

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., профессора Фельдмана Эдуарда Бенъяминовича на диссертацию Пичковского Ивана Сергеевича «Решение оптимизационных задач методом квантового отжига на системе спинов с $S = 1$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. физика магнитных явлений

Изучение квантовых компьютеров, квантовых вычислений, квантовых нейронных сетей и квантового машинного обучения, начавшееся в конце прошлого века, стало одним из основных направлений современных научных исследований. Это направление тесно связано с миниатюризацией элементной базы микроэлектроники, что привело к необходимости использования квантовой механики для понимания работы микроэлектронных устройств. Отметим также возникновение и развитие квантовых алгоритмов, позволяющих эффективно решать проблемы факторизации, кластеризации и ассоциативной памяти. Подавляющее большинство таких алгоритмов основано на использовании кубитов (квантовых битов), описываемых двухуровневыми квантово-механическими системами. Такие алгоритмы реализуются с помощью систем спинов $S=1/2$, управление которыми производится с помощью различных импульсных воздействий.

Диссертационное исследование Пичковского Ивана Сергеевича посвящено решению квантовых оптимизационных задач на кутритах - системах спинов с $S = 1$. Актуальность данного исследования не вызывает вопросов, так как моделируются важнейшие алгоритмы факторизации, кластеризации и ассоциативной памяти. Отметим, что за исследование работы ассоциативной памяти (модель Хопфилда) в 2024 году присуждена Нобелевская премия по физике.

Работа представляет собой логическое продолжение и дополнение систематических исследований, проводимых в ФИЦ КНЦ СО РАН в группе д.ф.-м.н. В.Е. Зобова в области теории управления методом ЯМР квадрупольными ядрами для решения квантовых информационных задач на кудитных системах. Исследования этой группы широко известны в России и за рубежом.

Вх. № 287-03/6224/128
от 15.11.2024 г.

Диссертационная работа, изложенная на 144 страницах, состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, а также содержит 30 рисунков, 6 таблиц, 147 библиографических ссылок.

Во *введении* исчерпывающе обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, а также основные положения, выносимые на защиту, описан личный вклад соискателя, показана научная новизна проведенных исследований и очерчена их практическая и теоретическая ценность.

В *первой главе*, носящей обзорный характер, определяются основные понятия адиабатических квантовых вычислений (АКА) и квантового отжига (КО), которые далее используются для решения основных задач диссертационной работы.

Во *второй главе* диссертации приведен подробный вывод эффективных гамильтонианов для системы спинов $S = 1$ (кутритов) для решения задач факторизации, ассоциативной памяти и кластеризации. Автор использует оригинальные подходы для получения выражений для этих гамильтонианов.

Третья глава диссертационной работы посвящена развитию теории управления кутритами с помощью селективных операторов поворотов для получения эффективных гамильтонианов для задачи факторизации числа 15 на основе трехкудитной системы и задачи кластеризации на основе пятикутитной системы, когда кутриты связаны диполь-дипольным взаимодействием. Хотя диссертант использовал известный метод решения, его применение к рассмотренным задачам потребовало изобретательности и владения тонкостями спиновой динамики. Отметим также проведенное в этой главе исследование зависимости точности проведенной факторизации от длительности выполнения алгоритма.

В *четвертой главе* работы рассмотрено управление модельным квантовым процессором на пяти кутритах, полученных на основе спинов $S = 1$ в магнитном и кристаллическом полях. Изученная система может рассматриваться как простейшая модель квантового компьютера на кутритах. Как и в предыдущей главе, здесь подробно исследуется точность полученного решения в задаче кластеризации от длительности шага дискретного времени и от количества шагов квантового отжига.

В *заключении* сформулированы основные выводы диссертационной работы.

Основные результаты работы опубликованы в четырех статьях в известных международных и отечественных журналах. Автор выступал на международных научных конференциях с устными докладами, что подтверждает достоверность и обоснованность полученных результатов.

Диссертация достаточно хорошо оформлена, написана ясным языком, схемы и рисунки адекватно иллюстрируют изложенный материал. Автор продемонстрировал высокий уровень подготовки по теоретическим методам спиновой динамики и квантовой информатике.

Представленная работа носит самостоятельный законченный характер и вносит важный вклад в развитие методов квантовых вычислений на системах взаимодействующих кубитов. Разработанные диссертантом методы реализации алгоритмов факторизации, кластеризации и ассоциативной памяти будут широко использоваться специалистами в области квантовых информатики. Личный вклад Пичковского И.С. в диссертационную работу является определяющим. Новизна работы не вызывает сомнений.

Аннотация правильно и полно отражает содержание диссертации.

Рецензируемая работа не имеет существенных недостатков, которые могли бы препятствовать ее успешной защите, однако, разумеется, диссертация содержит некоторое количество неточностей и опечаток. Перечислим некоторые из них:

1. В выводах диссертации автору не удалось кратко и четко сформулировать основные результаты, полученные в диссертационной работе.
2. В диссертации не обозначены перспективы использования квантовых систем для развития квантовых вычислений и обработки квантовой информации.
3. При описании спиновых взаимодействий, используемых для решения задач диссертации, zz -гамильтониан назван гамильтонианом диполь-дипольных взаимодействий (см., например, формулу (18) в аннотации).
4. В диссертации имеется небольшое количество грамматических ошибок.

Разумеется, указанные недостатки не являются принципиальными, не снижают ценности выполненного научного исследования и не уменьшают общего благоприятного впечатления.

Результаты работы могут быть использованы в организациях, в которых проводятся исследования в области квантовых вычислений и квантовой информатики, таких как Физико-технологический институт РАН

им. К.А. Валиева, Институт физики полупроводников СО РАН им. А.В. Ржанова, ФИЦ проблем химической физики и медицинской химии РАН, Институт "Международный томографический центр" СО РАН, ФИЦ "Казанский научный центр" РАН и др.

Заключение по диссертационной работе

На основании вышеизложенного можно заключить, что диссертационная работа Пичковского Ивана Сергеевича «Решение оптимизационных задач методом квантового отжига на системе спинов с $S = 1$ » по актуальности темы, научной новизне, практической значимости полученных результатов, обоснованности сделанных выводов и уровню исполнения является логически законченным исследованием, содержащим решение важной научной задачи, и соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, в том числе п. 9 "Положения о порядке присуждения ученых степеней", утвержденного Постановлением № 842 Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года (с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении ученых степеней»). Автор работы, Пичковский Иван Сергеевич, заслуживает присуждения ему искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. физика магнитных явлений.

13.11.2024 г.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией спиновой динамики и спинового компьютеринга
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и
медицинской химии Российской академии наук (ФИЦ ПХФ и МХ РАН),
доктор физ.-мат. наук, профессор

Фельдман Эдуард Бенъяминович



Подпись Фельдмана Э.Б. заверяю,
ученый секретарь ФИЦ ПХФ и МХ РАН,
доктор химических наук Б.Л. Психа



М.П.

Сведения об официальном оппоненте

по диссертации Пичковского Ивана Сергеевича «Решение оптимизационных задач методом квантового отжига на системе спинов с $S = 1$ », представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.12. физика магнитных явлений

Фамилия, имя, отчество: Фельдман Эдуард Беньяминович.

Ученая степень и шифр специальности: доктор физико-математических наук, 01.04.17 Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества.

Ученое звание: профессор.

E-mail: efeldman@icp.ac.ru

Тел.: +7 9017646546

Основное место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр проблем химической физики и медицинской химии Российской академии наук.

Краткое наименование: ФИЦ ПХФ и МХ РАН

Адрес: 142432, Московская обл., г. Черноголовка, проспект академика Семенова, д. 1.

Должность: Заведующий лабораторией.

Подразделение: Лаборатория спиновой динамики и спинового компьютеринга.

Список публикаций по теме диссертации за последние пять лет (2020–2024 г.):

1. S.I. Doronin, E.B. Fel'dman, A.I. Zenchuk, Solving systems of linear algebraic linear equations via unitary transformations on quantum processor of IBM Quantum Experience // Quantum information processing 19, 68 (2020).
2. G.A. Bochkin, S.I. Doronin, E.B. Fel'dman, A.I. Zenchuk, Calculation of π on the IBM quantum computer and the accuracy of one-qubit operations // Quantum information processing 19, 257 (2020).
3. S.I. Doronin, E.B. Fel'dman, I.D. Lazarev, Multiple quantum NMR in solids as a method of determination of Wigner-Yanase quantum information // Physics Letters A 406, 127458 (2021).

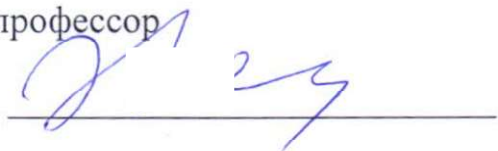
4. S.I. Doronin, E.B. Fel'dman, E.I. Kuznetsova, A.I. Zenchuk, Simulations of multiple-quantum NMR dynamics of spin dimer on quantum computer // Applied magnetic resonance 53, 1121-1131 (2022).
5. A.V. Borodulina, A.R. Melnikov, G.A. Bochkin, M.V. Fedin, E.B. Fel'dman, S.L. Veber, Calculation of π using a molecular electron spin qubit implemented by pulsed electron paramagnetic resonance // J. Phys. Chem. Lett. 15, 8026-8031 (2024).
6. E.B. Fel'dman, A.N. Pechen', A.I. Zenchuk, Optimal remote restoring of quantum states in communication lines via local magnetic field // Physical Scripta 99, 025112 (2024).

13.11.2024 г.

Официальный оппонент:

Заведующий лабораторией спиновой динамики и спинового компьютеринга
ФИЦ ПХФ и МХ РАН, доктор физ.-мат. наук, профессор

Фельдман Эдуард Беньяминович



Подпись Фельдмана Э.Б. заверяю,
ученый секретарь ФИЦ ПХФ и МХ РАН,
доктор химических наук Б.Л. Психа



М.П.