

КВАНТОВАЯ ИТ-ИНЖЕНЕРИЯ В ЗАДАЧАХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ ФИЗИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ

*П. В. Зрелов, Д. П. Зрелова, М. С. Катулин, В. В. Кореньков,
А. Г. Решетников, С. В. Ульянов**

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

На конкретных примерах из робототехники и самоорганизующихся квантовых нечетких регуляторов, встроенных в бортовые системы управления, показаны эффективность и преимущество применения интеллектуальных систем управления, использующих мягкие и квантовые вычисления. Обобщены результаты применения технологий на примерах динамически неустойчивого автономного робота и квантового нечеткого регулятора, управляющего давлением азота в криогенной системе охлаждения элементов сверхпроводящего магнита установки NICA. Показана возможность переноса имеющейся технологии на другие объекты управления. Квантовые мягкие вычисления и квантовый нечеткий вывод реализованы на классическом процессоре и смоделированы на суперкомпьютере «Говорун».

On concrete examples from robotics and self-organizing quantum controllers embedded in on-board control systems, the effectiveness and advantage of applying intelligent control systems using soft and quantum computing are shown. The results of the technology application are summarized on the examples of a dynamically unstable autonomous robot and a quantum regulator controlling the nitrogen pressure in the cryogenic cooling system of the superconducting magnet elements of the NICA plant. The possibility of transferring the existing technology to other control objects is shown. Quantum soft computing and quantum fuzzy inference are implemented on a classical processor and modeled on the “Govorun” supercomputer.

PACS: 89.20.Ff; 07.05.Tr

ВВЕДЕНИЕ

По мере увеличения размерности и сложности структур технических систем увеличиваются требования к надежности и точности аппаратного и программного обеспечения систем управления. Программное обеспечение должно гарантировать функционирование системы управления с более высокой степенью качества управления, а именно надежность, эффективность, робастность.

* E-mail: ulyanovsv@jinr.ru

В задачах управления поддержка свойства робастности функционирования сложного слабоструктурированного объекта управления (ОУ) за счет применения интеллектуальной системы управления (ИСУ) и технологий интеллектуальных вычислений необходима для гарантированного достижения цели управления в условиях риска и непредвиденных (или нештатных) ситуаций. С алгоритмической точки зрения эффективное решение актуальной проблемы обеспечения устойчивого функционирования ОУ в условиях неопределенности и сохранения робастности ИСУ означает, что в используемом алгоритме достижения цели управления выполняются следующие необходимые и достаточные условия: 1) минимум исходной информации о внешней среде (или возмущении, действующем на ОУ); 2) минимальный расход обобщенного полезного ресурса в ОУ и ИСУ.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МЯГКИХ И КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В ЗАДАЧЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Одной из основных идей эффективного использования интеллектуальных вычислений в задачах робастного (устойчивого) управления является повышение надежности функционирования за счет построения верхнего (интеллектуального) уровня, управляющего нижним исполнительным уровнем системы автоматического управления (САУ). Решение задачи основано на возможности повышения робастности баз знаний (БЗ) интеллектуальных систем управления с использованием соответствующего программного инструментария. Проведенные исследования показали, что существует достаточно широкая область сохранения робастности БЗ, спроектированных на основе мягких вычислений [1]. При использовании нечетких регуляторов в САУ значительно расширяется их область применения за счет новых свойств в виде обучения и адаптации. Однако в непредвиденных ситуациях, когда ОУ функционирует в резко меняющихся условиях (отказ датчиков, шум в измерительной системе, возникновение задержек сигналов управления или контроля состояния, резкое изменение структуры ОУ и т. п.), робастность подхода теряется.

Одним из возможных решений является использование не одной, а нескольких* БЗ для различных ситуаций управления, а также введение принципа самоорганизации в процесс функционирования БЗ для нечетких регуляторов. Такое решение было реализовано в разработанной модели квантового нечеткого вывода (КНВ) [2] путем применения квантовых и мягких вычислений, реализующих синергетический эффект самоорганизации.

* Минимально достаточное количество равно двум.

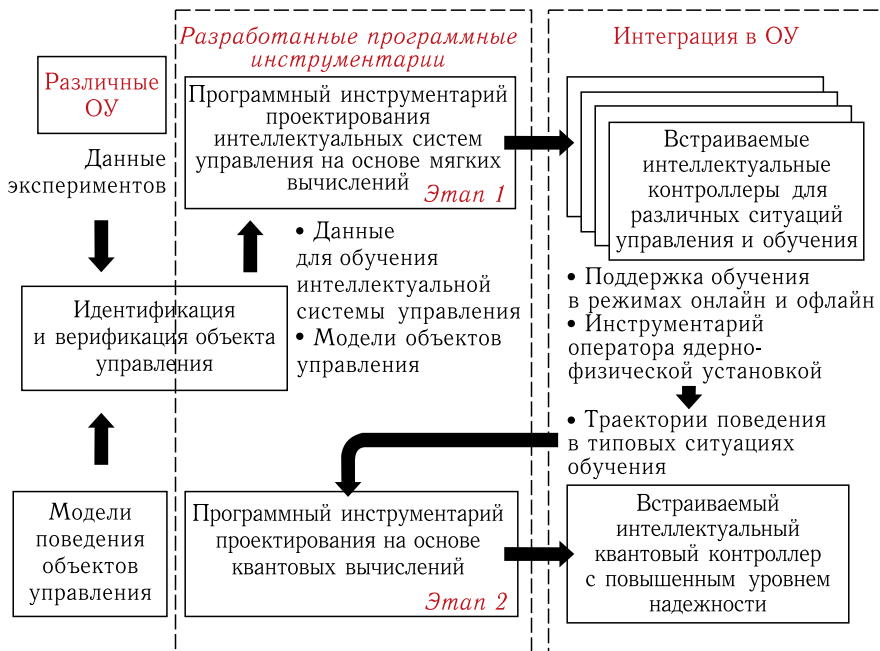


Рис. 1. Структура поэтапной реализации ИСУ

На рис. 1 представлена общая схема проектирования БЗ для нечетких регуляторов. Процесс проектирования робастных БЗ состоит из двух взаимосвязанных этапов, основанных на мягких и квантовых вычислениях соответственно.

На первом этапе формируются индивидуальные БЗ для нечетких регуляторов, функционирующих в условиях различных ситуаций управления. На данном этапе используется эволюционный алгоритм с применением технологии мягких вычислений и нечеткого стохастического моделирования. При этом обеспечивается повторяемость разнообразных режимов работы с требуемым уровнем качества управления. Обучение системы происходит на основе показателей состояния ОУ, зависящих от действий оператора установки и измеряемых в режиме реального времени.

Однако поскольку на этапе проектирования установки этих данных нет, актуальным становится вопрос, на каких данных следует проводить обучение. Ответ на этот вопрос дан в работе [3], в которой разработан встраиваемый эволюционный алгоритм, позволяющий справиться с задачей обучения без использования математической модели установки (которой зачастую просто нет) и без участия оператора. Подбор траектории изменения коэффициентов классического ПИД-регулятора позволяет

добавлять в систему свойства адаптивности и обучаемости без необходимости внесения каких-либо изменений в нижнем (исполнительном) уровне существующей системы управления.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РОБАСТНОГО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ С КНВ

Первоначально технология проектирования разрабатывалась и апробировалась на ряде робототехнических систем [2]. На рис. 2 приведены результаты эксперимента по управлению в непредвиденных ситуациях для ОУ «каретка – двойной перевернутый маятник».

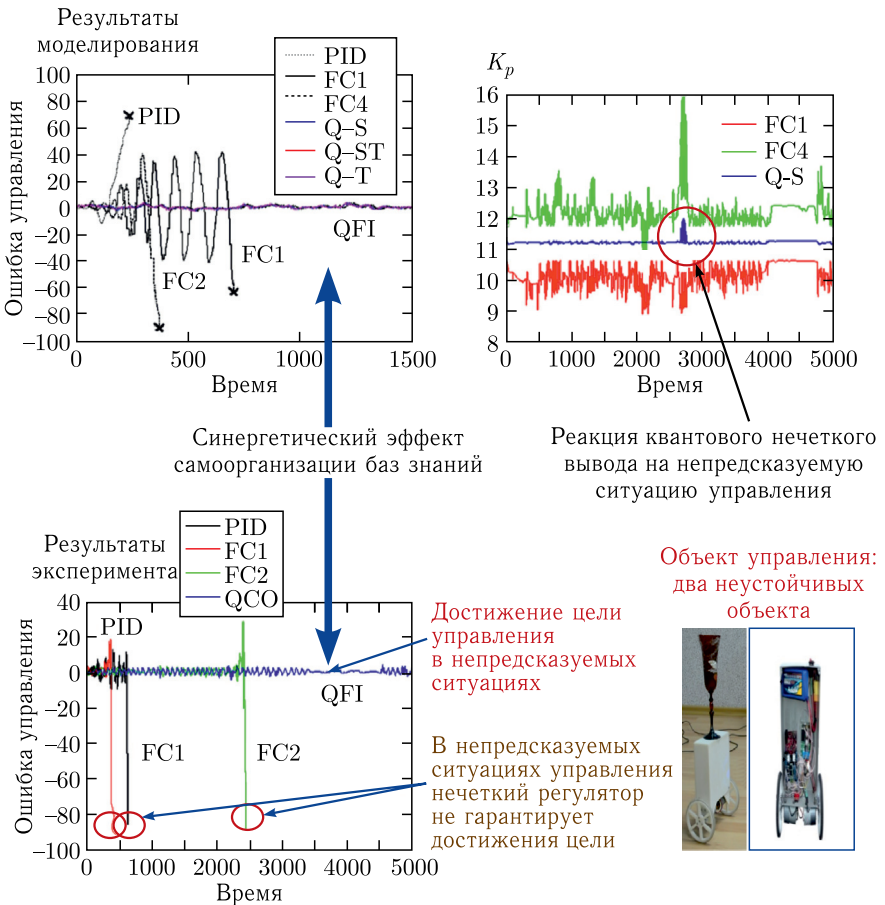


Рис. 2 (цветной в электронной версии). Результаты эксперимента по управлению в непредвиденных ситуациях объектом «каретка – двойной перевернутый маятник»

Сравнивались различные типы регуляторов: ПИД-регулятор с постоянными коэффициентами управления (PID), два нечетких регулятора (FC1, FC2) и три вида КНВ-регулятора (QFI), основанных на различных типах корреляций, а именно квантово-временной (Q-T), квантово-пространственной (Q-S) и квантово-пространственно-временной (Q-ST). Объект управления «каретка – двойной перевернутый маятник» является существенно нелинейным и динамически неустойчивым автономным роботом. В результате продемонстрирована возможность достижения цели управления в непредвиденных ситуациях за счет использования КНВ, основанного на извлечении дополнительной информации из двух БЗ с помощью квантового алгоритма.

В работе [4] на примере управления роботом-манипулятором предложен метод повышения робастности ИСУ, построенной с использованием БЗ одного нечеткого регулятора на основе декомпозиции управления, т. е. разделения одной имеющейся БЗ на несколько независимых и организации координационного управления путем введения квантового нечеткого факторного звена.

Принципы и алгоритмы управления, разработанные в работе [2] для робототехнических систем, были использованы для решения задачи управления уровнем и давлением азота в криогенной установке фабрики сверхпроводящих (СП) магнитов ЛФВЭ ОИЯИ [5]. В работах [5, 6] представлена ИСУ стабилизацией давления в азотной криогенной системе испытательного стенда фабрики магнитов.

На рис. 3 показана упрощенная структурная схема контура азотного охлаждения СП-магнитов на испытательном стенде. На рис. 4 приведены результаты экспериментов (см. [5]) автоматизированного управления вентилем регулировки давления при полностью закрытом вентиле за-

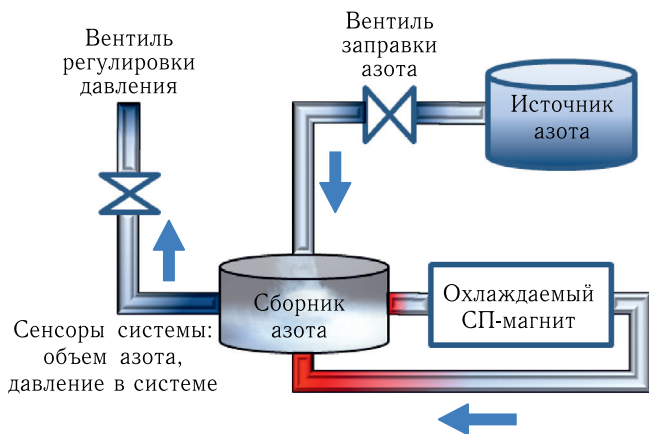


Рис. 3. Структурная схема системы азотного охлаждения СП-магнитов на испытательном стенде

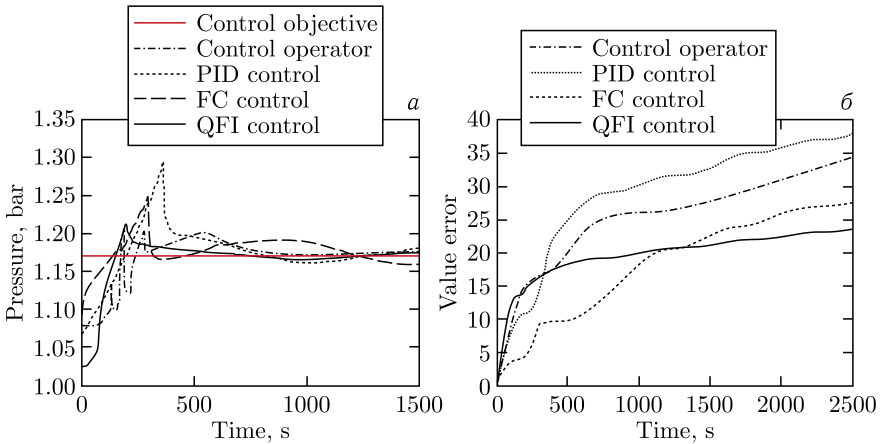


Рис. 4. а) Давление в азотном сборнике при азотном охлаждении; б) интеграл квадратичной ошибки управления (критерий качества)

правки азота. Хорошо видно, что нечеткий регулятор (FC на графике) и квантовый нечеткий регулятор (QFI на графике) демонстрируют высокое быстродействие (время релаксации 210 и 215 с соответственно) при низком уровне перерегулирования (1,24 и 1,21 бар).

В работе [6] представлен новый вид координационного двухканального интеллектуального управления вентилями заправки азота и регулирования давления со скрытой обратной взаимосвязью в технологическом процессе охлаждения СП-магнита. На рис. 5 показан процесс установления целевого значения давления в системе: представлены зависимости давления от времени при управлении процессом различными видами регуляторов (классическим ПИД-регулятором, нечетким регулятором,

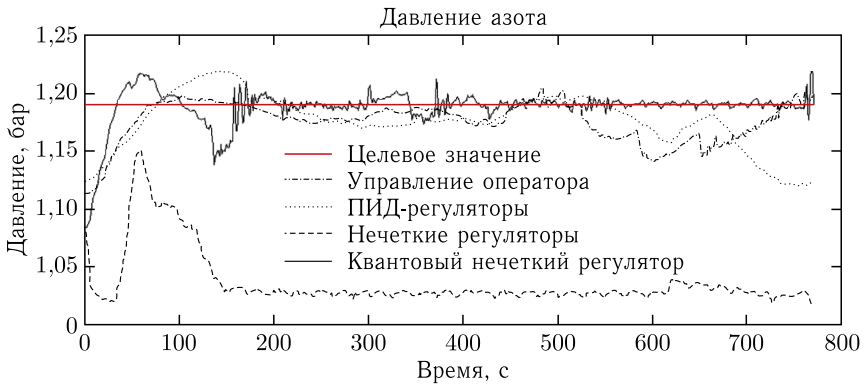


Рис. 5. Динамика установления целевого значения давления в системе в процессе заправки азота

квантовым нечетким регулятором). Анализ представленных данных подтверждает и углубляет результаты работы [5].

Разработанная с использованием технологий мягких и квантовых вычислений ИСУ позволила повысить качество управления и значительно снизить расход азота.

Следующим этапом применения новой технологии на ускорительном комплексе NICA должен стать переход от систем охлаждения отдельных СП-магнитов на испытательном стенде фабрики магнитов к управлению криогенными системами различных компонентов всего ускорительного комплекса NICA. Такой переход требует масштабирования решений с увеличением числа параметров ИСУ и неизбежным при этом увеличением необходимых вычислительных ресурсов.

В работе [7] рассматривается возможность моделирования квантового алгоритма управления для многоконтурной системы управления криогенной установкой бустера ускорительного комплекса NICA, состоящей из двух независимых частей (измерительных плеч), каждая из которых обслуживает магниты одного из полуколец бустера. На рис.6 представлена схема управляющих вентилях криогенной установки одного измерительного плеча. Также в работе [7] показано, что для управления пятью вентилями (Вн2–Вн6) требуется как минимум 10 нечетких регуляторов, каждый из которых формирует три зависящих от времени коэффициента усиления (K_p , K_i и K_d) ПИД-регулятора. Поэтому для квантового интеллектуального регулятора, управляющего потоком азота в измерительном плече бустера, требуется как минимум 30 параметров, кодируемых в виде амплитуд вероятностей состояний кубитов.

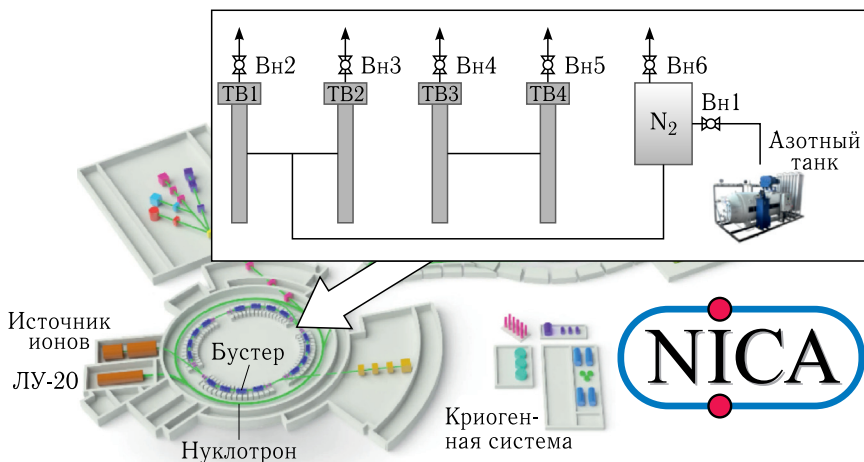


Рис. 6. Азотный контур системы охлаждения тоководов измерительного плеча бустера

Для 30-кубитного КНВ разработана квантовая схема, реализованная на компьютере с классической архитектурой с помощью квантового симулятора PennyLane [8].

ВЫВОДЫ

Реализован процесс проектирования квантовой интеллектуальной системы управления с максимальным уровнем надежности и управляемости сложным объектом в условиях неопределенности исходной информации.

На примерах из робототехники и задачи стабилизации давления азота в криогенной системе испытательного стенда фабрики СП-магнитов ЛФВЭ ОИЯИ показана эффективность использования встроенных ИСУ, основанных на мягких вычислениях, генетических и квантовых алгоритмах. Результаты проведенной работы позволили: а) апробировать все этапы технологии проектирования встраиваемых интеллектуальных систем управления; б) в отсутствие модели системы использовать нейронечеткие системы, обученные на реальных физически измеряемых данных; в) использовать интеллектуальную систему управления в качестве надстройки над уже имеющейся системой управления (например, TANGO [9]), никак ее не меняя, но повышая при этом устойчивость и эффективность работы всей системы.

Новый этап развития технологии квантового интеллектуального управления предполагает значительное увеличение числа входных и выходных параметров. Рассмотрена возможность управления криогенной установкой бустера ускорительного комплекса NICA с помощью квантового интеллектуального регулятора на КНВ, управляющего потоком азота в измерительном плече бустера, с использованием квантовой схемы на 30 кубитах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Litvintseva L. V., Ulyanov I. S., Takahashi K., Ulyanov S. V., Hagiwara T. Soft Computing Optimizer for Intelligent Control System Design: The Structure and Applications // Systemics, Cybernetics and Informatics (USA). 2003. V. 1, No. 5. P. 91–96.
2. Ульянов С. В., Решетников А. Г., Решетников Г. П. Технологии интеллектуальных вычислений. Квантовые вычисления и программирование в самоорганизующихся интеллектуальных системах управления: Учеб.-метод. пособие. Дубна: ОИЯИ, 2015. С. 246.
3. Беспалов Ю. Г., Зрелов П. В., Катулин М. С., Неаполитанский Д. В., Решетников А. Г., Ульянов С. В. Формирование баз знаний нечетких регуляторов на основе физического обучающего сигнала азотной криогенной установки с применением генетического алгоритма // ЭЧАЯ. 2024. Т. 55, вып. 3. С. 669–674.
4. Катулин М. С., Ульянов С. В. Симулятор робастной интеллектуальной системы управления роботом-манипулятором: применение оптимизатора баз знаний на квантовых вычислениях — QCOptKBTM // ЭЧАЯ. 2024. Т. 55, вып. 3. С. 652–657.

5. *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.
6. *Зрелов П. В., Никифоров Д. Н., Решетников А. Г., Ульянов С. В.* Квантовое интеллектуальное управление давлением азота в криогенной установке испытательного стенда фабрики магнитов // ЭЧАЯ. 2024. Т. 55, вып. 3. С. 677–683.
7. *Зрелов П. В., Иванцова О. В., Катулин М. С., Решетников А. Г., Рябов Н. В., Ульянов С. В.* Моделирование квантового нечеткого вывода интеллектуальной системы управления охлаждением тоководов бустера ускорительного комплекса NICA // Там же. С. 684–690.
8. PennyLane. <https://pennylane.ai/> (accessed 22.10.2023).
9. Home — TANGO Controls. <https://www.tango-controls.org/> (accessed 22.10.2023).