

РАЗРАБОТКА ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОГО АППАРАТА И ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ЭМУЛЯТОРА КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
г. Минск, Республика Беларусь

Литвинко П.М., Киселёва М.А.

Ташлыкова-Бушкевич И.И., канд. физ.-мат. наук, доцент
Луцакова И.Н., канд. физ.-мат. наук, доцент

В настоящее время наблюдается устойчивый рост интереса к квантовым вычислениям и квантовым компьютерам. Квантовые компьютеры позволяют существенно повысить эффективность вычислений. Построение физически реализуемого квантового компьютера является фундаментальной задачей физики XXI века.

Цель работы – описание физических принципов построения, а также разработка и программная реализация математического аппарата эмулятора квантового компьютера.

Фундаментальной единицей информации в квантовых вычислениях является квантовый бит – **кубит** [1]. Для описания кубита применяется волновую функцию $\psi(x, t)$. Как и классический бит, кубит допускает два базисных состояния, обозначаемых $|0\rangle$ и $|1\rangle$ (обозначение Дирака). При этом кубит может находиться и в их суперпозиции: $|\psi_1\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$, где α и β – комплексные числа такие, что $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$. При любом измерении состояния кубита он случайно переходит в одно из своих базисных состояний. Таким образом, квантовый бит может принимать бесконечно много значений, но как результат измерения мы получим либо состояние $|0\rangle$ с вероятностью $|\alpha|^2$, либо состояние $|1\rangle$ с вероятностью $|\beta|^2$.

Упорядоченное множество конечного числа кубитов составляет **квантовый регистр**. Состояние $|\psi_n\rangle = |q_1 \dots q_n\rangle$ n -кубитного квантового регистра представляется как вектор единичной длины в комплексном пространстве \mathbb{C}^{2^n} в базисе $\{|0\rangle, \dots, |2^n - 1\rangle\}$, т.е. $|\psi_n\rangle = \sum_{i=0}^{2^n-1} z_i |i\rangle$ и $\| |\psi_n\rangle \|^2 = \sum_{i=0}^{2^n-1} |z_i|^2 = 1$. Квадраты модулей комплексных чисел z_i являются вероятностями получить соответствующие значения компонент регистра при его измерении. Как было показано, состояние одного кубита $|\psi_1\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ есть вектор в двумерном векторном пространстве с базисом $|0\rangle, |1\rangle$. В классической физике возможное состояние регистра из n битов, при условии, что состояние одной частицы описывается вектором в двумерном векторном пространстве, может быть описано вектором размерности $2n$. В квантовом случае система из n кубитов формирует пространство состояний размерности 2^n . Возрастание размерности пространства состояний предполагает **экспоненциальное ускорение** вычислений на квантовых компьютерах по сравнению с классическими. Изменение состояния квантовой системы осуществляется согласно уравнению Шредингера.

Квантовый компьютер может быть построен из схем **логических гейтов**. **Квантовый гейт** с n входами и n выходами – это преобразование, применённое к квантовому регистру $|\psi_n\rangle$ и определяемое унитарной матрицей U размерности $2^n \times 2^n$. **Квантовая схема** – это квантовая вычислительная модель, построенная из квантовых логических гейтов, в которых вычислительные шаги синхронизированы по времени.

Для ввода информации в квантовый компьютер используется регистр, приведённый с помощью коротких электромагнитных импульсов в заданное начальное состояние $|\psi_0\rangle$. Далее над заданным регистром последовательно выполняются квантовые схемы. Извлечение результата вычисления из квантового регистра производится посредством измерения системы. Измерение регистра означает фиксацию одного из базисных состояний i , $0 \leq i \leq 2^n - 1$, таким образом, что его амплитуда $|z_i|$ становится равной 1, а амплитуды всех остальных состояний становятся равными 0.

В результате работы нами была разработана математическая модель, рассмотрены и классифицированы принципы физического построения квантового компьютера. Построенная модель реализована в программном продукте «Quantum Machine». Программа состоит из трёх частей:

- модуль квантовых вычислений (включает ядро, классы квантовых схем);
- интегрированная среда разработки (предоставляет API для реализации квантовых алгоритмов, интерпретирует и выполняет команды);
- модуль квантовых алгоритмов (реализует некоторые известные квантовые алгоритмы на базе созданного API).

Структурными элементами системы являются:

- **TAbstractCircuit** – Абстрактная схема
- **TUnaryGate** – Однокубитный гейт
- **TCircuitItem** – Элемент квантовой схемы
- **TCircuit** – Составная квантовая схема
- **TControlledCircuit** – Контролируемая квантовая схема
- **TQuantumMachine** – Квантовая машина

Данные элементы составляют основу эмулятора квантового компьютера. Такое устройство позволяет реализовывать и выполнять схемы любой сложности.

Нами был определен круг базовых элементов, необходимых для осуществления квантовых вычислений на классическом компьютере, разработана математическая и структурная модель эмулятора, воплощенная в программном продукте. Разработанная нами уникальная система представления квантового вычислительного процесса позволяет наглядно представлять сколь угодно сложные квантовые алгоритмы как линейную последовательность управляющих блоков, готовую к программной интерпретации.

«Quantum Machine» позволяет реализовывать разнообразные квантовые схемы, начиная от низкоуровневых команд и заканчивая высокоуровневыми системами классов, поддерживает интеграцию с классическими вычислительными системами. С помощью эмулятора можно реализовывать и выполнять квантовые алгоритмы любой сложности в виде обычных функций на языке Pascal/Delphi.

Готовый программный продукт «Quantum Machine» является многофункциональной средой для построения, выполнения и анализа квантовых схем, предоставляющей все необходимые средства для эмуляции квантовых вычислений на персональном компьютере. В программу включена реализация преобразования Уолша-Адамара, алгоритма Дойча — Джоза, некоторых арифметических квантовых схем. В дальнейшем на платформе планируется реализовать и другие квантовые алгоритмы.

Список литературы:

1. Китаев, А., Шень, А., Вялый, М. Классические и квантовые вычисления / А. Китаев, А. Шень, М. Вялый. – МЦНМ, 1999. – 192 с.
2. Nielsen, M. A., Chuang, I. L. Quantum Computation and Quantum Information / M. A. Nielsen, I. L. Chuang. – Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2000. – 665 p.
3. Манин Ю. И. Вычислимое и невычислимое. – М.: Сов. радио, 1980.
4. Feynman R.P. Simulating physics with computers. — International Journal of Theoretical Physics, 1982.