

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБЪЕКТОВ С ОЧЕРЕДЯМИ СИСТЕМ МАССОВОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КВАНТОВЫХ АЛГОРИТМОВ

А.В. Лазутин

sasha533.laz2015@yandex.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Современные системы массового обслуживания сталкиваются со все возрастающей сложностью управления очередями, особенно в условиях высокой нагрузки. В данной статье исследовано применение методов квантовых вычислений и гибридных алгоритмов для моделирования простых объектов с очередями, что открывает новые возможности для оптимизации производительности, снижения времени ожидания и минимизации ресурсных затрат. Для ускорения вычислений в предложенном подходе используются квантовые схемы и квантовые алгоритмы. Особое внимание уделено гибридным квантово-классическим методам, сочетающим преимущества обоих подходов. Проведенные эксперименты на симуляторе квантовых вычислений Cirq показали уменьшение времени моделирования на 25...30 % по сравнению с классическими подходами, а также продемонстрировали масштабируемость метода для крупных систем.

Ключевые слова: системы массового обслуживания, квантовые алгоритмы, моделирование очередей, инкремент, декремент, генератор случайных чисел

Введение. Системы массового обслуживания (СМО) представляют собой важный класс моделей, используемых для анализа процессов, в которых заявки или задачи поступают на обслуживание в ограниченные по ресурсам объекты — серверы, кассы, маршрутизаторы — обработчики [1, 2]. Такие системы применяются в телекоммуникациях, логистике, здравоохранении и других отраслях, где необходимо эффективно управлять потоками данных, клиентов или ресурсов [3]. Основной задачей моделирования СМО является исследование поведения очередей и времени в условиях изменяющегося потока заявок [4].

Таким образом, целью работы является разработка метода моделирования объектов с очередями в системах массового обслуживания на основе квантовых алгоритмов, обеспечивающего повышение точности прогнозирования поведения системы и эффективности ее функционирования при высокой нагрузке.

Моделирование очередей в квантовых вычислениях. В квантовых вычислениях очередь можно реализовать несколькими способами в зависимо-

сти от того, как кодируются ее элементы и состояние [5]. Рассмотрим основные подходы [6]:

Очередь как набор кубитов (прямое кодирование элементов). Позволяет представить очередь как набор кубитов, где каждый отдельный кубит соответствует одному элементу очереди. В таком случае состояние всей очереди описывается квантовым состоянием вида $|q_0 q_1 q_2 \dots q_n\rangle$, где каждый кубит хранит значение своего элемента. Операция добавления элемента (enqueue) в такую очередь выполняется путем присвоения значения первому свободному кубиту или добавление нового кубита в схему, а извлечение (dequeue) требует измерения первого кубита с последующим сдвигом всех остальных элементов, что может быть реализовано с помощью квантовых своп-операций. Основные проблемы этого подхода заключаются в большом потреблении кубитов (поскольку каждый элемент требует отдельного кубита) и высокой вычислительной сложности операций сдвига, требующих $O(n)$ квантовых операций [5, 6].

Очередь как счетчик элементов (квантовый регистр длины). В этом подходе предложено более экономично использовать квантовые ресурсы благодаря хранению не самих элементов, а лишь информации о количестве элементов в очереди. В этом случае используется отдельный квантовый регистр из k кубитов, который может представлять до $2^k - 1$ элементов. Сами данные при этом могут храниться либо в дополнительном квантовом регистре, либо в классической памяти [7]. Операции добавления и извлечения сводятся к инкременту и декременту счетчика соответственно, что может быть эффективно реализовано с помощью квантовых арифметических операций. Главное преимущество такого подхода — существенная экономия кубитов при моделировании систем, где важны только статистические характеристики очереди, а не содержимое отдельных заявок [5, 6].

Квантовая кольцевая очередь (циклический буфер на кубитах). Представляет собой квантовый аналог классической кольцевой очереди (циклического буфера). В этой реализации используется фиксированный набор кубитов для хранения данных и два дополнительных квантовых регистра — для указателей head (начала) и tail (конца) очереди. Добавление элемента производится в позицию, на которую указывает tail с последующим увеличением этого указателя (с учетом закольцованной структуры), а извлечение — из позиции head с соответствующим смещением указателя. Основное преимущество такого подхода — эффективное переиспользование квантовой памяти, однако он требует реализации механизма проверки на переполнение и работы с квантовыми указателями [5, 8].

Таким образом, для моделирования систем массового обслуживания, где важна только длина очереди, оптимален подход с квантовым счетчиком элементов. Этот подход обеспечивает минимальное использование квантовых ресурсов при сохранении функциональности для задач моделирования очередей.

Реализация квантовых алгоритмов инкремента и декремента. Рассмотрим квантовый регистр из n кубитов, представляющий двоичное число:

$$|\Psi\rangle = \otimes_{i=0}^{n-1} |q_i\rangle. \tag{1}$$

Состояние регистра соответствует целому числу

$$k = \sum_{i=0}^{n-1} q_i \cdot 2^i. \tag{2}$$

Схемы алгоритмов квантового инкремента и квантового декремента представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Данная математическая модель демонстрирует строгое соответствие между квантовыми операциями и арифметическими действиями над состоянием регистра, обеспечивая корректную работу с квантовым счетчиком элементов очереди.

Квантовый генератор случайных чисел. При моделировании систем массового обслуживания важную роль играют случайные величины, определяющие время поступления и обработки заявок. В данной работе в качестве источника случайности применяется квантовый генератор случайных чисел [9].

Квантовые генераторы случайных чисел основаны на фундаментальных свойствах квантовой механики, таких как суперпозиция и измерение квантовых состояний. Для генерации случайных битов используются кубиты, переводимые в состояние суперпозиции с помощью однокубитового квантового гейта Адамара H [5]. После применения H -гейта он переходит в состояние

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{i=0}^{2^n-1} |i\rangle, \tag{3}$$

где $\sum_{i=0}^{2^n-1} |i\rangle$ — возможные битовые комбинации от 0 до $2^n - 1$.

Представления клиентов в квантовой модели очереди. Для выбранной реализации очереди на основе квантового счетчика был принят подход статического представления клиентов. Количество клиентов и заявок фиксировано заранее и не изменяется в процессе работы модели.

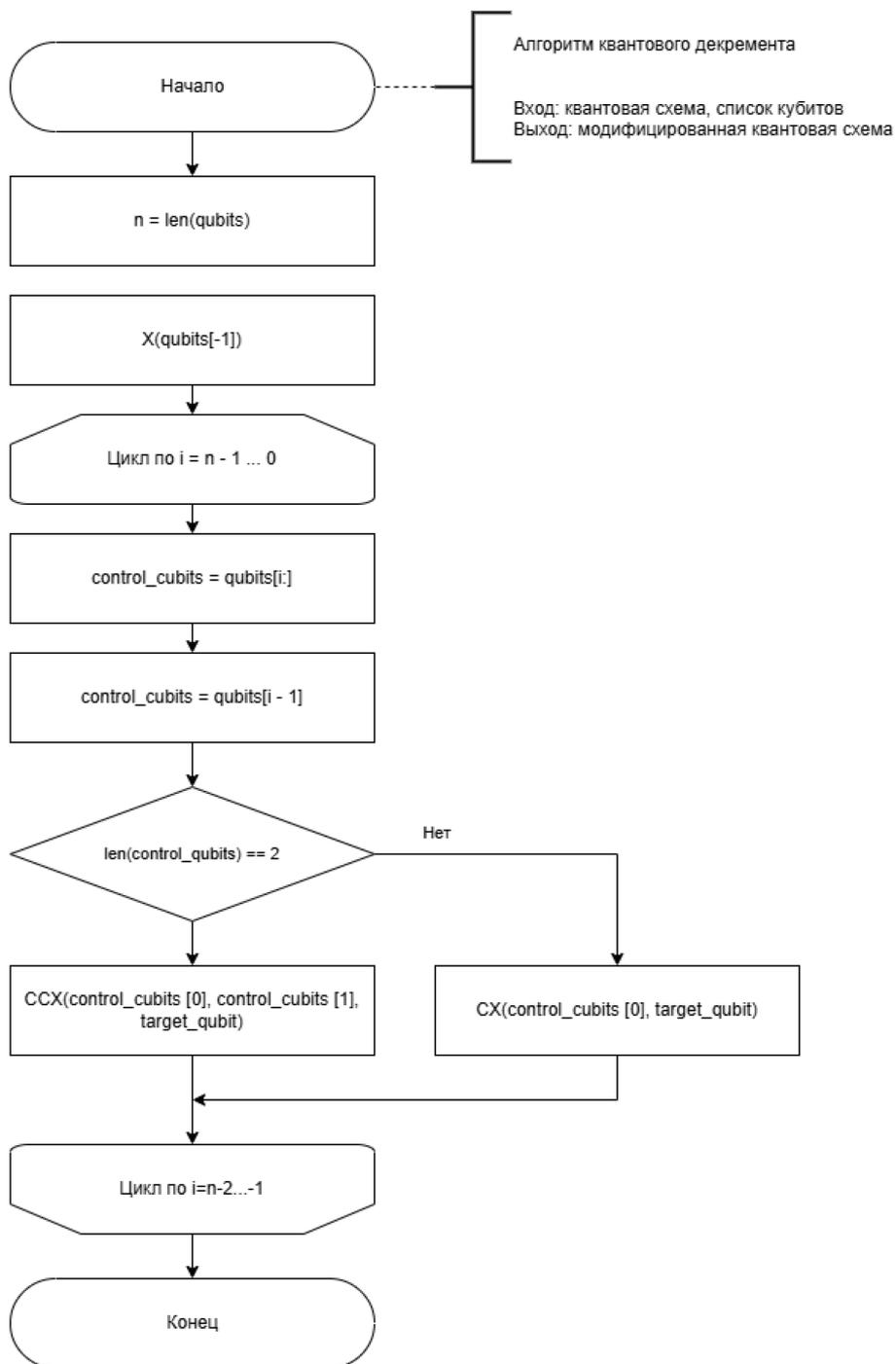


Рис. 1. Схема алгоритма квантового декремента

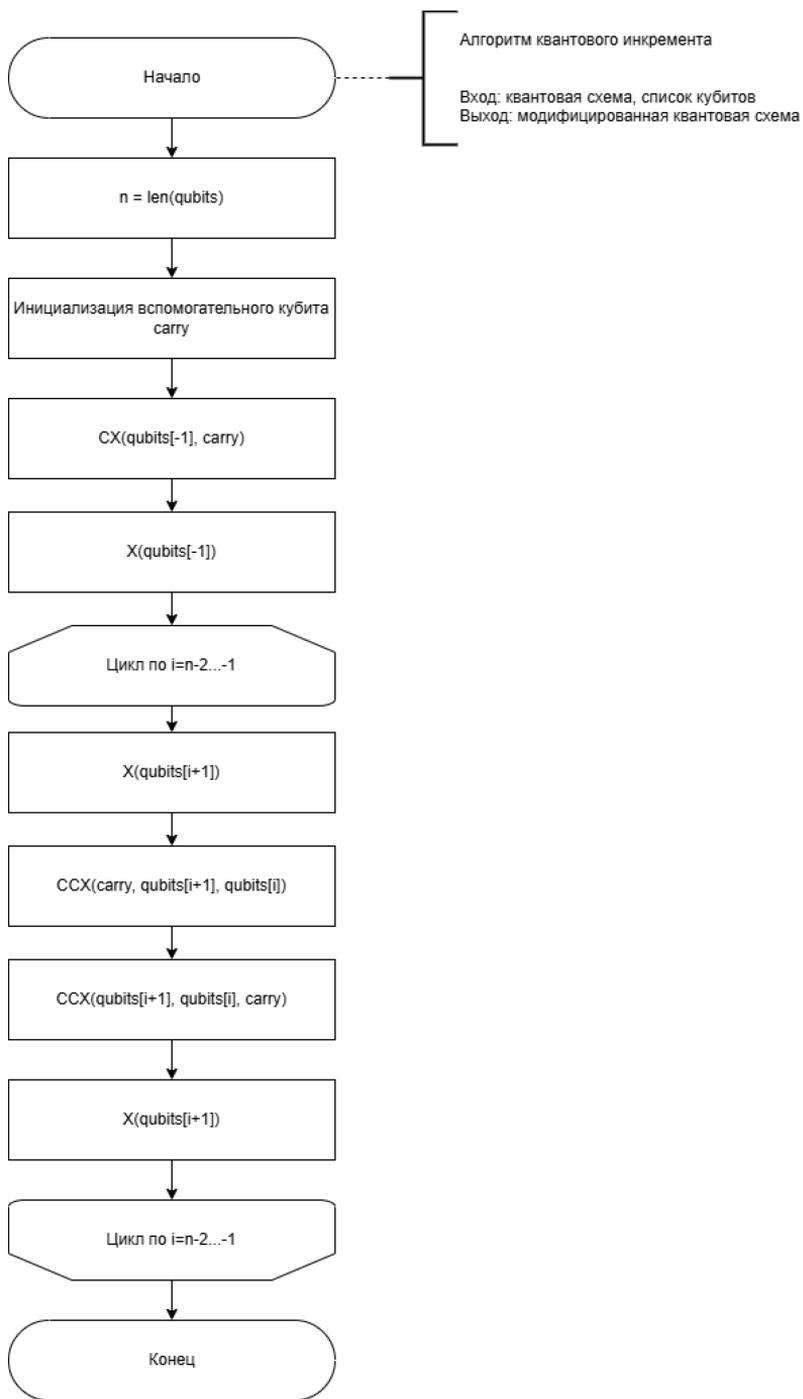


Рис. 2. Схема алгоритма квантового инкремента

Для моделирования времени между заявками используется равномерное распределение с заданным временем распределения и возможным отклонением (дельтой). Это означает, что каждая заявка поступает в очередь через фиксированный интервал времени с учетом случайных вариаций в пределах диапазона от времени. Такое распределение может быть описано следующим образом:

$$T_i = T_0 + (\Delta T - T_0)r, \quad (4)$$

где T_0 — начальное время поступления заявки; ΔT — максимальное время, на которое может отклоняться интервал; r — нормированное случайное число в диапазоне $[0, 1]$, полученное путем преобразования результата квантового генератора случайных чисел.

Таким образом, для выбранной очереди в рамках квантовых вычислений было решено использовать статическое представление клиентов с заранее заданным количеством заявок и равномерным распределением времени между ними.

Представления обработчика в квантовой модели очереди. Пусть в системе задано n обработчиков. Для каждого обработчика определяются два параметра:

– время обслуживания заявки, задаваемое в виде равномерного распределения, аналогично модели генерации времени поступления клиентов:

$$T_{\text{обсл}} \pm \Delta T. \quad (5)$$

– вероятность возврата заявки в очередь $P_{\text{ret}} \in [0, 1]$.

Для квантового представления состояния каждого обработчика используются два кубита:

– кубит состояния обработчика — представляет, находится ли обработчик в свободном или занятом состоянии. Состояние $|0\rangle$ соответствует «свободен», а $|1\rangle$ — «занят»;

– кубит возврата заявки — используется для моделирования вероятности того, что после обслуживания заявка будет возвращена в очередь.

Для реализации вероятности возврата используется унитарное преобразование, моделирующее квантовую суперпозицию на основе параметра P_{ret} . Пусть $\alpha = \sqrt{1 - P_{\text{ret}}}$, $\beta = \sqrt{P_{\text{ret}}}$. Тогда состояние кубита можно записать в виде

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (6)$$

где $|0\rangle$ — заявка не возвращается в очередь (обработка завершена), $|1\rangle$ — заявка возвращается в очередь.

Чтобы реализовать унитарное преобразование с такими амплитудами, используется следующая матрица:

$$U = \begin{bmatrix} \alpha & -\beta \\ \beta & \alpha \end{bmatrix}, \tag{7}$$

где $U \in SU(2)$ — унитарный оператор, сохраняющий нормировку. Данное преобразование применяется к кубиту возврата, после чего выполняется измерение.

Результаты исследования. В данном исследовании изучалась производительность квантовой системы обработки заявок. Основной целью работы была оценка временных характеристик системы при различных нагрузках в условиях ограниченной очереди.

Архитектура системы: два обработчика и одна очередь с фиксированной максимальной длиной 16 заявок. Изменялось количество заявок: 10, 50, 100, 300, 500, 1000, 3000. Все испытания проводились на классическом компьютере с использованием квантового симулятора Cirq [10].

Результаты проведенного моделирования для квантовой и классической схем представлены на рис. 3.

Результаты времени моделирования для квантовой системы обрабатывая заявки на 25...30 % быстрее классической. Для малого количества заявок разница времени выполнения незначительна, но при обработке от 300 заявок разница увеличивается.

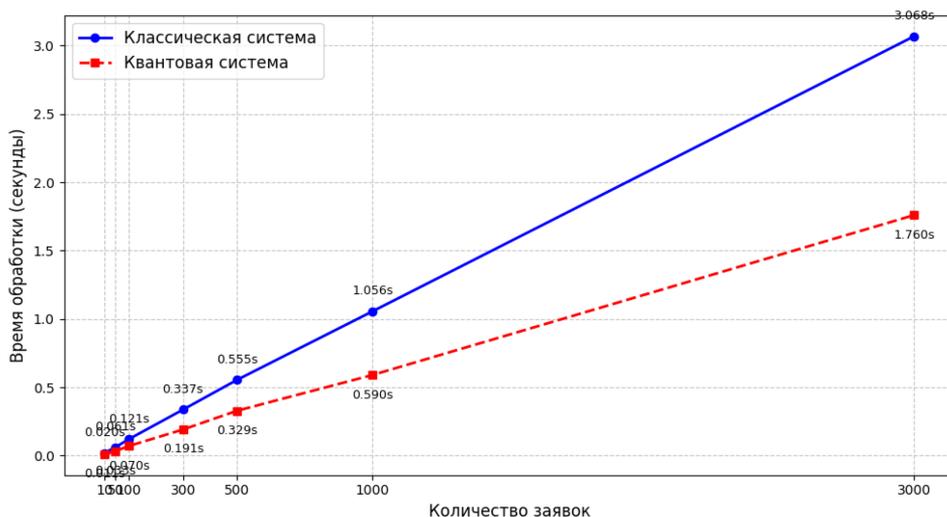


Рис. 3. Сравнение времени моделирования СМО

Основное ограничение — исследование проводилось на симуляторе. Реальные квантовые процессоры могут показать как лучшие, так и худшие результаты из-за шумов и ошибок.

Заключение. Цель работы была достигнута. Разработан подход к моделированию систем массового обслуживания с очередями на основе квантовых алгоритмов. Предложенная квантовая модель описывает вероятностные процессы поступления, обработки и возврата заявок. Программное обеспечение демонстрирует увеличение производительности на 25...30 % при обработке заявок по сравнению с классическими системами.

Литература

- [1] Бескровная Ю.Д., Петраченко Ю.М. Эффективность использования системы массового обслуживания. *Форум молодых ученых*, 2020, № 1–1, с. 504–507.
- [2] Федотов И.С. Анализ систем массового обслуживания с ограничениями: модели и исследование. *Вестник науки*, 2023, № 9, с. 125–128.
- [3] Кулик С.П. Физические основы квантовой информации. Москва, МГУ, с. 175–186. URL: <https://teach-in.ru/file/methodical/pdf/physical-foundations-of-quantum-information-M.pdf> (дата обращения 10.02.2025).
- [4] Андреев А.А., Рудаков И.В. Моделирование распределенных систем открытой инфраструктуры на основе сетей Петри. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*, 2024, № 6, с. 27–30. <https://doi.org/10.37882/2223-2966.2024.06.01>
- [5] Gavin E. *Quantum Gates*, 2024, pp. 6–58. URL: https://threeplusone.com/pubs/on_gates.pdf (дата обращения 10.02.2025).
- [6] Антонова П.В. Принципы разработки систем массового обслуживания с ограниченной очередью на платформе .NET. *Программные системы и вычислительные методы*, 2023, № 2, с. 15–27. <https://doi.org/10.7256/2454-0714.2023.2.43403>
- [7] *Введение в гибридные квантовые вычисления. Azure Quantum*. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/quantum/hybrid-computing-overview> (дата обращения 10.02.2025).
- [8] *Circular Queue / Ring Buffer / Circular Buffer*. URL: <https://iq.opengenus.org/circular-queue/> (дата обращения 10.02.2025).
- [9] Marcin M., Piotr J., Jakub N., Janusz E. Quantum generators of random numbers. *Scientific Reports*, 2021, vol. 11 (1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-95388-7>
- [10] *Cirq. Google Quantum AI*. URL: <https://quantumai.google/cirq> (дата обращения 10.02.2025).

Поступила в редакцию 20.05.2025

Лазутин Александр Владимирович — студент кафедры «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Рудаков Игорь Владимирович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Программное обеспечение ЭВМ и информационные технологии», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Лазутин А.В. Моделирование объектов с очередями систем массового обслуживания с использованием квантовых алгоритмов. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 06 (101). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/auto/1076.html>

MODELING OF OBJECTS WITH QUEUES OF QUEUING SYSTEMS USING QUANTUM ALGORITHMS

A.V. Lazutin

sasha533.laz2015@yandex.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Modern queuing systems (QMS) face increasing complexity of queue management, especially in high-load conditions. This article explores the use of quantum computing methods and hybrid algorithms for modeling simple objects with queues, which opens up new opportunities for optimizing performance, reducing waiting times and minimizing resource costs. The proposed approach uses quantum circuits and quantum algorithms to speed up calculations. Special attention is paid to hybrid quantum-classical methods that combine the advantages of both approaches. The experiments performed on the quantum computing simulator (Cirq) showed a 25–30 % reduction in simulation time compared to classical approaches, and also demonstrated the scalability of the method for large systems.

Keywords: queuing systems, quantum algorithms, queue modeling, increment, decrement, random number generator

Received 20.05.2025

Lazutin A.V. — Student of Department of Computer Software and Information Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Rudakov I.V., Ph. D. (Eng.), Associate Professor, Head of Department of Computer Software and Information Technology, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Lazutin A.V. Modeling of objects with queues of queuing systems using quantum algorithms. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 06 (101). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/icec/auto/1076.html>