На рис. 10, б изображены траектории управляющих команд в процентах от уровня закрытия вентиля V19 при различных режимах управления, демонстрирующие существенное снижение сложности физической реализуемости сил управления.

Несложно заметить, что оператор выставил постоянное значение положения заслонки вентиля, это является самым простым способом управления и, соответственно, позволяет повысить срок службы исполнительного механизма. Напротив, хорошо

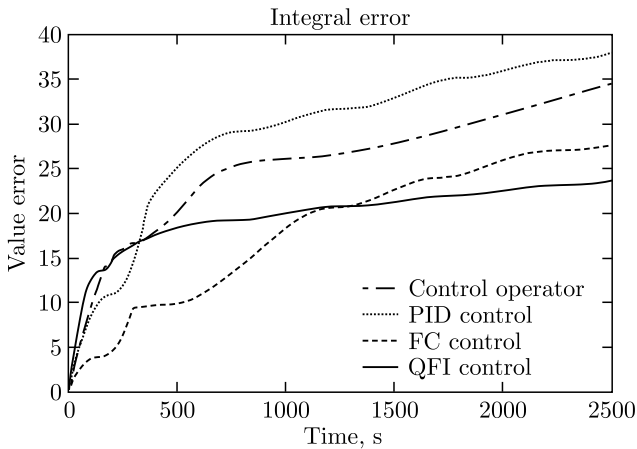


Рис. 11. Оценка качества регуляторов при управлении в режиме азотного охлаждения

видно, что нечеткий регулятор (НР) обладает сложным уровнем управления, что, с одной стороны, улучшает качество управления, а с другой — уменьшает срок службы оборудования. Квантовое управление обладает высоким уровнем качества управления (быстродействие и перерегулирование) и при этом имеет простую реализацию по сравнению с нечеткими регуляторами (рис. 10, *a*), позволяя повысить срок службы и надежность исполнительных механизмов системы.

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

Рис. 11 показывает, что применение нечеткого PID-регулятора с интегрированными БЗ и КР позволяет улучшить достижение заданного уровня давления в накопительной емкости (совершать меньше ошибок).

Более того, с точки зрения расхода полезного ресурса КР и НР уменьшают расход азота более чем на 50% (см. рис. 10), т. е. позволяют сократить количество заправок азотом в 2 раза.

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 сообщающимся сосудам влияет на давление в сборнике. Сложность этого режима заключается в необходимости поддержания заданного давления (для непрерывного охлаждения) и одновременной заправки накопительной емкости.

В этом случае важную роль играет совместное использование вентиляей V19 и 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, причем для одновременного синхронного управления как клапаном V19, так и клапаном подачи азота V20. Для автоматического режима управления V19 были рассмотрены регуляторы PID, НР, КР.

На рис. 12 представлены результаты, иллюстрирующие процесс регулировки давления при заправке азота.

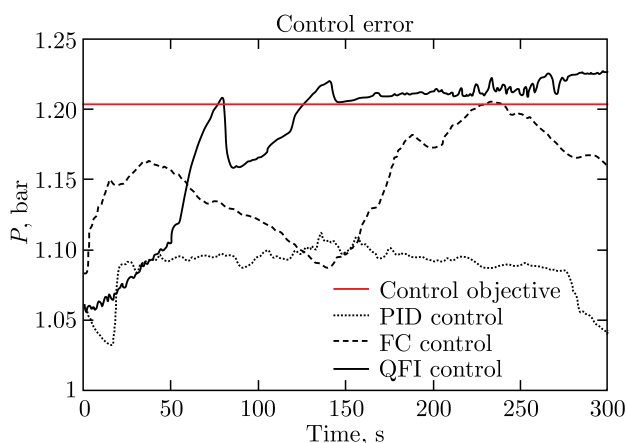


Рис. 12. Давление азота при его заправке в гелиевом режиме охлаждения токовводов и экранов

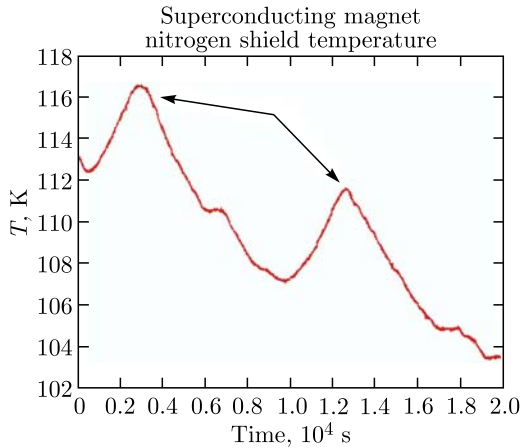


Рис. 13. Температура азотного экрана СП-магнита. Стрелками показан подъем температуры во время заправки

На рис. 13 представлен обобщенный рисунок температуры азотного экрана СП-магнита при управлении с помощью КНВ.

Предварительные результаты на рис. 13 показывают, что отопление СП-магнита в процессе заправки устраивает регламенты испытаний. Автоматическое управление позволяет поддерживать требуемый уровень давления в процессе заправки, что обеспечивает уменьшение отопления магнита и поддержание температуры в заданных диапазонах.

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

Другими словами, интеллектуальное управление на основе КНВ обладает низким уровнем перегулирования, позволяет сократить расход полезного ресурса (азота), увеличить срок службы вентиля и повысить быстродействие всей системы с гарантированным достижением требуемых регламентом проведения тестирования температур.

НЕКОТОРЫЕ ВЫВОДЫ

Дальнейшее развитие информационных технологий проектирования встраиваемых самоорганизующихся систем в рамках межлабораторного сотрудничества предполагает последующую автоматизацию узлов системы охлаждения СП-магнитов на фабрике магнитов. В том числе установка и интеллектуализация вентиля V20 позволит поддерживать требуемое значение давления в сборнике азота криогенной установки, уменьшить рост температуры во время заправки и время охлаждения магнита (см. рис. 12 и 13).

Роль дистанционного управления БЗ в этом примере заключается в передаче встраиваемых БЗ в ИСУ удаленного ОУ. В свою очередь, разработанный в ЛИТ инструментарий 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 принципа проектирования ИСУ).

Проведенные исследования показывают, что применение квантовых и мягких вычислений в задаче управления давлением повышает надежность функционирования системы, уменьшая количество расхода азота. Эти вычисления 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 в разработке встраиваемых квантовых самоорганизующихся интеллектуальных регуляторов для повышения уровня устойчивого функционирования процесса азотного охлаждения СП-магнита с учетом возникновения возможных нештатных ситуаций.

При этом аппаратная реализация квантовых вычислений осуществлена на типовом классическом процессоре, что позволяет осуществлять тиражирование разработанного интеллектуального продукта. Отметим, что, по осведомленности авторов (к сентябрю 2022 г.), мировых аналогов данной разработки не существует, а интеллектуальная собственность авторов закреплена публикациями [1–4, 7–9].

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.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЙ ПРАКТИЧЕСКИЙ РЕЗУЛЬТАТ

В рамках решения поставленной задачи предложена информационная технология для создания распределенной ИСУ на основе встраиваемых в контур управления интеллектуальных квантовых 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 [11], повышая эффективность работы.

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

Разработанный программный инструментарий был протестирован и экспериментально проверен в реальных режимах эксплуатации системы охлаждения СП-магнита в рамках межлабораторного проекта ЛИТ–ЛВФЭ ОИЯИ.

Дальнейшее развитие представленных технологий предполагает их адаптацию к использованию в единой системе управления охлаждения СП-магнитов, включая управление в режиме заправки азота, управление обратным потоком азота из тепловых экранов, управление распределением потоков азота между частью тоководов и тепловыми экранами на вводимом криостате и управление гелиевыми потоками в режиме поддержания сверхпроводимости СП-магнитов.

Разработанная технология может быть тиражирована на квантовое интеллектуальное управление высокочастотными станциями. Особое значение имеет построение на основе изложенного подхода квантовых систем интеллектуального управления настройки оптимальной орбиты пучка в синхротронах ускорительного комплекса NICA.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана система (методология) дистанционного управления с применением квантовых самоорганизующихся регуляторов для гарантированного достижения цели управления, в том числе в непредвиденных и нештатных ситуациях.

В основе квантового интеллектуального управления заложен синергетический эффект формирования робастных квантовых нечетких регуляторов из нечетких регуляторов с базами знаний, не являющимися робастными. При этом сами базы знаний не меняются.

Такой синергетический эффект возможен только с применением технологии квантовых мягких вычислений и классических аналогов не имеет.

Особенностью квантового интеллектуального управления является возможность его реализации на процессоре с классической архитектурой.

Квантовое интеллектуальное управление на основе скрытой квантовой информации, извлекаемой с помощью КНВ из классических состояний траекторий изменения коэффициентов усиления гибридных нечетких PID-регуляторов, позволяет организовать дополнительный информационный ресурс для формирования обобщенного сигнала силы управления и совершить дополнительную полезную работу без нарушения первого и второго законов информационной термодинамики [12].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ульянов С. В., Решетников Г. П.* Технологии интеллектуальных вычислений: Мягкие и дробные вычисления в интеллектуальном управлении: Учебно-метод. пособие. Дубна: ОИЯИ, 2013. 244 с.: ил.
2. *Ульянов С. В., Решетников А. Г., Решетников Г. П.* Технологии интеллектуальных вычислений: Квантовые вычисления и программирование в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления: Учебно-метод. пособие. Дубна: ОИЯИ, 2015. 246 с.: ил.
3. *Бровко О. И. и др.* Необходимость применения интеллектуальных систем управления в экспериментальных ядерно-физических комплексах (типа NICA). Ч. I: Проблема нештатных ситуаций // Системный анализ в науке и образовании: 2019. Электрон. журн. Вып. 4.
4. *Кореньков В. В. и др.* Возможности применения сквозных квантовых информационных технологий в интеллектуальных системах управления слабо формализованными физическими объектами (типа комплекса NICA) // Системный анализ в науке и образовании: 2018. Электрон. журн. Вып. 4.

5. TANGO REST API. <https://tango-controls.readthedocs.io/en/latest/development/advanced/rest-api.html/>.
6. *Sedykh G. S., Gorbachev E. V., Kirichenko A. E., Volkov V. I., Galimov A. R., Nikiforov D. N., Neapolitanskiy D. V., Kosachev V. V., Pivin R. V.* Control System of the Superconducting Magnet Test Bench for the NICA Accelerator Complex // Proc. of the XXVI Intern. Symp. on Nucl. Electronics & Computing (NEC'2017), Becici, Budva, Montenegro, Sept. 25–29, 2017.
7. *Ulyanov S. V. et al.* Soft Computing Optimizer of Intelligent Control System Structures. US Patent No. US 7,219,087 B2. 2007.
8. *Ulyanov S. V.* System for Soft Computing Simulation. US Patent No. US 2006/0218108. 2006.
9. *Ulyanov S. V.* Self-Organizing Quantum Robust Control Methods and Systems for Situations with Uncertainty and Risk. US Patent US 8788450 B2. 2014.
10. The OPC Unified Architecture (UA). <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>.
11. *Fielding R., Taylor R. N.* // Comput. Sci. Proc. of the 2000 Intern. Conf. on Software Engineering: ICSE 2000, The New Millennium. 2000.
12. *Ulyanov S. V.* Quantum Algorithm of Imperfect KB Self-Organization. Pt. I: Smart Control-Information-Thermodynamic Bounds // Artificial Intelligence Advances. 2021. V.3, No.2. P. 13–36; doi: <https://doi.org/10.30564/aia.v3i2.3171>.

Получено 25 октября 2022 г.