

# КВАНТОВОЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДАВЛЕНИЕМ АЗОТА В КРИОГЕННОЙ УСТАНОВКЕ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА ФАБРИКИ МАГНИТОВ

*П. В. Зрелов, Д. Н. Никифоров, А. Г. Решетников\*,  
С. В. Ульянов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Представлены результаты внедрения информационной технологии проектирования встраиваемых интеллектуальных систем управления на основе нечеткой логики, нейронных сетей, генетических и квантовых алгоритмов применительно к задаче стабилизации давления азота в криогенной системе испытательного стенда фабрики магнитов ЛФВЭ ОИЯИ. Представлено описание действующей системы управления со встроенным квантовым регулятором, реализующим координационное управление. На примере режима заправки азота рассматривается структура разработанной интеллектуальной системы управления на основе технологий квантовых и мягких вычислений. Эффективность работы системы продемонстрирована экспериментально.

We present the results of the implementation of information technology for the design of embedded intelligent control systems based on fuzzy logic, neural networks, genetic and quantum algorithms for the problem of nitrogen pressure stabilization in the cryogenic system of the test bench of the JINR VBLHEP magnet factory. A description of the current control system with a built-in quantum controller implementing coordination control is presented. The structure of the developed intelligent control system based on quantum and soft computing technologies is considered on the example of the nitrogen refueling mode. The efficiency of the system is demonstrated experimentally.

PACS: 89.20.Ff; 07.05.Tr

## **ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЙ КВАНТОВОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

Управление давлением азота в криогенной системе требует от операторов быстрого принятия решений в условиях, с одной стороны, избыточности информации о состоянии экспериментального оборудования, а с другой — неполноты описания различных распределенных подсистем

---

\* E-mail: [agreshetnikov@jinr.ru](mailto:agreshetnikov@jinr.ru)

и элементов испытательного стенда фабрики магнитов Лаборатории физики высоких энергий им. В. И. Векслера и А. М. Балдина ОИЯИ. В этом случае физическая модель объекта управления и его математическая модель относятся к так называемым плохо формализованным моделям, а корректное управление динамикой подобных объектов требует привлечения новых методов. В Лаборатории информационных технологий им. М. Г. Мещерякова ОИЯИ для поддержки процесса разработки встраиваемых систем управления осуществляется развитие технологий квантового интеллектуального управления [1] и разработка соответствующего программного инструментария.

### СТАБИЛИЗАЦИЯ ДАВЛЕНИЯ В АЗОТНОМ КОНТУРЕ КРИОГЕННОЙ УСТАНОВКИ

Азотный контур криогенной установки испытательного стенда фабрики магнитов выполняет задачи охлаждения тоководов и тепловых экранов сверхпроводящего (СП) магнита в процессе испытаний. На первом этапе внедрения технологий интеллектуального управления была разработана система, регулирующая давление в азотном контуре [1, 2], однако процесс заправки азота на этом этапе автоматизирован не был. Для автоматизации этого процесса установлен электропневматический вентиль, регулирующий подачу азота, и модернизировано программное обеспечение системы управления.

В свою очередь, сам процесс заправки азота технологически сложен и зачастую может вызывать отепление охлаждаемых элементов. Снизить влияние подобных факторов удалось за счет внедрения нового типа квантового координационного управления.

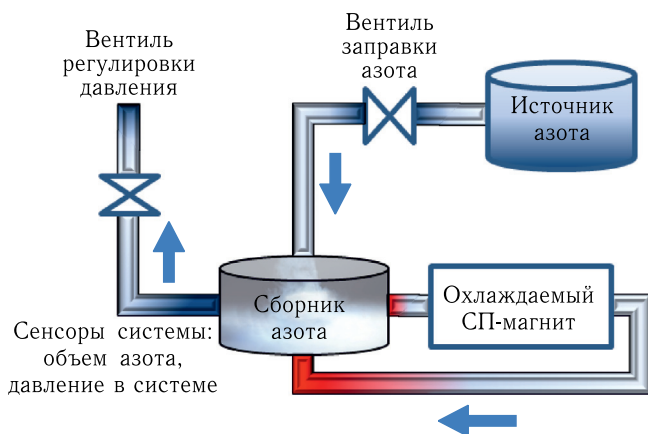


Рис. 1. Структурная схема системы азотного охлаждения СП-магнитов на испытательном стенде

Особенностью одновременного управления процессом заправки и поддержанием заданного значения давления является использование скрытой нелинейной связи между вентилями регулировки давления и вентилем заправки на основе квантовой корреляции в схеме квантового нечеткого вывода.

На рис. 1 представлена упрощенная структурная схема контура азотного охлаждения испытательного стенда. В состав структуры входят: вентиль регулировки давления (сброса), вентиль подачи азота (заправки), сборник азота и охлаждаемый элемент СП-магнита.

Сам технологический процесс заправки азота можно разделить на три этапа. На первом этапе происходит охлаждение канала подачи азота — в систему поступает газообразный азот, давление которого регулируется вентилем заправки при полностью открытом вентиле регулировки давления. На втором этапе при полностью открытом вентиле подачи азота в систему поступает жидкий азот, а задачу стабилизации выполняет вентиль регулировки давления. При достижении установленного уровня азота в сборнике система переходит в завершающую третью стадию, в которой оба вентиля постепенно закрываются.

## **СТРУКТУРА КВАНТОВОЙ КООРДИНАЦИОННОЙ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ**

Основной задачей, решаемой с помощью квантового нечеткого вывода (см., например, [3]), является формирование обобщенного сигнала для управления параметрами ПИД-регуляторов с повышенным уровнем робастности из конечного множества баз знаний (БЗ) [4] нечетких регуляторов [5]. Описание технологии проектирования БЗ с применением мягких вычислений представлено в [6]. На рис. 2 показана структура координационной системы управления азотного контура криогенной установки с применением технологий мягких и квантовых вычислений.

Оптимизированные параметры ПИД-регуляторов формируются за счет применения квантового оператора суперпозиции. Операция суперпозиции позволяет осуществлять логическое объединение различных выходных сигналов нечетких регуляторов и выделять приоритетные корреляции отдельных состояний с применением разнообразных критериев оптимизации (см., например, [3]). Такой подход позволяет в реальном времени реализовать самоорганизующийся процесс формирования робастной БЗ квантового координационного регулятора из БЗ нечетких регуляторов [7].

В качестве примечания нужно отметить, что первоначально такой подход к управлению был апробирован на робототехническом полигоне применительно к механической системе «каретка – перевернутый маятник» со скрытыми нелинейными перекрестными связями между обобщенными координатами (степенями свободы) [7].

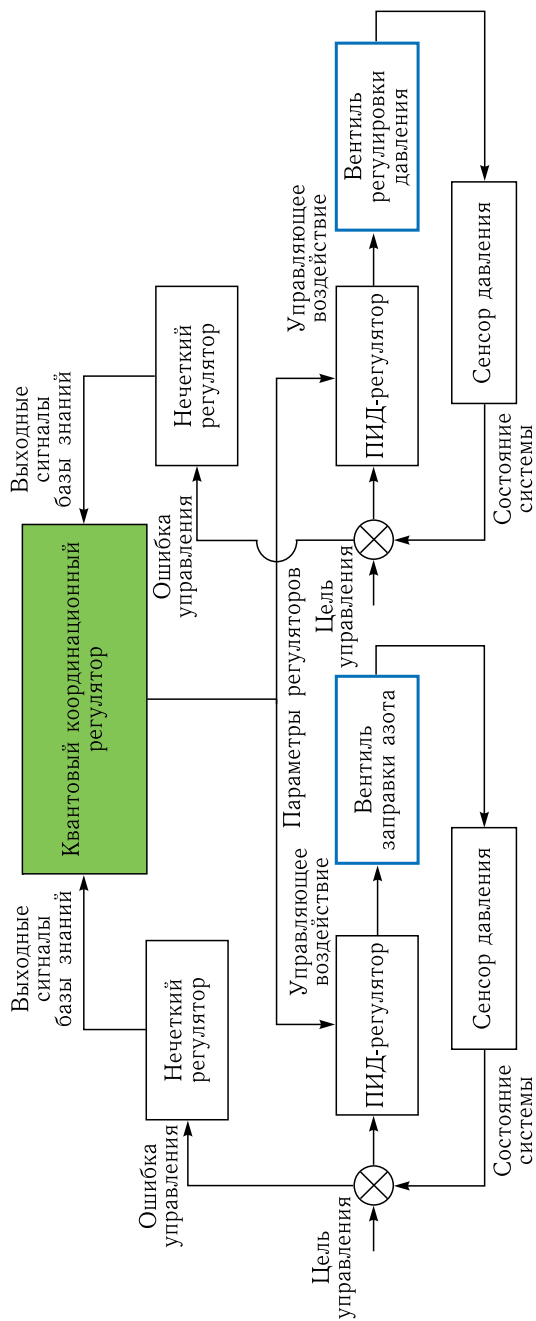


Рис. 2. Структура интеллектуальной системы управления азотного контура испытательного стенда

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ РЕГУЛЯТОРА НА ОСНОВЕ КВАНТОВОГО НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА

В рамках выполненной работы программно-аппаратные решения, реализующие квантовый координационный регулятор, были внедрены в кон-

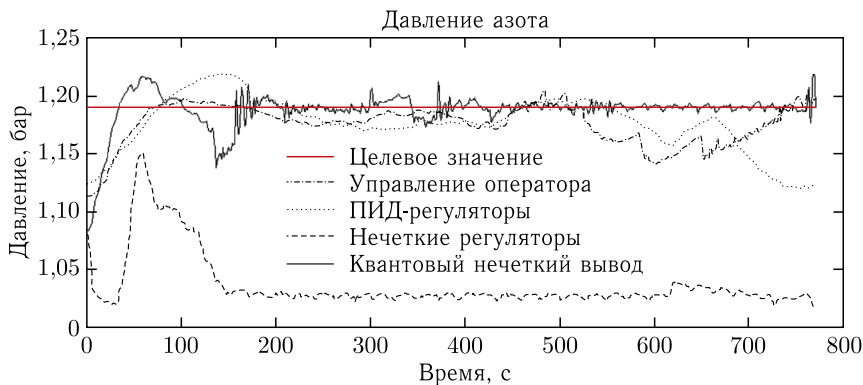


Рис. 3. Динамика давления азота в системе на этапе заправки

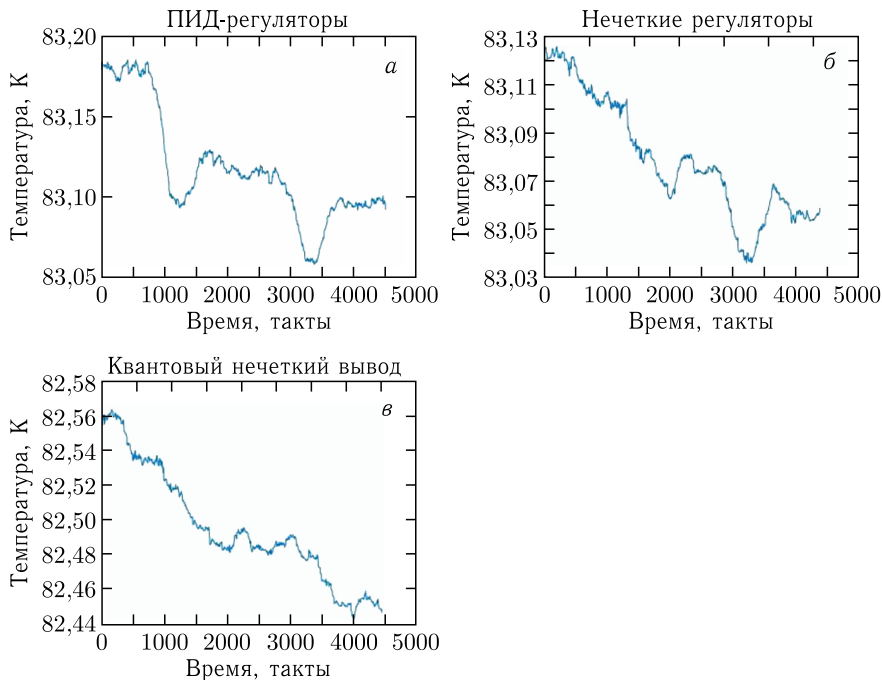


Рис. 4. Температура охлаждаемых элементов на этапе заправки при управлении: а) ПИД-регуляторами; б) нечеткими регуляторами; в) квантовым координационным регулятором

тур управления криогенной установки. В качестве иллюстрации результатов на рис. 3 представлен график изменения давления в системе при управлении: оператором, классическим ПИД-регулятором, нечеткими регуляторами без координационной подстройки, регуляторами с квантовым координационным управлением.

На рис. 4 представлена температура охлаждаемых элементов при различных типах управления.

Из рис. 3 и 4 видно, что при реализации координационного квантового управления «скачки» температуры значительно меньше. Данное обстоятельство показывает эффективность применения технологий интеллектуального управления в подобных системах. Анализ представленных результатов дополнил и усилил результаты работы [1].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

В проведенной работе апробированы все этапы технологии проектирования встраиваемых интеллектуальных систем управления на основе мягких и квантовых вычислений, что позволило:

1) осуществить проектирование оптимальной интеллектуальной системы управления с максимальным уровнем надежности и управляемости сложным объектом управления в условиях неопределенности исходной информации;

2) спроектировать робастную систему управления при отсутствии математической модели системы, используя данные, измеряемые на реальной установке;

3) повысить надежность и эффективность всей системы управления, не изменяя существующий исполнительный уровень управления;

4) осуществить программно-аппаратную реализацию квантового самоорганизующегося регулятора на процессоре с классической архитектурой, делая ее доступной к тиражированию и масштабированию.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бутенко А. В. и др.* Интеллектуальная система дистанционного управления давлением и расходом жидкого азота в криогенной системе сверхпроводящих магнитов: программно-аппаратная платформа // Письма в ЭЧАЯ. 2023. Т. 20, № 2(247). С. 183–199.
2. *Бутенко А. В. и др.* Бустер комплекса NICA: сверхпроводящий синхротрон нового поколения // УФН. 2023. Т. 66, № 3. С. 195–212.
3. *Ульянов С. В., Решетников Г. П.* Технологии интеллектуальных вычислений. Мягкие и дробные вычисления в интеллектуальном управлении: Учебно-метод. пособие. Дубна: ОИЯИ, 2013. С. 244.

4. *Zadeh L. A.* The Concept of a Linguistic Variable and Its Application to Approximate Reasoning. Part I. // *Inform. Sci.* 1976. V. 8, No. 3. P. 199–249.
5. *Mamdani E. H.* Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant // *Proc. of the Inst. of Electrical Engin.* 1974. V. 121, No. 12. P. 1585–1588.
6. *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. С. 246.
7. *Решетников А. Г., Ульянов В. С., Ульянов С. В.* Робастное интеллектуальное управление автономным роботом: квантовая самоорганизация неточных баз знаний — эксперимент // *Изв. РАН. Теория и системы управления.* 2023. № 5. С. 127–146.