

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«ЮЖНЫЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»  
Инженерно-технологическая академия

**В. Ф. ГУЗИК, С. М. ГУШАНСКИЙ  
Е. В. ЛЯПУНЦОВА, В. С. ПОТАПОВ**

# **ОСНОВЫ ТЕОРИИ ПОСТРОЕНИЯ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ**

*Монография*

Москва – Ростов-на-Дону – Таганрог  
Физматлит – Издательство Южного федерального университета  
2019

УДК 004.38

ББК 32.973

Г753

*Печатается по решению экспертной группы комитета по инженерному направлению науки и образования при ученом совете Южного федерального университета (протокол № 7 от 17 апреля 2019 г.)*

**Рецензенты:**

доктор физико-математических наук, профессор *Г. В. Куповых*  
доктор технических наук, профессор *В. И. Божич*

**Гузик, В. Ф.**

Г753 Основы теории построения квантовых компьютеров и моделирование квантовых алгоритмов : монография / В. Ф. Гузик, С. М. Гушанский, Е. В. Ляпунцова, В.С. Потапов. — Москва : Физматлит ; Ростов-на-Дону — Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2019. — 287 с.

ISBN 978-5-9221-1792-0 (Издательство Физматлит)

ISBN 978-5-9275-3232-2 (Издательство ЮФУ)

Монография посвящена основам теории построения квантовых компьютеров. В ней рассмотрены физико-технические принципы построения современных квантовых вычислителей. Приводится описание разработанных симуляторов квантовых вычислительных устройств. Описана разработанная открытая архитектура модели квантового вычислителя. Рассмотрена реализация широкого плана квантовых алгоритмов, предназначенных для реализации самых разнообразных задач науки и техники. Книга может быть полезна специалистам, работающим в области информационных технологий и вычислительной техники, а также студентам и аспирантам, обучающимся по этим специальностям.

Работа выполнена в рамках проектной части госзадания Минобрнауки России № 2.3928.2017/4.6, кафедры вычислительной техники Института компьютерных технологий и информационной безопасности Южного федерального университета.

УДК 004.38

ББК 32.973

ISBN 978-5-9221-1792-0 (Издательство Физматлит)

ISBN 978-5-9275-3232-2 (Издательство ЮФУ)

© Физматлит, 2019

© Гузик В. Ф., Гушанский С. М.,  
Ляпунцова Е. В., Потапов В. С., 2019

© Оформление. Макет. Издательство  
Южного федерального университета, 2019

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ .....	7
ВВЕДЕНИЕ .....	9
1. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ И МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ СКВ, АКТУАЛЬНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ИХ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ..	30
1.1. Основные понятия квантовой теории информации .....	30
1.2. Формализм квантовых вычислений .....	33
1.3. Квантовые алгоритмы .....	42
1.4. Квантовая запутанность и ее меры .....	47
2. ФИЗИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ КВУ .....	59
2.1. Использование низлежащих энергетических уровней ионов, захваченных ионными ловушками, созданных в вакууме с помощью электрических и магнитных полей определенной конфигурации, при лазерном охлаждении ионов до микрокельвиновых температур .....	59
2.2. Ядерные спины с $I = 1/2$ и метод ядерно-магнитного резонанса (ЯМР) .....	60
2.3. Использование двух спиновых или орбитальных электронных состояний в квантовых точках .....	63
2.4. Квантовый вычислитель на жидком гелии .....	64
2.5. Квантовый вычислитель на электронных волнах .....	66
2.6. Ионный кристалл как квантовый вычислитель .....	66
2.7. Квантовый вычислитель в алмазе .....	67
2.8. Использование квантовых электродинамических полостей и фотонных кристаллов .....	68
2.9. Квантовый компьютер на основе углеродных нанотрубок .....	69
2.10. Квантовый компьютер на миллиардах спинов .....	70
2.11. Твердотельный квантовый чип .....	72
2.12. Анионы .....	73
2.13. Фотонный квантовый компьютер. Физическая аппаратура .....	73
2.14. Оптические квантовые компьютеры .....	75
2.15. Схема для микроволнового захваченного ионного квантового компьютера .....	79
2.16. Управление квантовыми гейтами азотно-замещенной вакансией в алмазе .....	88

3. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ КВУ .....	109
3.1. Достижения и перспективы разработки и исследования модели квантового вычислителя.....	109
3.2. Сравнение моделей квантовых вычислителей (МКВ).....	110
Архитектурные особенности МКВ.....	116
Программные особенности МКВ.....	118
Симуляция квантовых эффектов / физических процессов.....	119
Пользовательский интерфейс МКВ.....	121
Прочее.....	123
Результаты сравнения и классификации сред моделирования.....	123
3.3. Оценка МКВ .....	125
Разработка обобщенной архитектуры моделирующей среды .....	128
Разработка интерфейса пользователя.....	130
Интерфейс МКВ.....	133
Область манипуляции КС.....	134
Область определения начального состояния квантовых битов .....	135
3.4. Алгоритм исполнения моделирующей среды.....	139
4. АРХИТЕКТУРА СИМУЛЯТОРОВ КВУ .....	144
4.1. Симюляторы квантовых вычислительных устройств .....	144
4.2. Открытая архитектура симюлятора квантового вычислителя. ....	153
Принципы открытой архитектуры симюлятора КВ.....	153
Взаимодействие элементов симюлятора  квантового вычислителя.....	153
4.3. Определение оптимального уровня модульности симюлятора квантового вычислителя.....	155
Реализация в языках программирования .....	155
Модульная организация симюлятора квантового вычислителя.....	155
Оценка уровня модульности симюлятора КВ.....	156
4.4. Выполнение набора экспериментов по нахождению оптимального симюлятора квантового вычислителя (СКВ) .....	156
Выполнение полного или дробного набора экспериментов .....	157
Вывод матрицы набора экспериментов.....	158
Постановка задачи регрессионного анализа.....	163
4.5. Классификация СКВ.....	166
5. МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ.....	178
5.1. Понятие квантового алгоритма.....	180
5.2. Общая структура квантового алгоритма .....	183

5.3. Разработка квантовых алгоритмов.....	188
5.4. Оценка сложности КА по функции трудоемкости.....	191
5.5. Описание алгоритмов .....	196
Алгоритм Дойча.....	196
Алгоритмы, основанные на квантовых Фурье-преобразованиях.....	197
Поисковый алгоритм Гровера.....	197
Алгоритм факторизации Шора.....	198
Алгоритм нахождения периода функции.....	199
Алгоритм Бернштейна – Вазирани.....	199
Алгоритм Залки – Визнера.....	200
Алгоритм Саймона.....	200
Алгоритмы, основанные на квантовом случайном блуждании.....	202
Адиабатические квантовые алгоритмы .....	205
Распознавание образов на квантовом компьютере.....	207
Квантовый алгоритм свёрточного декодирования Витерби.....	209
Квантовый криптоанализ.....	210
Абелева скрытая подгруппа.....	211
Неабелева скрытая подгруппа .....	212
Связное дерево.....	212
Квантовый алгоритм нахождения минимума функции .....	213
Квантовый алгоритм для нахождения подмножества .....	213
Машинное обучение.....	215
Квантовые алгоритмы контролируемого / неконтролируемого машинного обучения .....	219
Строковая перезапись.....	220
Квантовые нейронные сети в процессах обучения и управления.....	221
Квантовый алгоритм Монте – Карло.....	223
Алгоритм квантового хеширования.....	226
Программирование с «d-wave»: Алгоритм раскраски карты .....	229
Алгоритм двумерной упаковки.....	233
Алгоритм, усложняющий «экзаменационные задачи» для КвК.....	237
Алгоритм квантового отжига.....	241
5.6. Классификация квантовых алгоритмов .....	250
5.7. Реализация квантовых алгоритмов с применением запутанности и теории игр .....	252

---

5.8. Использование задач теории игр в области квантовых вычислений .....	265
5.9. Использование квантовых нейронных сетей для вычислений .....	270
Влияние запутанного состояния на вычисления в квантовой нейронной сети.....	271
Вычисление XOR-функции с помощью КНС.....	273
Алгоритм обучения квантовой нейронной сети на основе суперпозиции .....	276
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	278
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	280