

**Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Московский физико-технический институт  
(национальный исследовательский университет)»**

**УТВЕРЖДЕНО**

**Директор физтех-школы  
прикладной математики и  
информатики**

**А.М. Райгородский**

	<b>Рабочая программа дисциплины (модуля)</b>
<b>по дисциплине:</b>	Введение в квантовые вычисления
<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Технологическое лидерство
	Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра технологий цифровой трансформации
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр

Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет

Аудиторных часов: 60 всего, в том числе:

лекции: 30 час.

семинары: 30 час.

лабораторные занятия: 0 час.

Самостоятельная работа: 30 час.

Всего часов: 90, всего зач. ед.: 2

Количество контрольных работ, заданий: 2

Программу составил: Л.Е. Федичкин, канд. физ.-мат. наук, доцент

Программа обсуждена на заседании кафедры технологий цифровой трансформации 25.03.2020

## Аннотация

знания, необходимые для описания различных явлений квантовой информатики методами теоретической физики, методы построения соответствующих математических моделей, показать соответствие системы постулатов, положенных в основу теории квантовой обработки и передачи информации, существующим экспериментальным данным, что позволяет считать теорию достоверной в области её применимости. Дать навыки, позволяющие понять как адекватность теоретической модели соответствующим квантовым вычислениям, так и её пределы применимости.

### 1. Цели и задачи

#### Цель дисциплины

дать студентам, поступившим в магистратуру знания, необходимые для описания различных явлений квантовой информатики методами теоретической физики, методы построения соответствующих математических моделей, показать соответствие системы постулатов, положенных в основу теории квантовой обработки и передачи информации, существующим экспериментальным данным, что позволяет считать теорию достоверной в области её применимости. Дать навыки, позволяющие понять как адекватность теоретической модели соответствующим квантовым вычислениям, так и её пределы применимости.

#### Задачи дисциплины

1. Найдите матрицу унитарной операции «корень четвёртой степени из NOT». Докажите, что аналогичной классической операции, которая будучи повторённой четырежды приведёт к совершению операции NOT, не существует.
2. Что получится при применении операции Уолша-Адамара к состоянию, где все кубиты установлены в 1?
3. Разработайте квантовую схему, реализующую операцию Тоффли с помощью однокубитовых операций и операций CNOT.
4. Пусть у искомой функции  $P(x)$  имеется не одно решение, а  $m$  решений (корней). При каком  $m$  алгоритм поиска Гровера сравняется по математическому ожиданию числа вычислений  $P(x)$  с классическим методом поиска?

### 2. Перечень формируемых компетенций

Освоение дисциплины направлено на формирование следующих компетенций:

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области информатики и вычислительной техники, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.7 Способен разрабатывать оригинальные алгоритмы и программные средства, в том числе с использованием современных интеллектуальных технологий, для решения профессиональных задач
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области математики, естественных наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знание информационно-коммуникационных технологий для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности

### 3. Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине (модулю)

В результате освоения дисциплины обучающиеся должны

знать:

- принципы теории квантовой информации;
- методы описания отдельных квантовых ячеек памяти и систем квантовых битов;
- основные однокубитовые квантовые операции и их свойства;
- основные многокубитовые квантовые операции;
- основные методы математического аппарата квантовых вычислений, векторный анализ и аппарат кет-векторов квантовых состояний в многомерных гильбертовых пространствах;
- основные методы решения задач квантовой обработки информации;
- методов описания квантовых регистров - систем квантовых битов (кубитов), в том числе систем со внутренними межкубитовыми взаимодействиями и взаимодействующих с внешними управляющими полями и шумовыми сигналами;
- методы и способы описания квантовых алгоритмов.

уметь:

- пользоваться аппаратом векторного анализа в многомерных гильбертовых пространствах;
- пользоваться аппаратом квантовых операторов в многомерных гильбертовых пространствах;
- определять эволюцию систем квантовых битов в заданной последовательности импульсов управляющего поля;
- применять метод оператора плотности для описания эволюции квантовых систем, взаимодействующих с окружением;
- представлять конкретный квантовый алгоритм в виде последовательности элементарных одно- и двухкубитовых квантовых операций;
- находить ожидаемое время работы заданных квантовых алгоритмов

владеть:

- основными методами математического аппарата теории квантовой информации;
- навыками теоретического анализа физических задач, связанных с возможными реализациями квантовых битов в двухуровневых системах;
- основными методами решения задач о нахождении эволюции и финальных состояний отдельных квантовых ячеек памяти и систем квантовых битов;
- навыками описания, разработки и анализа эффективности квантовых алгоритмов.

#### 4. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам) с указанием отведенного на них количества академических часов и видов учебных занятий

##### 4.1. Разделы дисциплины (модуля) и трудоемкости по видам учебных занятий

№	Тема (раздел) дисциплины	Трудоемкость по видам учебных занятий, включая самостоятельную работу, час.			
		Лекции	Семинары	Лаборат. работы	Самост. работа
1	Квантовый регистр. Матричный вид квантовых операций	2	3		3
2	Квантовые операции. Универсальный набор квантовых операций	3	2		3
3	Квантовые схемы	3	3		3
4	Квантовый бит на основе двойной квантовой точки	3	2		3
5	Пределы вычислительной мощности квантовых компьютеров	2	2		3
6	Квантовая логика Неймана и предыстория квантовых вычислений	2	2		3
7	Квантовый алгоритм поиска Гровера	2	2		3
8	Квантовые ошибки	2	2		
9	Методы избегания квантовых ошибок	2	2		

10	Процедуры коррекции квантовых ошибок. Нестационарная теория возмущений. Представление взаимодействия	2	2		2
11	Вычислительные ресурсы и пределы вычислительной мощности	2	2		3
12	Структура квантового компьютера	2	2		4
13	Квантовые алгоритмы	3	4		
Итого часов		30	30		30
Подготовка к экзамену		0 час.			
Общая трудоёмкость		90 час., 2 зач.ед.			

#### 4.2. Содержание дисциплины (модуля), структурированное по темам (разделам)

Семестр: 1 (Осенний)

##### 1. Квантовый регистр. Матричный вид квантовых операций

Эрмитовы операторы. Унитарные операторы. Прямое матричное произведение. Тензорное произведение. Действия при добавлении вспомогательных кубитов-анцилл.

##### 2. Квантовые операции. Универсальный набор квантовых операций

Уравнение Шрёдингера. Матрица плотности. Редукция матрицы плотности при уменьшении вычислительного пространства. Квантовые операции над одним кубитом. Матрицы Паули. Амплитудное и фазовое вращения. Оператор Адамара. Двухкубитовая операция CNOT. Оператор Уолша. Универсальный набор квантовых операций.

##### 3. Квантовые схемы

Принципы построения квантовых схем. Квантовая схема квантовой телепортации неизвестного состояния кубита с помощью ЭПР-пары и классического канала связи.

##### 4. Квантовый бит на основе двойной квантовой точки

Гамильтониан полупроводникового зарядового кубита. Инициализация. Измерение. Проведение фазового вращения. Проведение амплитудного вращения. Выполнение двухкубитовой операции CNOT.

##### 5. Пределы вычислительной мощности квантовых компьютеров

Класс сложности квантовых вычислений BQP и его соотношение с другими классами сложности. Открытые вопросы в теории сложности квантовых алгоритмов. Физические ограничения вычислительных возможностей квантовых компьютеров, вытекающие из квантомеханической природы вычислительных элементов.

##### 6. Квантовая логика Неймана и предыстория квантовых вычислений

Квантовая логика Неймана. Развитие квантовой логики Гейзенбергом и Вайцзеккером. Сформулированная трудность прямого моделирования многочастичных систем (Шлютер, Манин). Квантовая машина Тьюринга (Дойч). Вклад Фейнмана.

##### 7. Квантовый алгоритм поиска Гровера

Классическая задача поиска. Квантовый алгоритм поиска Гровера. Динамика волновой функции квантового регистра при работе алгоритма. Реализация алгоритма Гровера посредством набора элементарных квантовых операций. Обобщение алгоритма Гровера для случая нескольких решений.

## 8. Квантовые ошибки

Классический шум. Фазовые ошибки. Межкубитовое взаимодействие. Потеря когерентности квантового состояния. Понятие меры декогерентности. Необходимость борьбы с декогерентностью.

## 9. Методы избегания квантовых ошибок

Переход в подпространства, свободные от декогерентности. Полиномиальный алгоритм подавления межкубитового взаимодействия.

## 10. Процедуры коррекции квантовых ошибок. Нестационарная теория возмущений. Представление взаимодействия

Цепные коды. Кодирование, обнаружение синдрома ошибки, процедура исправления выявленной ошибки.

## 11. Вычислительные ресурсы и пределы вычислительной мощности

Классы сложности вычислений. Тезис Чёрча-Тьюринга. Эмпирический закон Мура. Демон Максвелла. Принцип Ландауэра. Обратимые логические операции. Преобразования контролируемое-НЕ (CNOT), Тоффоли и Фредкина. Универсальный набор операций. Физические ограничения вычислительных возможностей в классическом

## 12. Структура квантового компьютера

Принцип суперпозиции состояний. Измерение. Гильбертовы пространства. Сфера Блоха.

## 13. Квантовые алгоритмы

Квантовый алгоритм: инициализация, квантовая унитарная эволюция и измерение квантового регистра. Алгоритм Дойча. Квантовый параллелизм.

## 5. Описание материально-технической базы, необходимой для осуществления образовательного процесса по дисциплине (модулю)

доска, мел, тряпка. Желательно также применение мультимедийного оборудования (проектор), для лучшей организации лекции.

## 6. Перечень рекомендуемой литературы

### Основная литература

1. Теоретическая физика [Текст] : в 10 т. Т. 3 : Квантовая механика. Нерелятивистская теория : учеб. пособие для вузов: рек. М-вом образования РФ / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц ; под ред. Л. П. Питаевского. — 6-е изд., испр. — М. : Физматлит, 2008. — 800 с.
2. Комбинаторная логика в программировании. Вычисления с объектами в примерах и задачах [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / В. Э. Вольфенгаген ; НОУ Ин-т Актуального образования "ЮрИнфоР-МГУ, Каф. перспективных компьт. исслед. и информ. технологий. — 3-е изд., доп. и перераб. — М. : Ин-т "ЮрИнфоР-МГУ, 2008. — 384 с.

### Дополнительная литература

1. Практическая математика. Руководство для начинающих изучать теоретическую физику [Текст] : [учеб. пособие для вузов] / Ю. М. Белоусов, В. П. Кузнецов, В. П. Смирнов. — 2-е изд. — Долгопрудный : Интеллект, 2009. — 176 с.

2. Квантовые свойства лазерного излучения [Текст] : учеб. пособие для вузов / В. П. Быков ; М-во высш. и сред.обр. РСФСР; Моск. физико-техн. ин-т (гос.ун-т. — М. : Изд-во МФТИ, 1986. — 92 с.

## **7. Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети "Интернет", необходимых для освоения дисциплины (модуля)**

<http://www.consultant.ru/>

<https://www.fips.ru/>

<https://patents.google.com/>

<https://www.wipo.int/portal/ru/>

## **8. Перечень информационных технологий, используемых при осуществлении образовательного процесса по дисциплине (модулю), включая перечень необходимого программного обеспечения и информационных справочных систем (при необходимости)**

необходимое программное обеспечение: не требуется

## **9. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины (модуля)**

индивидуальная работа предполагает самостоятельное выполнение студентом определенного в «Задании» набора упражнений и задач в соответствии с тематикой семинарских занятий. При необходимости студент получает консультацию по выполнению отдельных задач у преподавателя ведущего занятия как во время проведения семинарских занятий, так и во внеурочное время по согласованию с преподавателем. «Задание» раздается всем студентам в виде учебно-методического материала, содержащего программу курса и упражнения, и задачи, включенные в два домашних задания. Студент также имеет возможность в течение семестра получать консультации по выполнению домашних заданий.

**ОЦЕНОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ (МОДУЛЮ)**

<b>по направлению:</b>	Информатика и вычислительная техника
<b>профиль подготовки:</b>	Технологическое лидерство Физтех-школа Прикладной Математики и Информатики кафедра технологий цифровой трансформации
<b>курс:</b>	1
<b>квалификация:</b>	магистр
Семестр, формы промежуточной аттестации: 1 (осенний) - Дифференцированный зачет	
<b>Разработчик:</b>	Л.Е. Федичкин, канд. физ.-мат. наук, доцент

## 1. Компетенции, формируемые в процессе изучения дисциплины

Код и наименование компетенции	Индикаторы достижения компетенции
ОПК-3 Способен выбирать и (или) разрабатывать подходы к решению типовых и новых задач в области информатики и вычислительной техники, учитывая особенности и ограничения различных методов решения	ОПК-3.7 Способен разрабатывать оригинальные алгоритмы и программные средства, в том числе с использованием современных интеллектуальных технологий, для решения профессиональных задач
ОПК-4 Способен успешно реализовывать решение поставленной задачи, провести анализ результата и представить выводы, применяя знания и навыки в области математики, естественных наук и информационно-коммуникационных технологий	ОПК-4.2 Способен применять знание информационно-коммуникационных технологий для решения поставленной задачи, формулирования выводов и оценки полученных результатов
ПК-2 Понимает и способен применить в научно-исследовательской и прикладной деятельности основные законы естествознания, современный математический аппарат и алгоритмы, современные информационно-коммуникационные технологии	ПК-2.2 Умеет применять полученные знания в области фундаментальных научных основ теории информации и решать стандартные задачи в собственной научно-исследовательской деятельности

## 2. Показатели оценивания компетенций

В результате изучения дисциплины «Введение в квантовые вычисления» обучающийся должен:

### знать:

- принципы теории квантовой информации;
- методы описания отдельных квантовых ячеек памяти и систем квантовых битов;
- основные однокубитовые квантовые операции и их свойства;
- основные многокубитовые квантовые операции;
- основные методы математического аппарата квантовых вычислений, векторный анализ и аппарат кет-векторов квантовых состояний в многомерных гильбертовых пространствах;
- основные методы решения задач квантовой обработки информации;
- методов описания квантовых регистров - систем квантовых битов (кубитов), в том числе систем со внутренними межкубитовыми взаимодействиями и взаимодействующих с внешними управляющими полями и шумовыми сигналами;
- методы и способы описания квантовых алгоритмов.

### уметь:

- пользоваться аппаратом векторного анализа в многомерных гильбертовых пространствах;
- пользоваться аппаратом квантовых операторов в многомерных гильбертовых пространствах;
- определять эволюцию систем квантовых битов в заданной последовательности импульсов управляющего поля;
- применять метод оператора плотности для описания эволюции квантовых систем, взаимодействующих с окружением;
- представлять конкретный квантовый алгоритм в виде последовательности элементарных одно- и двухкубитовых квантовых операций;
- находить ожидаемое время работы заданных квантовых алгоритмов

### владеть:

- основными методами математического аппарата теории квантовой информации;
- навыками теоретического анализа физических задач, связанных с возможными реализациями квантовых битов в двухуровневых системах;
- основными методами решения задач о нахождении эволюции и финальных состояний отдельных квантовых ячеек памяти и систем квантовых битов;
- навыками описания, разработки и анализа эффективности квантовых алгоритмов.



### 3. Перечень типовых (примерных) вопросов, заданий, тем для подготовки к текущему контролю

1. Домашнее задание, состоящее из двух частей, каждая из которых состоит из двух компонентов: упражнения и задачи. Домашние задания издаются специальными выпусками в форме методических пособий для индивидуальной раздачи студентам, а также «выкладываются» на сайт кафедры. Упражнения и задачи разделены на два уровня: базовый, с пометкой (С) или без особых пометок, и вариативный, помеченный (\*).
2. Еженедельное выполнение тестовых заданий по материалам лекций, прочитанных на предыдущей неделе (всего 10 тестов).
3. Две контрольные работы в соответствии с двумя домашними заданиями.

### 4. Перечень типовых (примерных) вопросов и тем для проведения промежуточной аттестации обучающихся

- 1 Вычислительные ресурсы и пределы вычислительной мощности Классы сложности вычислений. Универсальный набор. Физические ограничения Классы сложности вычислений. Тезис Чёрча-Тьюринга. Эмпирический закон Мура. Демон Максвелла. Принцип Ландауэра. Обратимые логические операции. Преобразования контролируемое-НЕ (CNOT), Тоффли и Фредкина. Универсальный набор операций. Физические ограничения вычислительных возможностей в классическом мире
- 2 Структура квантового компьютера Квантовые биты (кубиты).  
Нотация Дирака. Принцип суперпозиции состояний. Измерение. Гильбертовы пространства. Сфера Блоха.
- 3 Квантовый регистр. Матричный вид квантовых операций Эрмитовы и унитарные операторы. Прямое и тензорное матричные произведения.  
Эрмитовы операторы. Унитарные операторы. Прямое матричное произведение. Тензорное произведение. Действия при добавлении вспомогательных кубитов-анциллов.
- 4 Квантовые операции. Универсальный набор квантовых операций  
Матрица плотности. Квантовые операции над одним кубитом. Многокубитовые операции Уравнение Шрёдингера. Матрица плотности. Редукция матрицы плотности при уменьшении вычислительного пространства. Квантовые операции над одним кубитом. Матрицы Паули. Амплитудное и фазовое вращения. Оператор Адамара. Двухкубитовая операция CNOT. Оператор Уолша. Универсальный набор квантовых операций.
- 5 Квантовые схемы Общее понятие квантовой схемы. Схема квантовой телепортации. Принципы построения квантовых схем. Квантовая схема квантовой телепортации неизвестного состояния кубита с помощью ЭПР-пары и классического канала связи.
- 6 Квантовые алгоритмы Структура квантового алгоритма. Пример простого алгоритма, превосходящего классический аналог. Квантовый алгоритм: инициализация, квантовая унитарная эволюция и измерение квантового регистра. Алгоритм Дойча. Квантовый параллелизм.
- 7 Квантовый бит на основе двойной квантовой точки Структура полупроводникового зарядового кубита. Проведение основных операций.  
Гамильтониан полупроводникового зарядового кубита. Инициализация. Измерение. Проведение фазового вращения. Проведение амплитудного вращения. Выполнение двухкубитовой операции CNOT.
- 8 Пределы вычислительной мощности квантовых компьютеров Класс сложности квантовых вычислений. Ограничения вычислительных возможностей. Класс сложности квантовых вычислений BQP и его соотношение с другими классами сложности. Открытые вопросы в теории сложности квантовых алгоритмов. Физические ограничения вычислительных возможностей квантовых компьютеров, вытекающие из квантомеханической природы вычислительных элементов.

9 Квантовая логика Неймана и предыстория квантовых вычислений Квантовая логика. Основные этапы развития теории квантовых вычислений до появления эффективных квантовых алгоритмов. Квантовая логика Неймана. Развитие квантовой логики Гейзенбергом и Вайцзеккером. Сформулированная трудность прямого моделирования многочастичных систем (Шлютер, Манин). Квантовая машина Тьюринга (Дойч). Вклад Фейнмана.

10 Квантовый алгоритм поиска Гровера Классическая задача поиска. Квантовый алгоритм поиска Гровера. Обобщение алгоритма Гровера. Классическая задача поиска. Квантовый алгоритм поиска Гровера. Динамика волновой функции квантового регистра при работе алгоритма. Реализация алгоритма Гровера посредством набора элементарных квантовых операций. Обобщение алгоритма Гровера для случая нескольких решений.

11 Квантовые ошибки Источники квантовых ошибок. Мера декогерентности. Классический шум. Фазовые ошибки. Межкубитовое взаимодействие. Потеря когерентности квантового состояния. Понятие меры декогерентности. Необходимость борьбы с декогерентностью.

12 Методы избегания квантовых ошибок Способы борьбы с квантовыми ошибками Переход в подпространства, свободные от декогерентности. Полиномиальный алгоритм подавления межкубитового взаимодействия.

13 Процедуры коррекции квантовых ошибок Структура алгоритмов коррекции ошибок. Цепные коды. Кодирование, обнаружение синдрома ошибки, процедура исправления выявленной ошибки.

билет1

Квантовый регистр. Матричный вид квантовых операций

Квантовые схемы

билет2

Методы избегания квантовых ошибок

Квантовые алгоритмы

билет3

Квантовые операции. Универсальный набор квантовых операций

Квантовый бит на основе двойной квантовой точки

#### Критерии оценивания

1. Домашнее задание, состоящее из двух частей, каждая из которых состоит из двух компонентов: упражнения и задачи. Домашние задания издаются специальными выпусками в форме методических пособий для индивидуальной раздачи студентам, а также «выкладываются» на сайт кафедры. Упражнения и задачи разделены на два уровня: базовый, с пометкой (С) или без особых пометок, и вариативный, помеченный (\*).
2. Еженедельное выполнение тестовых заданий по материалам лекций, прочитанных на предыдущей неделе (всего 10 тестов).
3. Две контрольные работы в соответствии с двумя домашними заданиями

#### 5. Методические материалы, определяющие процедуры оценивания знаний, умений, навыков и (или) опыта деятельности

Индивидуальная работа предполагает самостоятельное выполнение студентом определенного в «Задании» набора упражнений и задач в соответствии с тематикой семинарских занятий. При необходимости студент получает консультацию по выполнению отдельных задач у преподавателя ведущего занятия как во время проведения семинарских занятий, так и во внеурочное время по согласованию с преподавателем. «Задание» раздается всем студентам в виде учебно-методического материала, содержащего программу курса и упражнения, и задачи, включенные в два домашних задания. Студент также имеет возможность в течение семестра получать консультации по выполнению домашних заданий.

Вид самостоятельной работы

1. Квантовый регистр. Матричный вид квантовых операций. Эрмитовы и унитарные операторы. Прямое и тензорное матричные произведения.
2. Контрольная работа и сдача первого домашнего задания

- 3 Реализация квантовых алгоритмов посредством использования универсального набора элементарных квантовых операций.
- 4 Контрольная работа и сдача второго домашнего задания