

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ
КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

В настоящее время вне зависимости от пути и способа создания квантового компьютера (будь он основан на импульсном ядерном магнитном резонансе или на использовании энергии ионов, захваченных ионными ловушками, создаваемыми в вакууме или на состояниях сверхпроводников, связанных переходами Джозефсона) схема его пока остается одинаковой (рис.1)[1].

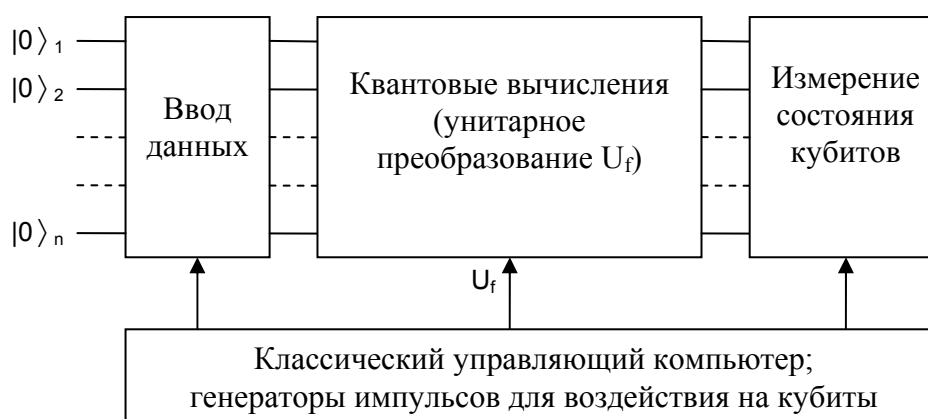


Рис. 1 . Структура квантового компьютера.

При такой организации квантовой вычислительной системы квантовая механика осуществляет преобразование информации в коммуникациях, криптографии и вычислениях, используя принципы кардинально отличающиеся от классических. Сегодня задача управления малыми квантовыми системами из нескольких кубитов достаточно успешно решается, но управление сложными системами по-прежнему является труднореализуемым. Сложность управления большим числом кубитов есть проблема комплексная, состоящая из ряда подзадач, тесно связанных между собой:

- проблема изоляции сложной квантовой системы от внешних воздействий;
- проблема достоверности результатов, получаемых в ходе эволюции системы;
- проблема физической организации квантовой системы;
- проблема трудности воздействия на отдельный кубит в большом их ансамбле.

Невозможность полной физической изоляции квантовой системы от воздействий внешней среды влечет за собой явление декогерентности, из-за которой возникают ошибки как в отдельных кубитах, так и в их ансамблях. А это в свою очередь резко снижает достоверность результатов, получаемых в ходе

квантовых вычислений. Именно эта проблема является основным барьером создания действующего квантового компьютера.

Если направить усилия на отработку технологии выполнения простейших вентилей, которые строятся из этих квантовых частиц, то тем самым можно повысить точность выполнения любых устройств, а значит и надежность хода выполнения квантового вычисления. Но аппаратные методы повышения надежности квантовых вычислений, в большей степени, задача физиков и математиков, поэтому подробнее на них мы останавливаться не будем.

Своеобразие квантовых состояний проявляется в том, что они очень чувствительны к внешним воздействиям. Это объясняется их сверхмалыми размерами. Например, невозможно полностью изолировать два атома водорода в молекулах дибромотиофена $\text{SCH}:(\text{CBr})_2:\text{CH}$, на которых реализуется кубит, от теплового воздействия со стороны других атомов. Причем здесь следует сказать, что если воздействие внешнего поля вызывает унитарное преобразование, то есть обратимое возмущение состояния системы, то измерение всегда приводит к необратимому изменению этого состояния. Таким образом, ошибки в квантовых состояниях бывают двух типов: обратимые, которые могут происходить и в классических вычислительных системах, и необратимые, специфика которых определяется квантовой природой (декогерентизация). Однако такая классификация ошибок не точно отражает суть дела. Более правильным было бы классифицировать все возможные ошибки на локальные, т.е. затрагивающие содержимое только одного кубита, и глобальные, затрагивающие неограниченное число кубитов [2]. При этом в случае запутанного состояния локальные воздействия (измерения) способны привести к появлению глобальных ошибок. В ходе вычислений естественно будут возникать оба эти типа ошибок, с которыми необходимо бороться. Корректировка локальных ошибок реализуется гораздо проще, чем глобальных. Можно также предположить, что для коррекции глобальных ошибок, возникающих при локальном воздействии на систему, необходимо будет использовать чисто квантовые методы, поскольку этот тип не встречается в мире классических систем [2]. Поэтому направления исследований (на основе классической теории информации, а также понятия кода коррекции ошибок) в области помехоустойчивости квантовых вычислительных процессов могут быть следующими:

- использование кодов, корректирующих ошибки кодов с привлечением дополнительных кубитов;
- внесение коррекции в квантовый алгоритм;
- создание отказоустойчивых квантовых гейтов;
- использование физических свойств самих кубитов и природы квантового компьютера.

В [3] показано, что время декогерентизации для отдельных квантовомеханических систем может быть на несколько порядков (3-9) больше чем время, необходимое для завершения требуемого числа шагов вычисления какого-либо

алгоритма на квантовом компьютере. С другой стороны, ошибка, обычно появляющаяся при переходе системы к возбужденному состоянию, будет автоматически исправляться, когда система релаксирует к основному состоянию. В работе[4] предложено реализовать отказоустойчивые квантовые гейты в подходящей среде с помощью обмена квазичастицами, которые удовлетворяют экзотической версии двумерной квантовой статистике.

Для определенности будем считать, что все ошибки являются результатом квантового взаимодействия кубитов и окружающей среды. Возможные ошибки для каждого отдельного кубита будем представлять линейной комбинацией операторов: (I) (тождественное преобразование), (X) (инверсия), (Z) (фазовая ошибка), (Y) (инверсия и фазовая ошибка). Тогда, общее выражение однокубитовой ошибки есть некоторое преобразование вида: $e_1I + e_2X + e_3Y + e_4Z$. Взаимодействие с окружающей средой преобразует отдельные кубиты согласно выражению [5]

$$|\phi\rangle \rightarrow (e_1I + e_2X + e_3Y + e_4Z)|\phi\rangle = \sum_i e_i E_i |\phi\rangle \quad ,$$

где $|\phi\rangle \rightarrow \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ - начальное состояние кубита,

$|e\dots\rangle$ - состояния среды.

Для больших квантовых регистров ошибки также выражаются линейными комбинациями унитарных операторов ошибок E_i . Эти операторы являются тензорными произведениями операторов ошибок отдельных кубитов $\{I, X, Y, Z\}$ или более общих многокубитовых операторов ошибок. В любом случае, ошибку можно записать как $\sum_i e_i E_i$ [5].

Используя такое определение ошибки, можно ввести ряд предположений, на основе которых строится общая схема коррекции квантовых ошибок:

- отсутствие запутанности между квантовой системой и средой;
- наличие только местных или некоррелированных ошибок, т. е. ошибка только в нескольких кубитах;
- взаимодействие симметрично.

Тогда общую схему квантовой коррекции представим в виде (рис. 2) [6]. Данная схема (рис. 2.) является универсальной и позволяет объяснить принцип действия любого квантового кода коррекции ошибок. Квантовая система, представляющая собой ансамбль кубитов, первоначально кодируется по определенным правилам, с использованием кодирующей анциллы (дополнительных кубитов). Далее предполагается воздействие внешней среды на закодированную квантовую систему, в ходе которого может произойти ошибка либо в одном кубите либо в нескольких либо вообще не произойти. Для обнаружения возникновения ошибки используется так называемая анцилла синдрома, анализируя состояние которой можно говорить о наличии ошибки.

Если таковая имеется, то происходит процесс ее коррекции, фактически за счет избыточного кодирования квантового

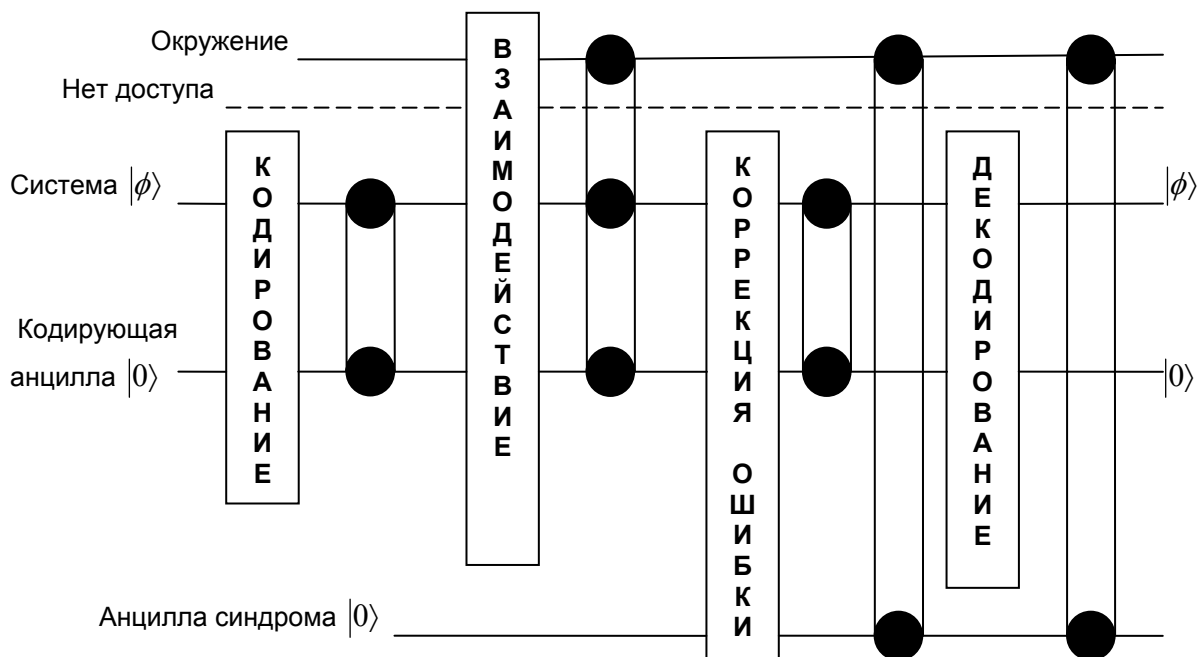


Рис. 2 Общая схема квантовой коррекции.

состояния. Задача заключается в нахождении таких операторов кодирования и определении анциллы синдрома, чтобы множество исправляемых ошибок содержало только исправляемые ошибки, включая все те ошибки, вероятность появления которых очень велика. После выполнения данной операции производится декодирование.

На основе такого подхода к решению проблемы достоверности результатов квантовых вычислений, если учесть, что совместное использование CNOT-гейта (контролируемое отрицание), гейта-Адамара-Уолша и кодирующей анциллы позволяет корректировать не только ошибки по амплитуде, но и фазовые, был разработан ряд более или менее отказоустойчивых кодов, которые можно условно разделить на несколько групп[6,7]:

- стабилизирующие коды – симплектические коды, основанные на классических методах, к которым можно отнести CSS-коды (коды Шора, Стина и Калдербанка); торические коды, линейные коды, коды с повторением;
- коды Клиффорда, обобщающие стабилизирующие коды;
- не аддитивные коды, не являющиеся стабилизирующими (Rains);
- каскадные коды;
- коды с использованием сдвиговых регистров(QRS-коды);
- сверточные коды;
- использование теории графов.

Каждая из данных групп является обобщением ряда однотипных

кодов, различающихся количеством кубитов, необходимых для кодирования того или иного квантового состояния. Однако, квантовые коды, корректирующие ошибки, не дают достаточной гарантии успешной устойчивости к ошибкам устойчивости к ошибкам вычислений. Этому есть ряд причин[6]:

- коды, корректирующие ошибки, лишь немного помогают, но этого не достаточно для отказоустойчивых вычислений;
- коды, корректирующие ошибки, требуют дополнительного оборудования и в целом замедляют вычисления;
- ошибки при корректировке могут возникать в самом коде коррекции;
- необходимо передавать достоверную информацию большой длительности и на большие расстояния;
- необходимо увеличивать продолжительность вычислений для получения результата.

В заключении следует отметить возможные направления дальнейшего развития квантовых кодов коррекции ошибок[6]:

- увеличение размерности подсистем, за счет увеличения размерности квантовой системы, обобщения стабилизирующих кодов и использования для больших алфавитов MDS-кодов;
- улучшенные модели ошибок, за счет поиска систем, в которых локальные-глобальные ошибки преобладают с наложением симметрии;
- совместная оптимизация квантовой коррекции ошибок и алгоритмов кодирования, за счет оптимизации кодирования малых систем, увеличения трудоемкости алгоритмов, а также поиска наиболее подходящих методов коррекции.

1. *Валиев К.А., Кокин А.А.* Квантовые компьютеры: надежды и реальность.- Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001, 352с.
2. *Ожигов Ю.И.* Квантовые вычисления. Учебно-методическое пособие.- М.: МГУ, факультет ВМиК, 2003, 104с.
3. *ДиВинченцо Д.П.* Квантовые вычисления. Перевод с англ. под ред. В. А. Садовниченко: Сборн. «Квантовый компьютер & квантовые вычисления» т. I. - Ижевск: Редакция журнала «Регулярная и хаотичная динамика», 1999, С.35-59.
4. *Китаев А.Ю.* Квантовые вычисления: алгоритмы и исправление ошибок // УМН, 6, 1997.
5. *Риффель Э., Полак В.* Основы квантовых вычислений. Перевод с англ. под ред. В. А. Садовниченко: Сборн. «Квантовый компьютер & квантовые вычисления» т. I № 1.- Ижевск: Редакция журнала «Регулярная и хаотичная динамика», 2000, С.4-57.
6. 3rd European QIPC Workshop 15th-18th September 2002.
7. *Китаев А., Шень А., Вялый М.* Классические и квантовые вычисления. — М.:МЦНМО, ЧеРо, 1999, 192с.