

ОСОБЕННОСТИ ПОСТРОЕНИЯ АРХИТЕКТУРЫ КВАНТОВЫХ КОМПЬЮТЕРОВ

FEATURES OF CONSTRUCTION OF ARCHITECTURE OF QUANTUM COMPUTERS

A. Bondarev

Summary. The features of work and construction of quantum computers are investigated in detail. The General architecture of quantum computers is given. The principles of operation are considered in a comparative analogy with the device of a standard computer. The topic of relevance of quantum computer development is touched upon.

Keyword: A quantum computer, qubit, quantum register, the generator of impact on the qubits of the quantum computation.

Бондарев Андрей Владимирович

*К.т.н., доцент, Курмтауский филиал ФГБОУ ВО
«Оренбургский государственный университет»
bondarevav@kfosu.edu.ru*

Аннотация. Подробно исследованы особенности работы и построения квантовых компьютеров. Приведена общая архитектура квантовых компьютеров. Принципы работы рассмотрены в сравнительной аналогии с устройством стандартного компьютера. Затронута тематика актуальности разработки квантовых компьютеров.

Ключевые слова: Квантовый компьютер, кубит, квантовый регистр, генератор воздействия на кубиты, квантовые вычисления.

На сегодняшний день квантовые компьютеры обещают настоящую революцию, причем не только в вычислениях, но и в реальной жизни. Медиа пестрят заголовками про то, как квантовые компьютеры уничтожат современную криптографию, а мощность искусственного интеллекта, благодаря им возрастет на порядки.

За последние 10 лет квантовые компьютеры прошли путь от чистой теории до первых работающих образцов. Правда, до обещанной революции предстоит пройти еще немалый путь, да и ее влияние в итоге может оказаться не таким всеобъемлющим, как представляется сейчас.

Квантовый компьютер — устройство, которое использует явления квантовой суперпозиции и квантовой запутанности. Основным элементом в таких вычислениях является кубит, или квантовый бит. За всеми этими словам кроется довольно сложная математика и физика, но если их максимально упростить, то получится примерно следующее.

В обычных компьютерах информации соответствует понятие бита. Бит — единица измерения информации в двоичной системе. Он может принимать значение 0 и 1, что очень удобно не только для математических операций, но и для логических, так как нулю можно сопоставить значение «ложно», а единице — «истинно».

Современные процессоры построены на базе транзисторов, полупроводниковых элементов, которые мо-

гут пропускать, либо не пропускать электрический ток. Иначе говоря, выдавать два значения 0 и 1. Точно также во флеш-памяти транзистор с плавающим затвором может хранить заряд. Если он есть, то это состояние соответствует единице, если его нет — нулю. Аналогичным образом работает и магнитная цифровая запись, только носителем информации там является магнитная частица, либо имеющая, либо не имеющая заряд.

При вычислениях считывается из памяти значение бита (0 или 1) и затем пропускается ток через транзистор; в зависимости от того, пропускает он ток или нет, получается на выходе новый бит, возможно, имеющий другое значение.

Рассмотрим вопрос о том, что такое кубиты для квантовых компьютеров. В квантовом компьютере основным элементом является кубит — квантовый бит. В отличие от обычного бита он находится в состоянии квантовой суперпозиции, то есть имеет значение и 0, и 1, и любые их сочетания в любой момент времени. Если в системе находится несколько кубитов, то изменение одного также влечет за собой изменение всех остальных кубитов.

Это позволяет одновременно просчитывать все возможные варианты. Обычный процессор с его бинарными вычислениями, фактически просчитывает варианты последовательно. Сначала один сценарий, потом другой, потом третий и т.д. Чтобы ускорить процессы обработки данных, начали применять многопоточность, запуская вычисления параллельно, предвыборку, чтобы предугадывать возможные варианты ветвления и про-



Рис. 1. Архитектура квантового компьютера

считывать их заранее. В квантовом компьютере это все делается параллельно.

Отличается и принцип вычислений. В каком-то смысле квантовый компьютер уже содержит все возможные варианты решения задачи. Необходимо считать состояние кубитов и выбрать из них правильный вариант. В этом и заключается принцип работы квантового компьютера.

Добиться квантового состояния можно только у частиц. Кубит не построишь из нескольких атомов, как транзистор. Пока эта проблема до конца не решена. Есть несколько вариантов. Используются зарядовые состояния атомов, например, присутствие или отсутствие электрона в обычной точке, сверхпроводящие элементы, фотоны и т.д.

В общем виде архитектура любого квантового компьютера может быть представлена в виде, который приведен на рисунке 1.

Основная часть квантового компьютера — квантовый регистр — представлена совокупностью определенного числа L кубитов. Непосредственно перед вводом информации в квантовый компьютер кубиты регистра должны находиться в основном базисном состоянии. Данная операция — подготовка начального состояния — называется инициализацией. После этого кубиты подвергаются определенному воздействию, к примеру, по средствам импульсов электромагнитного поля, которое может управляться классическим компьютером.

Вышеописанное воздействие переводит базисные состояния кубитов в не основное состояния. При чем состояние всего регистра переходит в суперпозицию всех базисных состояний.

При вводе данных в квантовый компьютер состояние входных регистров по средствам соответствующих импульсных воздействий переходит в определенную когерентную суперпозицию базисных состояний. Далее на информацию в таком состоянии воздействует квантовый процессор, выполняющий заданную последовательность квантовых логических операций. Данная последовательность операций определяется унитарным преобразованием, которое действует на состояние регистра. В результате вышеописанных преобразований исходные квантовые состояния преобразуются в новую суперпозицию, которая определяет результат преобразований данных на выходе квантового компьютера.

Все возможные операции на входе квантового компьютера, формирующие исходные состояния, а также осуществляющие локальные преобразования, которые соответствуют алгоритму вычислений, а так же все варианты подавления потери когерентности, являются аналогом стандартного программного обеспечения в классическом варианте компьютера.

При выборе конкретной схемы квантового компьютера требуется разрешить три основных вопроса:

- ◆ во-первых, произвести выбор физической системы, которая представляет необходимую систему кубитов;
- ◆ во-вторых, определиться с применяемым физическим механизмом, который описывает взаимодействие между кубитами, необходимое для производства двухкубитовых операций;
- ◆ в-третьих, произвести выбор способа селективного управления кубитами и оценки их состояния на выходе.

Все вышеописанное является аналогом аппаратному обеспечению в классическом компьютере.

Столь сложное устройство накладывает ограничения и на измерения состояния кубитов. Энергии крайне малы, необходимы усилители, чтобы прочитать данные и так далее. Но усилители могут оказывать воздействия на квантовую систему и менять ее состояния, впрочем, не только они, но даже сам факт наблюдения может иметь значение.

Квантовые вычисления предполагают последовательность операций, которые совершаются с одним или несколькими кубитами. Те в свою очередь ведут за собой изменения всей системы. Задача выбрать из ее состояний правильное, дающее результат вычислений. При этом может быть сколь угодно много состояний, максимальное приближенных к таковому. Соответственно, точность таких вычислений почти всего будет отличаться от единицы.

Таким образом, для полноценного квантового компьютера нужны значительные достижения в физике. Кроме того, программирование для квантового компьютера будет отличаться от существующего сейчас. Наконец, квантовые компьютеры не смогут решить задачи, которые не под силу обычным, но в состоянии ускорить решения тех, с которыми они справляются.

Постепенно проблемы на пути к квантовому компьютеру снимаются. Первые кубиты были построены еще в начале века. Процесс ускорился в начале десятилетия. Сегодня разработчики уже в состоянии произвести процессоры с десятками кубитов.

Последним по времени прорывом стало создание процессора Bristlecone в недрах Google. В марте 2018 года компания заявила, что смогла построить 72-кубитный процессор. На каких физических принципах построен Bristlecone Google не сообщает. Однако считается, что для достижения «квантового превосходства», когда квантовый компьютер начинает превосходить обычный, достаточно 49 кубитов. Google удалось выполнить это условие, но уровень ошибок в 0,6% пока выше требуемого в 0,5%.

Осенью 2018 года IBM объявила о создании прототипа 50-кубитового квантового процессора. Он проходит тестирование. Но в 2018 году IBM открыла свой 20-кубитовый процессор для облачных вычислений. В марте 2018 года была запущена меньшая версия IBM Q. Ставить эксперименты на таком компьютере могут все желающие. По их результатам уже вышло 35 научных работ.

Еще в начале десятилетия на рынке появилась шведская компания D-Wave, которая позиционировала свои компьютеры как квантовые. Она породила множество споров, так как объявляла о создании 1000-кубитных ма-

шин, в то время как признанные лидеры «ковырялись» всего лишь с парой кубитов. Компьютеры шведских разработчиков продавались по цене в \$10–15 миллионов, так что проверить их было не так просто.

Компьютеры D-Wave не являются квантовыми в прямом смысле этого слова, но используют некоторые квантовые эффекты, которые можно применять для решения некоторых задач оптимизации. Иначе говоря, не все алгоритмы, которые могут быть выполнены на квантовом компьютере, получают на D-Wave квантовое ускорение. Google приобрела одну из систем шведов. В результате ее исследователи признали компьютеры «ограниченно квантовыми». При этом выяснилось, что кубиты сгруппированы кластерами по восемь, то есть их реальное число заметно меньше, чем декларируемое.

Традиционно сильная школа физики в России позволяет внести существенный вклад в решение физических проблем для создания квантового компьютера. В январе 2018 года россияне создали усилитель сигнала для квантового компьютера. Учитывая, что своей работой усилитель сам по себе способен влиять на состояние кубитов, уровень генерируемого им шума должен мало отличаться от «вакуумного». Это и удалось российским ученым из лаборатории «Сверхпроводящие метаматериалы» НИТУ «МИСиС» и двух институтов РАН. Для создания усилителя использовались сверхпроводники.

В России также создан квантовый центр. Это негосударственная исследовательская организация, занимающаяся исследованиями в области квантовой физики. В том числе она занимается проблемой создания кубитов. За центром стоит бизнесмен Сергей Белоусов и профессор Гарвардского университета Михаил Лукин. Под его руководством в Гарварде уже был создан 51-кубитовый процессор, который некоторое время до анонса Bristlecon был самым мощнейшим квантовым компьютером устройством в мире.

Подведем итоги

Квантовые компьютеры пока все еще остаются экспериментальными. Маловероятно, что полноценный квантовый компьютер, обеспечивающий действительно высокую вычислительную мощность, появится раньше следующего десятилетия. Производство кубитов и построение из них стабильных системы все еще далеко от совершенства.

Судя по тому, что на физическом уровне квантовые компьютеры имеют несколько решений, которые отличаются технологиями и, вероятно, стоимостью, они не будут унифицированы как минимум ближайшее десятилетие.

Кроме того, уже сейчас понятно, что квантовые компьютеры и в течение следующего десятилетия, скорее всего, будут «штучными» и очень дорогими устройствами.

Вероятно, что квантовые компьютеры будут предлагаться в «облачной» модели, когда их ресурсы смогут задействовать заинтересованные исследователи и организации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Валиев К. А. Квантовые компьютеры и квантовые вычисления // УФН. — 2012. — 344 с.
2. Валиев К. А., Кокин А. А. Квантовые компьютеры: надежды и реальность. — М.-Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2013. — 320 с.
3. Доронин С. И. Квантовый компьютер, перспективы практической реализации. — М., 2014. — 267 с.
4. Килин С. Я. Квантовая информация // УФН. — 2010. — 299 с.
5. Китаев А., Шень А., Вьялый М. Классические и квантовые вычисления. — М.: МЦНМО, 2011. — 192 с.
6. Нильсен М., Чанг И. Квантовые вычисления и квантовая информация. — М.: Мир, 2012. — 824 с.

© Бондарев Андрей Владимирович (bondarevav@kfosu.edu.ru).
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



Г. Оренбург