

УДК 004:530.145

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ АСИМПТОТИЧЕСКОГО БЫСТРОДЕЙСТВИЯ РАЗЛИЧНЫХ АРХИТЕКТУР КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ

Рудаков Я. В. (Лицей 533), Медведев Д. Д. (ГБОУ СОШ № 90), Федаев А.В
(ЧОУ Ювента)

Научный руководитель – Иванов Д. А. (Университет ИТМО)

Введение

Вопрос развития сферы квантовых вычислений чрезвычайно важен в наши дни. Такие вычисления позволяют достичь очень высокого уровня параллелизма работы компьютеров. К настоящему времени за время существования квантовых компьютеров (КК) существует множество видов их физических реализаций, и мы в рамках проекта затрагиваем ионные, фотонные и сверхпроводниковые как основные платформы, на которые делают ставку ведущие компании, такие как IBM, Google, Microsoft и NVIDIA. В погоне за скоростью и точностью необходимо оптимизировать алгоритмы, решающие поставленную перед КК задачу. В классической асимптотике одним из важнейших аспектов работы алгоритма является его сложность, описываемая нотацией Big O. Обычно под сложностью понимают количество элементарных операций, совершённых над некоторым объёмом информации. В квантовых вычислениях мы вправе рассматривать её как количество гейтов (базовых операций над кубитами, аналогичных логическим), применяемых к кубитам (квантовым битам) в ходе работы алгоритма. При анализе квантовых цепей их сложность обычно оценивается на уровне абстрактной схемы, не учитывающей топологические особенности конкретных архитектур квантовых компьютеров. Вследствие этого асимптотические характеристики одного и того же алгоритма могут существенно различаться на разных платформах. Различия становятся особенно наглядными при декомпозиции гейтов схемы до поворотных (R) и простейших нативных двухкубитных, проще говоря — элементарных.

Основная часть

В процессе проведения аналитической части работы над проектом нами было выявлено, что сложность произвольного квантового алгоритма растёт пропорционально количеству применённых гейтов [1], ровно, как и вероятность появления ошибки в вычислениях [2]. Благодаря линейному росту сложности квантовой цепи мы в рамках проекта можем проводить анализ на простых алгоритмах, при этом результаты нашего анализа будут также распространяться на алгоритмы большой сложности и глубины. Также было выявлено, что любые гейты декомпозируются до элементарных, физически реализуемых напрямую на конкретной платформе квантового компьютера [3]. Так, в простейшем алгоритме квантовой телепортации [4] при реализации на ионной платформе возникает необходимость замены гейта CNOT, не являющегося нативным. В качестве эквивалентной двухкубитной операции используется гейт Мёлмера–Соренсена (MS), реализующий требуемое логическое преобразование. В случае сверхпроводниковых КК дополнительным фактором выступают топологические ограничения. Кубиты организованы в виде решётки с ограниченной связностью, что допускает прямое выполнение двухкубитных операций лишь между соседними элементами. Если алгоритм требует взаимодействия других кубитов, возникает необходимость в применении SWAP-гейтов, обеспечивающих перенос квантового состояния между соседними узлами и эффективное «сближение» требуемых кубитов. Таким образом, топология сверхпроводниковых систем приводит к увеличению сложности схемы за счёт вспомогательных операций.

Уникальность нашей работы заключается в том, что мы подошли к вопросу оптимизации не с точки зрения компиляции [5], а с точки зрения архитектурно-зависимого анализа сложности алгоритма на этапе его проектирования.

Вывод

В ходе работы мы провели анализ сложности квантовых алгоритмов при рассмотрении их на разных физических платформах. Наша работа позволяет снизить сложность вычислений за счет уменьшения глубины схемы, так как люди, занимающиеся квантовыми вычислениями, будут более осведомленными об изменении сложности алгоритмов при переходе от абстракций к практике.

Список использованных источников:

1. Haferkamp J. et al. Linear growth of quantum circuit complexity // *Nature Physics*. – 2022. – Т. 18. – С. 528–532.
2. Nielsen M. A., Chuang I. L. *Quantum Computation and Quantum Information*. – 10th anniversary edition. – Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
3. Krol A. M. et al. Efficient Decomposition of Unitary Matrices in Quantum Circuit Compilers // *Applied Sciences*. – 2022. – Т. 12. – №. 2. – С. 759.
4. Bennett C. H. et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classical and Einstein-Podolsky-Rosen channels // *Physical Review Letters*. – 1993. – Т. 70. – №. 13. – С. 1895–1899.
5. Guo Y., Yang S. Efficient quantum circuit compilation for near-term quantum advantage // *EPJ Quantum Technology*. – 2025. – Т. 12. – С. 69.