

ЭМУЛЯЦИЯ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ДЛЯ АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ НА КЛАССИЧЕСКОМ ПК

EMULATION OF QUANTUM COMPUTING PROCESSES FOR AUTOMATED CONTROL SYSTEMS ON A CLASSICAL PC

S. Tyryshkin

Summary. Currently, the possibilities of quantum computing do not leave scientists from various fields of science indifferent. To achieve acceleration, quantum algorithms use such physical effects as entanglement and superposition. However, these effects are difficult to reproduce on a large scale, which leads to problems of reliability and accuracy, as well as the need to use suitable quantum measurement procedures. The limitations of modern quantum computing devices have prompted the development of classical emulators, which can help in most studies of future quantum algorithms in various areas of their application. In the context of the above, the article is devoted to the consideration of the features of emulation of quantum computing processes for automated control systems on a classical PC. In the course of the study, the capabilities of classical analog equipment for emulating the properties of superposition and entanglement, thereby simulating quantum parallelism to achieve similar speeds are considered.

Keywords: quantum computing, emulation, speed, algorithm, signal.

Тырышкин Сергей Юрьевич

к.т.н., Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова
service.vip-spe@yandex.ru

Аннотация. В настоящее время возможности квантовых вычислений не оставляют равнодушными ученых из самых разных отраслей науки. Для достижения ускорения квантовые алгоритмы используют такие физические эффекты, как запутанность и суперпозиция. Однако, эти эффекты трудно воспроизвести в больших масштабах, что приводит к проблемам надежности и точности, а также к необходимости использования подходящих процедур квантовых измерений. Ограничения современных квантовых вычислительных устройств подтолкнули к разработке классических эмуляторов, которые могут помочь в большинстве исследований будущих квантовых алгоритмов в различных областях их применения. В контексте вышесказанного, статья посвящена рассмотрению особенностей эмуляции квантовых вычислительных процессов для автоматизированных систем управления на классическом ПК. В процессе исследования рассмотрены возможности классического аналогового оборудования для эмуляции свойств суперпозиции и запутанности, позволяющих имитировать квантовый параллелизм для достижения схожих скоростей.

Ключевые слова: квантовые вычисления, эмуляция, скорость, алгоритм, сигнал.

Введение

Компьютерные технологии давно поддерживают науку и инновации, имитируя явления реального мира. Однако некоторые уровни физического моделирования находятся за пределами вычислительных возможностей даже самых мощных суперкомпьютеров [1]. Но там, где заканчивается потенциал классических вычислений, на повестку дня выходят возможности квантовой механики.

На высоком уровне квантовые вычисления представляют собой новую технологию, которая является одним из наиболее перспективных приложений для квантового моделирования. Данная революционная идея согласовывает теорию вычислений с квантовой физикой и демонстрирует большие перспективы. Квантовые вычисления могут использовать состояния запутанных кубитов для решения проблем, с которыми, как считается, традиционные цифровые компьютеры не в состоянии справиться, а также для существенного улучшения уже имеющихся решений. Этими кубитами, которые обычно состоят из фотонов, атомов или ионов, можно манипу-

лировать только с помощью специально спроектированных сигналов с точно контролируемой энергией, которая едва превышает энергию вакуума и изменяется в течение наносекунд [2].

Использование квантовых компьютеров для моделирования квантовых систем может позволить исследователям более точно воссоздавать молекулярную динамику, запустив инновации и революционизировав процесс материаловедения и открытий для многочисленных отраслей вычислительной парадигмы, которая в корне отличается от классических компьютеров. Особое значение квантовые алгоритмы имеют для усовершенствования и развертывания передовых автоматизированных систем управления. Например, в области оптимизации производственных потоков и управления сложной робототехникой, также с целью проведения прогнозной аналитики и более комплексного контроля качества с использованием технологии моделирования и непрерывного тестирования компонентов в процессе их производства.

Однако, развитие этой прорывной технологии сдерживают существующие технические сложности, которые

ограничивают возможности современных квантовых компьютеров. Они страдают от проблем неполной связности кубитов и нетривиальной вероятности ошибок. Поэтому, чтобы облегчить разработку квантовых алгоритмов, пока решаются инженерные вопросы, исследователи работают над проектированием квантовых симуляторов, которые позволяют классическим компьютерам вести себя как квантовые в небольших масштабах.

Таким образом, научно-практическая значимость изучения возможностей квантовой эмуляции, как альтернативного подхода, который может быть полезен на практике, предопределила выбор темы данной статьи.

Над вопросами использования классических систем для эмуляции квантовых компьютеров, что может иметь практические преимущества, поскольку такие устройства проще в создании и более устойчивы к декогеренции, по сравнению с настоящими квантовыми компьютерами, трудятся такие исследователи как: Shankari V. Rajagopal, Kurt M. Fujiwara, Ruwan Senaratne, Kevin Singh, Zachary A. Geiger, David M. Weld

Идею разработки аналогового компьютера в гильбертовом пространстве, который использует электронные схемы для представления и манипулирования условным квантовым состоянием, развивают в своих трудах Caveed Mahmud, Esam El-Araby, David Caliga, Svetlana Vlasenko, Alexander Mikhalychev, Samaneh Pakniyat, George Hanson, Amir Boag, Gregory Slepuyan,

Масштабируемая архитектура с использованием конвейеризации для четырехкубитной эмуляции алгоритма поиска Гровера и квантового преобразования Фурье описывается в работах Zhye Yin, Pengwei Wu, Ashish Manohar, Elliot R. McVeigh, Jed D. Pack, Mario Motta, Julia E. Rice.

Высоко оценивая имеющиеся на сегодняшний день труды и наработки, следует отметить, что существует еще широкий спектр вопросов, решения по которым не найдено. К ним, например, относятся проблемы громоздкого процесса спектрального разложения и повторного синтеза для каждой операции со стробами. Кроме того, хотя эмуляция на основе полевых программируемых вентильных матриц обеспечивает удобство, она не может сравниться с мощностью и компактностью аналогового эмулятора с точки зрения вычислительной эффективности.

Таким образом, *цель статьи* заключается в рассмотрении ключевых аспектов эмуляции квантовых вычислительных процессов для автоматизированных систем управления на классическом ПК.

Методы: теория квантовых вычислений, методы моделирования, формализации, алгоритмизации и реализации моделей с использованием современных компьютерных средств.

Результаты

В отличие от цифрового моделирования, эмуляция на специальном оборудовании, использует преимущества присущих им возможностей распараллеливания для выполнения нескольких квантовых преобразований, в идеале завершая любую операцию со стробами за один такт, независимо от количества кубитов [3]. Хотя эмуляторы и достигают первоначальной временной сложности квантового компьютера, им все равно требуется экспоненциально больше ресурсов, чем их квантовым аналогам. Это связано с тем, что не существует классического эквивалента суперпозиции, позволяющего хранить 2^n состояний в n битах.

Эмуляция квантовых схем требует переноса концепций из квантовой физики на классические технологии. Главная цель — смоделировать квантовые вычисления таким образом, чтобы они были более гибкими и эффективными, чем программные симуляторы. Поскольку большинство квантовых алгоритмов требуют экспоненциального количества ресурсов при моделировании с помощью классических технологий, управление ресурсами является ключевым вопросом проектирования [4]. Вторая цель — эмуляция параллелизма в квантовых вычислениях с помощью ПЛИС. Наконец, желательно, чтобы инструмент моделирования был прост в использовании и чтобы построение модели не требовало значительных усилий от разработчика.

Общий процесс проектирования показан на рисунке 1.



Рис. 1. Схема моделирования квантовых схем с использованием классических технологий

На первом этапе исследования представляется целесообразным формализовать физическое представление

структуры гильбертова пространства квантового компьютера в терминах классических сигналов. Для этого необходимо провести спецификацию соответствующих математических объектов.

Состояние n -кубитного квантового компьютера может быть представлено элементом $|\psi\rangle$ 2^n -мерного гильбертова пространства \mathcal{H} , имеющего конкретную форму тензорного произведения, обозначаемых как $\mathcal{H}_0, \dots, \mathcal{H}_{n-1}$ так, что $\mathcal{H} = \mathcal{H}_{n-1} \otimes \dots \otimes \mathcal{H}_0$. Один элемент одного из n составляющих гильбертовых пространств представляет собой бит. Указание внутреннего произведения $\langle \phi | \psi \rangle$ между состояниями $|\phi\rangle$ и $|\psi\rangle$ завершает описание гильбертова пространства. Тогда нормаль $|\psi\rangle$ может быть определена как $\|\psi\| := \sqrt{\langle \psi | \psi \rangle}$.

Обозначим через $|0\rangle_i$ и $|1\rangle_i$ пару ортонормальных базисных состояний, называемых вычислительным базисом, для \mathcal{H}_i и $i \in \{0, \dots, n-1\}$. Взяв тензорное произведение этих индивидуальных базисных состояний, получаем набор из 2^n ортонормированных базисных состояний для пространства произведений \mathcal{H} . Таким образом, конкретная двоичная последовательность x_0, \dots, x_{n-1} соответствует одному базисному состоянию $|x_{n-1}\rangle_{n-1} \otimes \dots \otimes |x_0\rangle_0$. Для краткости эту двоичную последовательность можно представить в десятичной форме $x = x_0 2^0 + \dots + x_{n-1} 2^{n-1} \in \{0, \dots, 2^n - 1\}$ так, что соответствующее базисное состояние можно кратко записать как $|x\rangle$ или иногда $|x_{n-1} \dots x_0\rangle$. Пусть $\langle \phi | \psi \rangle = a_x \in \mathbb{C}$ для данного состояния $|\phi\rangle \in \mathcal{H}$ и базисного состояния $|x\rangle$. В этом случае утверждение принимает следующий вид:

$$|\psi\rangle = \sum_{x=0}^{2^n-1} a_x |x\rangle$$

Перейдем к представлению двумерного гильбертова пространства, представляющего один кубит. Состояние кубита записывается как $|\phi\rangle = a_0|0\rangle + a_1|1\rangle$ в вычислительном базисе, где $a_0, a_1 \in \mathbb{C}$. Пусть $a_0 = \text{Re}[a_0] + j\text{Im}[a_0], a_1 = \text{Re}[a_1] + j\text{Im}[a_1]$.

Цель заключается в моделировании квантового состояния как комплексного сигнала, который модулирует несущую с частотой ω_c . Другими словами, необходимо найти функцию $\psi : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{C}$ для которой:

$$s(t) = \text{Re}[\psi(t)e^{j\omega_c t}]$$

представляет собой квантовое состояние $|\phi\rangle$. Это может быть достигнуто путем амплитудной модуляции несущей (с частотой ω_c) тональным сигналом с частотой $\omega < \omega_c$.

Для синфазной и квадратурной составляющих комплексного сигнала с базовой полосой удобно использовать не синусы и косинусы, а комплексные экспоненты [5]. Таким образом имеем следующее выражение:

$$\psi(t) = a_0 e^{j\omega t} + a_1 e^{-j\omega t}$$

а также функции ϕ_0^ω и ϕ_1^ω , заданные:

$$\phi_0^\omega := e^{j\omega t}$$

$$\phi_1^\omega := e^{-j\omega t}$$

с вычислительными базисными компонентами $|0\rangle$ и $|1\rangle$, соответственно.

Подставляя эти выражения, находим, что вещественный одноквитовый сигнал s задается комплексным одноквитовым состоянием ψ следующим с помощью следующих выражений:

$$s(t) = \psi_R(t) \cos(\omega_c t) - \psi_I(t) \sin(\omega_c t)$$

где $\psi(t) = \psi_R(t) - j\psi_I(t)$ и

$$\psi_R(t) = (a_0 + a_1) \cos(\omega t) - (b_0 + b_1) \sin(\omega t)$$

$$\psi_I(t) = (b_0 - b_1) \cos(\omega t) - (a_0 - a_1) \sin(\omega t)$$

Таким образом, можно сделать вывод, что действительная и мнимая части ψ служат синфазной и квадратурной составляющими, модулирующими несущий сигнал. Принципиальная схема этого процесса показана на рисунке 2. Отображение от ψ к s можно изменить на противоположное с помощью процесса демодуляции. Как и в случае нулевых кубитов, этого можно достигнуть, поочередно умножая $s(t)$ на синфазный, $\cos(\omega_c t)$, и квадратурный, $-\sin(\omega_c t)$, сигналы, а затем выполняя низкочастотную фильтрацию.

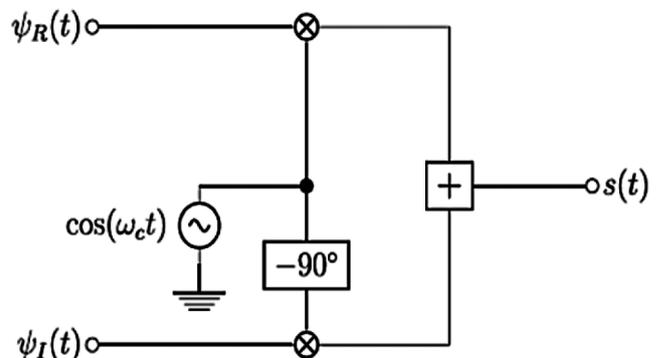


Рис. 2. Модуляция сигнала для получения s из ψ . Символ \otimes представляет собой четырехквadrанный умножитель

Обсуждение

Как известно, все вентили — это просто матричные операции над векторами состояний. Рассмотрим однокубитные Хадамардовские вентили, действующие на кубит, определенный следующим образом:

$$H|\psi_a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_r \sin(\omega t) \\ \beta_r \sin(\omega t) \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} (\alpha_r + \beta_r) \sin(\omega t) \\ (\alpha_r - \beta_r) \sin(\omega t) \end{bmatrix}$$

где подстрочный индекс в $|\psi_a\rangle$ указывает на то, что кубит находится в аналоговой области. Для простоты мнимые компоненты не показаны, так как численные выражения одинаковы как для действительной, так и для мнимой части. Операция Хадамарда над одним кубитом показана на рис. 3.

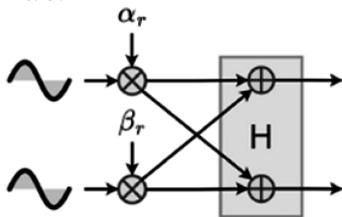


Рис. 3. Реализация вентилей Хадамарда в аналоговой области, где на входе находится синусоида с амплитудами α_r и β_r .

Аналогично, рассмотрим однокубитные X-шлюз и Z-шлюз, действующие на $|\psi_a\rangle$:

$$X|\psi_a\rangle = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_r \sin(\omega t) \\ \beta_r \sin(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta_r \sin(\omega t) \\ \alpha_r \sin(\omega t) \end{bmatrix}$$

$$Z|\psi_a\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_r \sin(\omega t) \\ \beta_r \sin(\omega t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_r \sin(\omega t) \\ -\beta_r \sin(\omega t) \end{bmatrix}$$

Схемные реализации вентилей X и Z показаны на рис. 4.

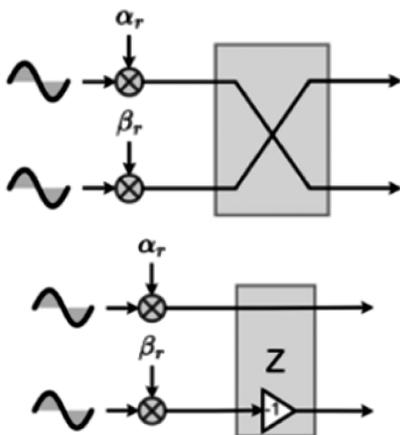


Рис. 4. Реализация X и Z вентилей в аналоговой области, где на входе находится синусоида с амплитудами α_r и β_r .

Работа с матрицей показана ниже, а реализация на уровне схемы представлена на рис. 5:

$$CNOT|\psi_a\rangle = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_r \sin(\omega t) \\ \beta_r \sin(\omega t) \\ \gamma_r \sin(\omega t) \\ \delta_r \sin(\omega t) \end{bmatrix}$$

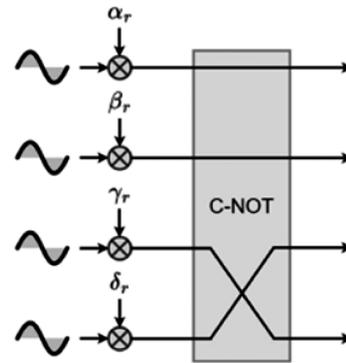


Рис. 5. Реализация затвора CNOT в аналоговой области, где на входе синусоидальные сигналы с амплитудами $\alpha_r, \beta_r, \gamma_r$ и δ_r .

На следующем этапе исследования рассмотрим эмуляцию запутывания.

Вентили, приводящие к запутыванию, требуют значительно больше ресурсов, чем вентили, в которых запутывание не происходит. Именно по этой причине эффективное моделирование квантовых вычислений затруднено на классических вычислительных устройствах [6]. Рассмотрим двухвходовые вентили CNOT и ситуацию, когда управляемый кубит находится в суперпозиции. В этом случае работа вентилей описывается следующим образом:

$$|\psi_{control}\rangle = \alpha_1|0\rangle + \beta_1|1\rangle$$

$$|\psi_{target}\rangle = \alpha_2|0\rangle + \beta_2|1\rangle$$

$$|\psi_{out}\rangle = \alpha_1\alpha_2|00\rangle + \alpha_1\beta_2|01\rangle + \beta_1\beta_2|10\rangle + \beta_1\alpha_2|11\rangle$$

В запутанном состоянии кубиты не могут быть представлены по отдельности. Для случая двух кубитов $|\psi_1\rangle$ и $|\psi_2\rangle$, когда они не запутаны, их можно формализовать как два дистриктивных кубита $|\psi_1\rangle|\psi_2\rangle$. Однако после запутывания кубиты могут быть выражены только в форме $|\psi_1\psi_2\rangle$.

И в завершении отметим, что квантовые измерения и вероятностный характер квантовых алгоритмов в настоящее время поддерживаются непосредственно с помощью комбинации аппаратных и программных средств. Из-за сложности алгоритмов квантовых измерений (которые исследуются и разрабатываются парал-

тельно) в настоящее время используется программное моделирование квантовых измерений. Однако учитывая современный уровень развития техники и наметившийся прогресс можно предвидеть возможность эмуляции квантовых измерений в аппаратных средствах, как только их алгоритмы будут разработаны и станут стабильными. Чтобы выполнить измерение аппаратным способом, достаточно, чтобы вероятности обнаружения каждого состояния были предварительно вычислены программным компонентом и сохранены в аппаратуре. Затем эти вероятности могут быть использованы в качестве весов для эмуляции случайного обнаружения состояний (см. рис. 6).

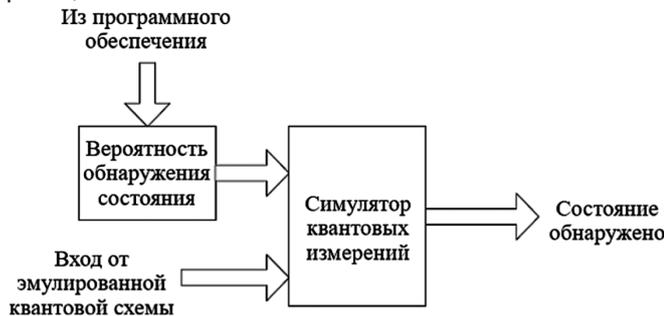


Рис. 6. Эмуляция вероятностных квантовых вычислений

Заключение

Подводя итоги проведенному исследованию, можно сделать следующие выводы. В статье рассмотрены особенности классической эмуляции квантовой системы с использованием стандартного ПК. Установлено, что квантовое состояние отождествляется с комплексным базовым сигналом с временной областью. Этот сигнал может быть представлен как два отдельных реальных сигнала (представляющих реальную и мнимую части) или использоваться для модуляции высокочастотной несущей, чтобы получить один реальный сигнал.

Эмулятор позволяет простым способом строить достаточно сложные квантовые схемы из библиотеки компонентов. В то же время он эмулирует параллелизм, присутствующий в квантовых компьютерах, путем построения параллельных путей эволюции для каждого квантового бита. Эмулятор также может включать в себя другие концепции квантовых вычислений, такие как квантовая коррекция ошибок, отказоустойчивые квантовые вычисления и методы квантовых измерений. Это будет особенно полезно при разработке практических систем для квантовых компьютеров.

ЛИТЕРАТУРА

1. Naveed Mahmud, Esam El-Araby Scaling reconfigurable emulation of quantum algorithms at high precision and high throughput // Quantum Engineering. 2019. Volume 1, Issue 2. P. 45–53.
2. Ming-Jie Tao, Ming Hua Quantum simulation of clustered photosynthetic light harvesting in a superconducting quantum circuit // Quantum Engineering. 2020. Volume 2, Issue 3. P. 111–119.
3. Gheorghe Sorin Paraoanu Engineering Dissipation with Resistive Elements in Circuit Quantum Electrodynamics // Advanced Quantum Technologies. 2021. Volume 4, Issue 11. P. 56–63.
4. Amine Zeguendry, Zahi Jarir Quantum-Enhanced K-Nearest Neighbors for Text Classification: A Hybrid Approach with Unified Circuit and Reduced Quantum Gates // Advanced Quantum Technologies. 2024. № 67. P. 190–198.
5. Gui-Long Jiang Optimal Quantum Circuits for General Multi-Qutrit Quantum Computation // Advanced Quantum Technologies. 2024. Volume 7. P. 67–75.
6. Arpita Sanyal Bhaduri, Amit Saha Circuit design for clique problem and its implementation on quantum computer // IET Quantum Communication. 2021. Volume 3, Issue 1. P. 20–9.