

ОТЗЫВ

научного руководителя на диссертацию **Пичковского Ивана Сергеевича** «Решение оптимизационных задач методом квантового отжига на системе спинов с $S=1$ », представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Современная наука перешла от наблюдения за динамикой спиновых систем к управлению этой динамикой. Так в современных импульсных методах ЯМР с помощью последовательности мощных импульсов радиочастотного (РЧ) магнитного поля исходный гамильтониан внутренних взаимодействий системы превращают в новый эффективный гамильтониан, позволяющий извлекать ранее недоступную информацию о внутренних процессах в системе. Но не только. Этим методом можно осуществлять решение логических задач (например, оптимизационных), как это предполагается делать на квантовом компьютере. Например, закодировав нужное решение в основном состоянии эффективного гамильтониана и произведя квантовый отжиг (или адиабатическое квантовое вычисление (АКВ)). К решению таких задач проявляется большой интерес ввиду их практической значимости. Основная масса работ направлена на управление системами со спинами $S=1/2$ (кубитами), хотя у систем с $S=1$ (кутритов) имеется ряд достоинств, в первую очередь более быстрый рост вычислительного базиса (пространства Гильберта) при увеличении числа базовых элементов. Однако таким системам уделено недостаточно внимания. Поэтому целью диссертационной работы И.С. Пичковского было выбрано развитие теории управления системой спинов $S=1$ для решения оптимизационных задач методом квантового отжига. Взята система спинов в магнитном и кристаллическом полях с неэквидистантным энергетическим спектром, который позволяет индивидуально управлять состоянием спинов системы с помощью селективных по переходам импульсов высокочастотных электромагнитных полей. Поскольку управление реальными квантовыми системами сталкивается с большими техническими трудностями, то в качестве метода исследования был предложен метод моделирования на ЭВМ.

И.С. Пичковский справился с поставленной задачей. В его диссертации проработаны все этапы теории управления: выведены эффективные гамильтонианы, найдены последовательности селективных операторов поворота, рассчитаны последовательности РЧ импульсов и интервалов свободной эволюции, выполнено численное моделирование. Теория позволила решить методом квантового отжига на системе спинов $S=1$ оптимизационные задачи разного типа: факторизацию чисел, ассоциативную память и кластеризацию данных. Продемонстрирована успешная работа АКВ на кутритах и были получены следующие важные результаты: Для задачи факторизации в представлении искомым чисел через спиновые проекции двоичная система счисления, используемая для кубитов, заменена для кутритов на симметричную троичную систему счисления. Для задачи ассоциативной памяти предложен способ выравни-

вания амплитуд запомненных состояний с помощью вспомогательного гамильтониана без привлечения дополнительных кубитов и продемонстрировано существенное увеличение емкости памяти нейронной сети Хопфилда при переходе от кубитов к кутритам. Показано, что система из 5 спинов $S=1$ в магнитных и кристаллических полях, управляемая селективными РЧ импульсами магнитного поля, резонансными к выбранным переходам между соседними энергетическими уровнями, может выступать в качестве модельного квантового процессора. На нем выполнено моделирование кластеризации методом квантового отжига множества из шести точек на три группы и исследована зависимость ошибки от физических параметров. Полученные результаты необходимы при переходе к экспериментальной реализации АКВ на кутритах. Они могут быть полезными не только при индивидуальном управлении квадрупольными ядрами со спинами $S=1$, но и другими многоуровневыми системами. Исследования выполнены на высоком научном уровне, о чем свидетельствует, в частности, представление их результатов в международных журналах и на международных научных конференциях.

Диссертация И.С. Пичковского является оригинальной работой, внесшей существенный вклад в развитие теории управления кутритами, представленными спинами с $S=1$. В процессе работы над диссертацией автор разобрался в физике явления, продемонстрировал умение составлять программы численных экспериментов и анализировать их результаты, выполнил аналитические оценки, необходимые при анализе результатов. Диссертант проявил активное, заинтересованное отношение к научной работе и упорство в достижении цели. Все это свидетельствует о том, что он стал высококвалифицированным специалистом, способным решать на современном уровне актуальные задачи физики магнитных явлений. Считаю, что диссертационная работа полностью удовлетворяет требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор - Пичковский Иван Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. Физика магнитных явлений.

Главный научный сотрудник лаборатории
радиоспектроскопии и спиновой электроники
Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН
- обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН,
доктор физ.-мат. наук по специальности
01.04.07 – физика твердого тела,
старший научный сотрудник

В. Е. Зобов

Ученый секретарь
Института физики им. Л.В. Киренского СО РАН
- обособленного подразделения ФИЦ КНЦ СО РАН,
кандидат физ.-мат. наук



А.О. Злотников

16 сентября 2024 г.