

МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВОГО НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ОХЛАЖДЕНИЕМ ТОКОВОДОВ БУСТЕРА УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА NICA

П. В. Зрелов, О. В. Иванцова, М. С. Катулин,
А. Г. Решетников, Н. В. Рябов, С. В. Ульянов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Новый этап применения разработанной ранее технологии квантового интеллектуального управления требует значительного увеличения числа входных параметров. Показана принципиальная возможность реализации 30-кубитного квантового нечеткого вывода на симуляторе с классической архитектурой. Представлена квантовая схема, и приведены результаты работы квантового робастного интеллектуального регулятора, управляющего потоком азота в криогенной системе измерительного плеча бустера ускорительного комплекса NICA.

A new stage in the application of the previously developed quantum intelligent control technology requires a significant increase in the number of input parameters. The fundamental possibility of implementing a 30-qubit quantum fuzzy inference on a simulator with classical architecture is shown. A quantum scheme and the results of the operation of a quantum intelligent regulator for the robust control of the nitrogen flow in the cryogenic system of the booster measuring arm of the NICA accelerator complex are presented.

PACS: 89.20.Ff; 07.05.Tr

ВВЕДЕНИЕ

Развитие технологий проектирования интеллектуальных систем управления (ИСУ) является одной из приоритетных задач автоматизации и требует применения новых подходов и алгоритмов. Один из способов повышения качества управления — применение квантовых алгоритмов, позволяющих сформировать управляющие сигналы с высоким уровнем робастности [1].

В рамках межлабораторного проекта были проведены работы по автоматизации криогенной системы подачи азота на фабрике магнитов в ЛФВЭ ОИЯИ. Разработанная с использованием технологий мягких и квантовых вычислений ИСУ позволила повысить качество управления,

* E-mail: m.katulin@jinr.ru

его робастность и снизить расход азота [2, 3]. Следующим этапом применения новой технологии на ускорительном комплексе NICA должен стать переход от управления криогенными системами отдельных секций сверхпроводящих магнитов на фабрике магнитов к управлению криогенными системами отдельных компонентов, а затем и всего ускорительного комплекса NICA (см., например, [4]). Такой переход требует масштабирования решений с неизбежным увеличением числа параметров ИСУ и, соответственно, увеличением необходимых вычислительных ресурсов. Следует отметить, что внедрение новых технологий управления сохраняет нижний (исполнительный) уровень классического управления, а ИСУ рассматривается как надстройка для уже существующей системы.

В настоящей работе рассматривается возможность моделирования квантового алгоритма управления для сложной многоконтурной системы управления криогенной установкой бустера ускорительного комплекса NICA.

В работе [5] осуществлена оценка предельных возможностей суперкомпьютера «Говорун»* для расчетов с использованием квантовых программных симуляторов. На примерах квантового преобразования Фурье, квантовой оценки фазы и квантового алгоритма Гровера с применением различного класса квантовых схем для симуляторов QuEST, Qiskit и CuQuantum показано, что на суперкомпьютере можно проводить моделирование квантовых схем с 38 кубитами на CPU и 34 кубитами на GPU.

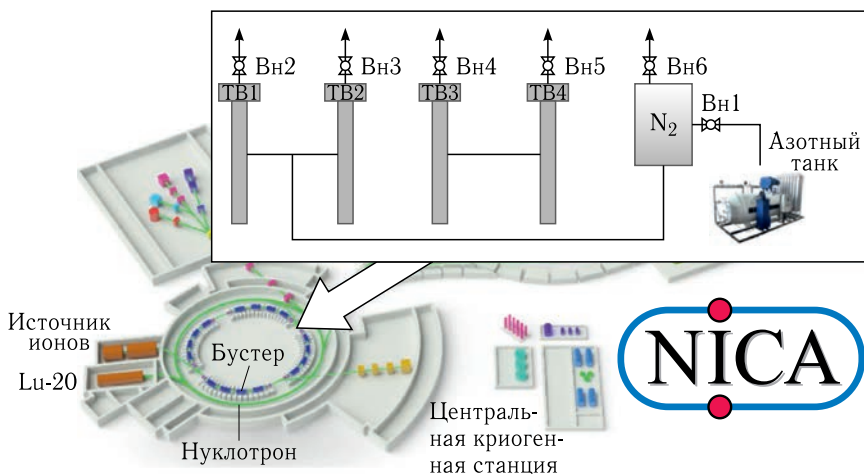


Рис. 1. Азотный контур системы охлаждения тоководов измерительного плеча бустера

*Суперкомпьютер «Говорун» [6]. Гетерогенная платформа «HybriLIT» многофункционального информационно-вычислительного комплекса ЛИТ ОИЯИ [7].

Ниже будет показано, что этих возможностей достаточно для моделирования квантовых алгоритмов, необходимых для построения ИСУ криогенной системой бустера ускорительного комплекса NICA.

Принципиальная структура системы охлаждения тоководов одного измерительного плеча бустера представлена на рис. 1.

Система управления потоком азота для охлаждения тоководов (ТВ1–ТВ4 на схеме рис. 1) измерительного плеча бустера имеет несколько элементов управления: пять автоматических вентилях (Вн1–Вн5) и один ручной (Вн6). Функционально клапан Вн1 отвечает за общий поток приходящего азота, клапаны Вн2–Вн5 — за скорость потока азота в конкретном токовводе.

В настоящее время управление клапанами базируется на ПИД-регуляторах с постоянными коэффициентами. Поскольку работа одного клапана влияет на состояние всех остальных, возникает задача реализации скоординированного управления всеми клапанами одновременно.

ОПИСАНИЕ И КВАНТОВАЯ СХЕМА КНВ

Минимальное количество баз знаний нечетких нейронных сетей для реализации квантового нечеткого вывода (КНВ) равно двум (см. [2]). В ИСУ база знаний является составной частью нечеткого регулятора (НР), таким образом, для управления пятью клапанами (Вн1–Вн5) требуется минимум 10 НР. Поскольку каждый НР выдает 3 коэффициента усиления K_p , K_i и K_d ПИД-регулятора, то для ИСУ, построенной на КНВ, требуется как минимум 30 параметров, кодируемых в виде амплитуд вероятностей состояний кубитов.

В КНВ могут быть реализованы различные типы корреляций — пространственные, временные и пространственно-временные, которые, в свою очередь, могут быть внешними или внутренними. Выбор типа корреляций представляет собой отдельное исследование, на данном этапе были рассмотрены только пространственные корреляции. Схема полученного КНВ и таблица одного из возможных вариантов корреляций представлены на рис. 2.

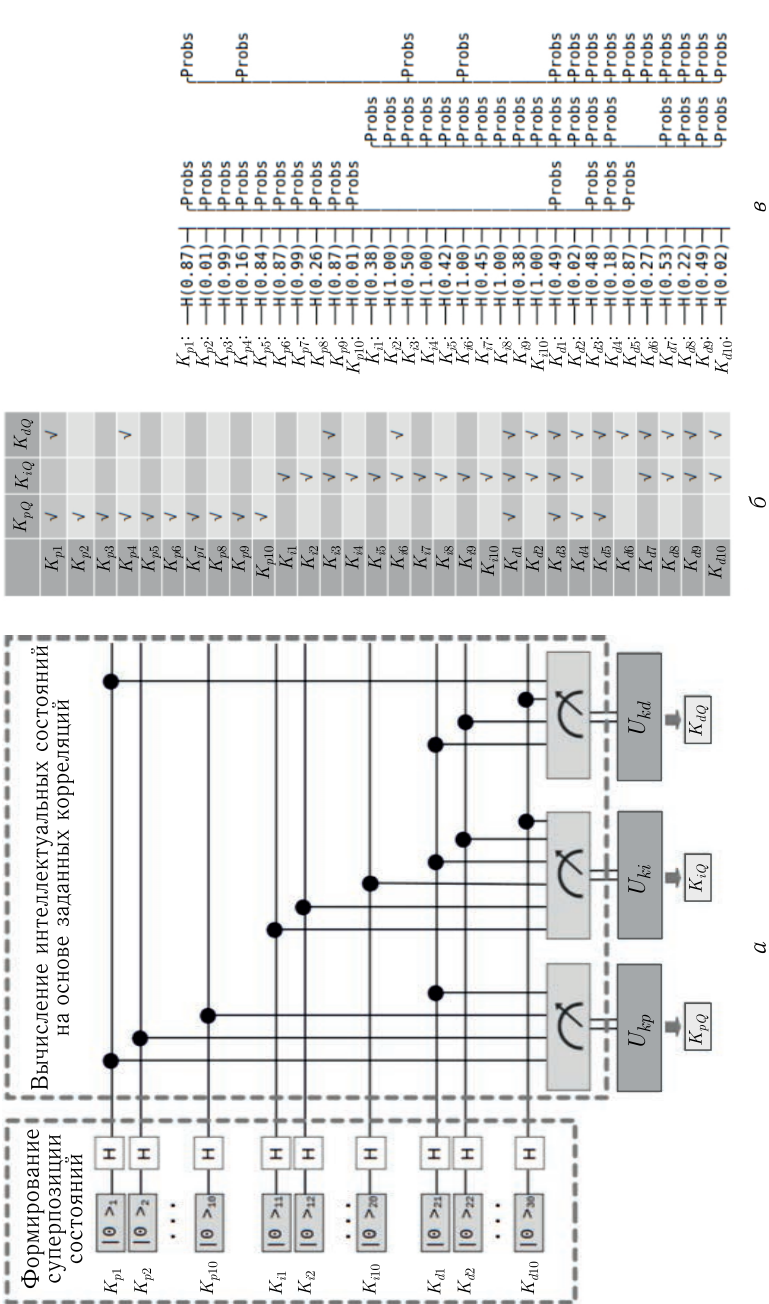
Для формирования суперпозиции применяется обобщенная матрица Адамара (см., например, [8]):

$$H = \begin{pmatrix} \sqrt{p} & \sqrt{1-p} \\ \sqrt{1-p} & -\sqrt{p} \end{pmatrix},$$

где p — вероятность состояния, а \sqrt{p} — амплитуда вероятности.

Амплитуды вероятностей коэффициентов вычисляются на основе гистограмм распределения выходных сигналов каждого НР, представляющих распределения вероятностей для каждого из входных параметров.

Процесс работы квантовой схемы завершается измерением значений кубитов, в результате чего выбирается состояние корреляционных групп



	K_{pQ}	K_{aQ}	K_{dQ}
K_{p1}	✓		✓
K_{p2}	✓		
K_{p3}	✓		
K_{p4}	✓		✓
K_{p5}	✓		
K_{p6}	✓		
K_{p7}	✓		
K_{p8}	✓		
K_{p9}	✓		
K_{p10}	✓		
K_{a1}		✓	
K_{a2}		✓	
K_{a3}		✓	
K_{a4}		✓	
K_{a5}		✓	
K_{a6}		✓	
K_{a7}		✓	
K_{a8}		✓	
K_{a9}		✓	
K_{a10}		✓	
K_{d1}	✓		✓
K_{d2}	✓		✓
K_{d3}	✓		✓
K_{d4}	✓		✓
K_{d5}	✓		✓
K_{d6}	✓		✓
K_{d7}	✓		✓
K_{d8}	✓		✓
K_{d9}	✓		✓
K_{d10}	✓		✓

K_{p11}	H(0.87)
K_{p2}	H(0.01)
K_{p3}	H(0.99)
K_{p4}	H(0.16)
K_{p5}	H(0.84)
K_{p6}	H(0.87)
K_{p7}	H(0.99)
K_{p8}	H(0.26)
K_{p9}	H(0.87)
K_{p10}	H(0.01)
K_{a1}	H(0.38)
K_{a2}	H(1.00)
K_{a3}	H(0.50)
K_{a4}	H(1.00)
K_{a5}	H(0.42)
K_{a6}	H(1.00)
K_{a7}	H(0.45)
K_{a8}	H(1.00)
K_{a9}	H(0.38)
K_{a10}	H(1.00)
K_{d1}	H(0.49)
K_{d2}	H(0.02)
K_{d3}	H(0.92)
K_{d4}	H(0.48)
K_{d5}	H(0.18)
K_{d6}	H(0.87)
K_{d7}	H(0.27)
K_{d8}	H(0.53)
K_{d9}	H(0.22)
K_{d10}	H(0.49)
K_{d11}	H(0.02)

а б

Рис. 2. а) Схема работы квантовой схемы КНВ; б) таблица корреляций; в) визуализация работы квантовой схемы инструментами симулятора PennyLane на входных данных из обучающего сигнала

кубитов с максимальной амплитудой вероятности. Выходное значение определяется как нормированный модуль вектора состояния:

$$K_Q = U(|\psi\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sqrt{\langle a_1 \dots a_n | a_1 \dots a_n \rangle},$$

где a_i — реальное или виртуальное значение соответствующего входа [1], а n зависит от числа выбранных корреляций.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

В качестве квантового симулятора был выбран программный пакет PennyLane [9]. Для проверки работоспособности модели КНВ было выполнено моделирование работы ИСУ, для которого в качестве исходных данных были взяты наборы коэффициентов K_p , K_i и K_d , полученные от разных НР криогенной системы на фабрике магнитов.

Значения выходов для пропорционального коэффициента K_p приведены на рис. 3 (для лучшей читаемости представлены 5 коэффициентов из 10).

Результатирующие сигналы, являющиеся переменными коэффициентами управляющего ПИД-регулятора, имеют вид, представленный на рис. 4.

Зависимости, представленные на рис. 3 и 4, демонстрируют, что применение КНВ осуществляет редукцию избыточности информации в сигналах управления (как выходных сигналов НР) и снижает сложность реализации квантовых нечетких регуляторов.

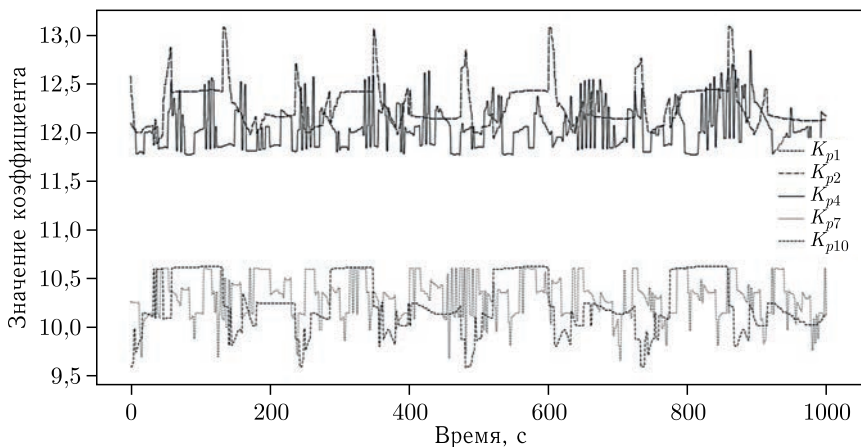


Рис. 3. Значения пропорционального коэффициента, полученные из НР и передаваемые в КНВ (на примере коэффициентов K_p)

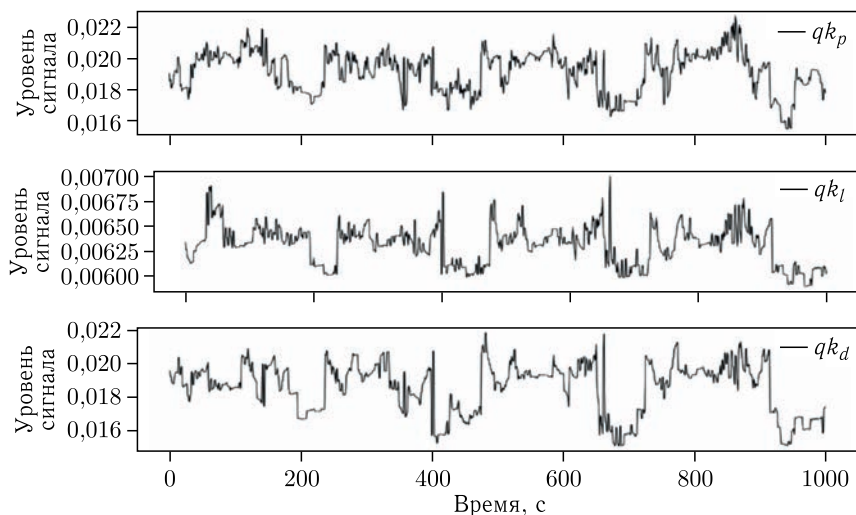


Рис. 4. Выходные значения КНВ для управления одним измерительным плечом бустера

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрированы результаты применения квантового симулятора на 30 кубитах, которых достаточно для создания квантового интеллектуального регулятора на КНВ, управляющего протоком азота в измерительном плече бустера.

Показана принципиальная вычислительная возможность применения компьютеров с классической архитектурой для реализации 30-кубитного КНВ на квантовом симуляторе на примере симулятора PennyLane.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванцова О. В., Кореньков В. В., Ульянов С. В. Технологии интеллектуальных вычислений. Ч. 2. Квантовые вычисления и алгоритмы. Квантовый алгоритм самоорганизации. Квантовый нечеткий вывод: Учебно-метод. пособие. М.: Курс, 2020.
2. Бутенко А. В., Зрелов П. В., Кореньков В. В., Костромин С. А., Никифоров Д. Н., Решетников А. Г., Семашко С. В., Трубкинов Г. В., Ульянов С. В. 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.
3. 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.
4. Бутенко А. В., Бровка О. И., Галимов А. Р., Горбачев Е. В., Костромин С. А., Карпинский В. Н., Мешков И. Н., Мончинский В. А., Сидорин А. О., Сыре-

син Е. М., Трубников Г. В., Тузиков А. В., Филиппов А. В., Ходжибагиян Г. Г. Бустер комплекса NICA: сверхпроводящий синхротрон нового поколения // УФН. 2023. Т. 193. С. 206–225.

5. Зрелов П. В., Иванцова О. В., Кореньков В. В., Рябов Н. В., Ульянов С. В. Оценка возможностей классических компьютеров при реализации симуляторов квантовых алгоритмов // Программные продукты и системы. 2022. № 4. С. 618–630; doi: 10.15827/0236-235X.140.618-630.
6. Adam Gh., Bashashin M., Belyakov D. et al. IT-Ecosystem of the HybriLIT Heterogeneous Platform for High-Performance Computing and Training of IT-Specialists // Selected Papers of the 8th Intern. Conf. “Distributed Computing and Grid-Technologies in Science and Education” (GRID 2018), Dubna, 2018. V. 2267. P. 638–644.
7. Alexandrov E. I., Belyakov D. V., Matveyev M. A. et al. Research of Acceleration Calculations in Solving Scientific Problems on the Heterogeneous Cluster HybriLIT // RUDN J. Math., Inform. Sci. Phys. 2015. V. 4. P. 30–37.
8. Maitra A., Parashar P. Hadamard Type Operations for Qubits // Phys. Appl. Math. Unit. 2005. arXiv:quant-ph/0505068v1.
9. PennyLane. Available at: <https://pennylane.ai/> (accessed 22.10.2023).