

УДК 004:530.145

DOI 10.17513/snt.40622

## ОБЗОР СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ ЭМУЛЯЦИИ КВАНТОВЫХ ВЫЧИСЛЕНИЙ В АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМАХ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ПРОЦЕССОМ

Тырышкин С.Ю.

*Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Алтайский государственный технический университет имени И.И. Ползунова», Барнаул, Российская Федерация, e-mail: service.vip-spe@yandex.ru*

Квантовые вычисления становятся трансформационной вычислительной парадигмой, способной революционизировать оптимизацию проектирования и автоматизацию в широком спектре научных и инженерных дисциплин. Однако для исследования и разработки квантовых вычислений требуются существенные объемы ресурсов, поэтому особое значение на сегодняшний день приобретают возможности имитации квантовых алгоритмов. Цель статьи заключается в проведении сравнительного анализа современных методов эмуляции квантовых вычислений в автоматизированных системах управления технологическим процессом. Методы исследования включают системный и сравнительно-аналитический подходы, а также методы моделирования и контент-анализа научных публикаций. Кроме того, применялись приемы теоретического обобщения и сравнительного анализа существующих подходов к эмуляции квантовых вычислений в автоматизированных системах управления технологическими процессами. В ходе исследования представлен критический анализ вычислительных подходов для решения NP-трудных задач в автоматизированных системах управления технологическим процессом. Детально описаны достоинства и недостатки, принципы работы, ограничения и область целесообразного применения таких методов, как матричная эмуляция (метод вектора состояния), эмуляция на основе тензорных сетей, моделирование на основе стабилизаторов (Клиффордовы схемы), гибридная эмуляция (вариационные алгоритмы), метод квантовых траекторий. Обобщены реальные примеры промышленной реализации квантовой эмуляции на основе материалов компаний – технологических лидеров отрасли. Полученные результаты позволили прийти к выводу, что доминирующими на сегодняшний день являются гибридные вариационные алгоритмы. В настоящее время они выступают в качестве стандарта для решения прикладных промышленных задач. Также наблюдается четкая специализация методов эмуляции по типу решаемых задач.

**Ключевые слова:** квантовые вычисления, эмуляция, автоматизация, промышленность, управление, эффективность

## REVIEW OF MODERN METHODS FOR EMULATION OF QUANTUM COMPUTING IN AUTOMATED PROCESS CONTROL SYSTEMS

Tyryshkin S.Yu.

*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunov", Barnaul, Russian Federation, e-mail: service.vip-spe@yandex.ru*

Quantum computing is becoming a transformative computing paradigm capable of revolutionising design optimisation and automation across a wide range of scientific and engineering disciplines. However, the research and development of quantum computing requires significant resources, which is why the ability to simulate quantum algorithms is particularly important today. The purpose of this article is to conduct a comparative analysis of modern methods of emulating quantum computing in automated process control systems. The research methods include systematic and comparative-analytical approaches, as well as methods of modelling and content analysis of scientific publications. In addition, techniques of theoretical generalisation and comparative analysis of existing approaches to emulating quantum computing in automated process control systems were used. The study presents a critical analysis of computational approaches for solving NP-hard problems in automated process control systems. It describes in detail the advantages and disadvantages, operating principles, limitations, and areas of appropriate application of methods such as matrix emulation (state vector method), tensor network-based emulation, stabiliser-based modelling (Clifford circuits), hybrid emulation (variational algorithms), and the quantum trajectory method. Real-world examples of industrial implementation of quantum emulation based on materials from industry-leading technology companies are summarised. The results obtained led to the conclusion that hybrid variational algorithms are currently dominant. They are now the standard for solving applied industrial problems. There is also a clear specialisation of emulation methods according to the type of problem being solved.

**Keywords:** quantum computing, emulation, automation, industry, control, efficiency

### Введение

Автоматизация и управление технологическими процессами (АСУ ТП) являются важнейшим компонентом современных промышленных комплексов, отдельных производственных линий и конкретных опе-

раций. По мере того, как предприятия стремятся повысить продуктивность, эффективность и точность, АСУ ТП стали незаменимыми в контроле динамических процессов для достижения желаемых результатов, несмотря на воздействие внешних и вну-

тренних факторов [1]. Однако сложность, многомерность и нелинейность многих промышленных приложений представляет собой серьезные проблемы при проектировании систем управления.

Традиционные методы управления, такие как пропорционально-интегрально-дифференциальные регуляторы и модельное прогнозирующее управление, получили широкое распространение во многих отраслях промышленности. В то же время, несмотря на тот факт, что эти методы эффективны для управления линейными и умеренно сложными системами, они сталкиваются с рядом сложностей и ограничений, когда стоит задача их применения к нелинейным, крупномасштабным или высокодинамичным процессам [2]. Кроме того, потребность обеспечивать оптимизацию в режиме реального времени становится все более сложной задачей по мере роста объема и многомерности данных. В определенной мере эти запросы позволили удовлетворить алгоритмы машинного обучения (МО) и их последующие инновации, включая опорные векторные машины Кортеса и Вапника, деревья решений и ансамблевые методы, такие как случайные леса и усиление градиента. В результате существенным образом улучшилась производительность АСУ ТП в практических приложениях. Однако ни традиционные методы управления, ни технологии МО в полной мере не отвечают потребностям АСУ ТП в приложениях Индустрии 4.0 и 5.0.

Проектирование систем управления на основе классических вычислительных архитектур ограничено их последовательным характером, что снижает способность этих методов обрабатывать высокоразмерные данные в режиме реального времени. В свою очередь алгоритмы МО не подходят из-за фундаментальных требований промышленного управления: предсказуемости, надежности и строгой безопасности.

В данном контексте следует отметить, что квантовые вычисления, которые являются новой вычислительной парадигмой в информационных технологиях после эпохи Мура, становятся своевременным и дальновидным вкладом в промышленную автоматизацию, соединяя наиболее революционные инновации современной эпохи. Сравнительная характеристика, наглядно демонстрирующая превосходство и эффективность на сегодняшний день квантовых вычислений для АСУ ТП, представлена в табл. 1.

Таким образом, существенное ускорение, которое обеспечивают квантовые вычисления по сравнению с классическими методами для различных приложений, та-

ких как криптоанализ, решение задач с ограничениями, комбинаторная оптимизация, вызывает значительный научно-исследовательский интерес применимости и сравнительной эффективности данных технологий в задачах АСУ ТП, что послужило основанием для выбора темы данной статьи.

Последние достижения в области эмуляции на основе ПЛИС, которые направлены на простые схемы с ограниченной запутанностью, такие как Клиффорд + T и наборы вращательных вентилях, а также базовые алгоритмы (поиск Гровера и факторизация Шора), описывают в своих публикациях Eid Aldawsari, Raja Selvarajan [3], Junjie Wu, Yong Liu [4], Giuliana Siddi Moreau, Lorenzo Pisani [5]. Работы таких авторов, как С.Х. Ахмед, направлены на анализ преимуществ использования квантовых подходов в прикладных задачах искусственного интеллекта [6].

Анализ архитектур, использующих конвейерное выполнение, которые открывают широкие возможности для оптимизации пропускной способности центрального процессора, входит в круг научных интересов С.В. Ульянова, Н.В. Рябова, П.В. Зрелова [7], А.С. Семенова [8], Colin Burdine, Nora Bauer [9].

Анализ существующих на сегодняшний день публикаций и разработок демонстрирует высокий интерес ученых к рассматриваемой проблематике, однако квантовая технология в основном работает на уровне схем и логики, поэтому многие вопросы не нашли своего должного решения и полного освещения в научно-экспертной литературе. Так, например, до сих пор отсутствует встроенная среда реального времени, которая одновременно эмулирует и обучает параметризованные вариационные квантовые схемы на месте в высокочастотном контуре управления, что представляет собой критический пробел для динамических задач квантового машинного обучения в областях, чувствительных к задержкам, таких как промышленное управление. Кроме того, несмотря на значительные успехи в области эмуляции квантовых схем на основе ПЛИС, большинство существующих работ сосредоточено либо на конкретных квантовых алгоритмах (например, QFT, Гровера и QAOA), либо на крупномасштабных автономных симуляционных платформах, разработанных с целью обеспечения пропускной способности, а не задержки. Эти реализации, хотя и эффективны для проверки квантовых протоколов или ускорения распределения квантовых ключей, часто не обладают адаптивностью, необходимой для динамических задач обучения.

Таблица 1

Сравнительный анализ вычислительных подходов  
для решения NP-трудных задач в АСУ ТП\*

Параметр сравнения	Классические методы АСУ ТП (MPC, MILP)	Эмуляция квантовых вычислений (ЭКВ)	Физические квантовые компьютеры (ПКИ)
Основная задача	Оптимизация технологических параметров и графиков работы оборудования в реальном времени	Высокоточная оптимизация многомерных моделей технологических процессов (30–100 переменных)	Глобальная оптимизация распределенных производственных и логистических систем
Принцип решения	Численные методы, аппроксимация, эвристика	Симуляция квантовой суперпозиции и запутанности на классических ГП/ТП/кластерах	Прямое использование квантовых эффектов (алгоритмы QAOA, VQE)
Предел масштабируемости (для NP-трудных задач)	Низкий ( $N < 20\text{--}30$ переменных) для точного решения. Тысячи переменных для субоптимальных (эвристических) решений	Средний (ограничен памятью) ( $N < 40\text{--}50$ эмулируемых кубитов) для точной эмуляции	Высокий (теоретически). Ограничен когерентностью и шумом ( $N \approx 100\text{--}500+$ кубитов в эру NISQ)
Время решения (задача $N = 30$ )	Часы/минуты (часто неприемлемо для РТО)	Минуты/секунды (зависит от мощности ГП/ТП)	$< 1$ секунды (теоретически)
Качество решения	Локальный оптимум (риск «застревания» в субоптимальном решении)	Глобальный оптимум (позволяет исследовать все пространство состояний)	Глобальный оптимум (вероятностный, требует коррекции ошибок)
Готовность к интеграции в АСУ ТП	Полностью интегрированы	Технология апробирована, требует специализированных вычислителей	Концепция, лабораторные образцы, не готовы к промышленной эксплуатации
Актуальность/роль	Текущий стандарт. Решение 99% задач, но с компромиссом (скорость/точность)	Инструмент разработки и верификации квантовых алгоритмов для АСУ ТП в переходный период (до появления стабильных ПКИ)	Будущий стандарт

\*MPC (Model Predictive Control) – предиктивное управление на основе модели, MILP (Mixed-Integer Linear Programming) – смешанное целочисленное линейное программирование, RTO (Real-Time Optimization) – оптимизация в реальном времени, ГП/ТП графический процессор / тензорный процессор (GPU/TPU), QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm) – квантовый приближенный алгоритм оптимизации, VQE (Variational Quantum Eigensolver) – вариационный квантовый алгоритм поиска собственных значений, NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum) – эпоха «шумных» квантовых компьютеров промежуточного масштаба.

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования

**Цель исследования** – проведение сравнительного анализа современных методов эмуляции квантовых вычислений в АСУ ТП.

#### Материалы и методы исследования

В качестве исходной базы исследования использованы современные научные публикации, нормативно-технические документы и результаты экспериментальных проектов в области квантовых вычислений и автоматизированных систем управления технологическими процессами. Методологическая основа опирается на системный подход, обеспечивающий целостное рассмотрение взаимодействия квантовых вычислительных методов и архитектуры промышленных АСУ ТП. В работе применены методы сравнительно-аналитического анализа, мо-

делирования, а также структурно-функциональный и контент-анализ отечественных и зарубежных источников за 2020–2025 гг. Для интерпретации результатов использовались методы теоретического обобщения и логического моделирования взаимосвязей между вычислительными и технологическими подсистемами.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Эмуляторы, служащие программными аналогами квантового процессора, играют важную роль в АСУ ТП и, хотя они не в состоянии воспроизводить квантовый процессор с большим количеством кубитов из-за ограничений памяти, они хорошо подходят для исследования квантовых

алгоритмов в меньших масштабах [10]. Это дает ценную отправную точку. Тестирование с помощью небольших задач позволяет быстро исключить неправильные подходы, экономя время и направляя разработку более эффективным образом. Реальные проекты продемонстрировали это преимущество. Например, в задаче оптимального распределения грузовых контейнеров эмуляторы помогли отличить подходы, которые можно было перенести на реальный квантовый процессор, от тех, которые не подходили для этого [11].

В настоящее время наработан уже достаточно широкий спектр методов эмуляции квантовых вычислений, классифицируемых по различным признакам. Наиболее распространенной категорией являются эмуляторы с полным векторным состоянием, которые обычно используют

ся для эмуляции квантовых машин общего назначения [12]. Другой группой методов, способных воспроизводить универсальные квантовые вычисления, являются эмуляторы на основе тензорных сетей и эмуляторы на основе диаграмм решений. Эмуляторы на основе тензорных сетей требуют меньше места, чем первые, в обмен на точность. Чем более точные результаты необходимы для АСУ ТП, тем большие объемы памяти требуются. Диаграммы решений имеют тот же недостаток, поскольку они являются стохастическими и не будут иметь такой же точности, как эмуляторы векторного состояния. Существуют также эмуляторы матрицы плотности, способные делать все то же самое, что и эмуляторы полного векторного состояния, но при этом они могут моделировать шум, что делает их менее эффективными [13].

Таблица 2

Сравнительный анализ методов эмуляции квантовых вычислений в АСУ ТП

Метод эмуляции	Принцип работы	Преимущества	Ограничения	Оценка пригодности	Область целесообразного применения
Матричная эмуляция (метод вектора состояния)	Использование матричных операций для моделирования полного вектора квантового состояния и вентилей	Высокая точность вычислений; воспроизводимость результатов; универсальность	Экспоненциальный рост требований к памяти ( $O(2^N)$ ). Непригодна для $N > 40-50$ кубит	Низкая (из-за памяти)	Верификация и отладка базовых логических блоков или сверхмалых квантовых сенсоров перед их интеграцией в контур АСУ ТП
Эмуляция на основе тензорных сетей	Сокращение размерности состояния за счет разложений по тензорным сетям	Эффективна при низкой запутанности; значительно снижает требования к памяти и объем вычислений	Сложность растет экспоненциально с ростом квантовой запутанности	Высокая	Решение задач комбинаторной оптимизации (например, составление графиков ТОиР, логистика) с локально-связанной или одномерной структурой (например, конвейер)
Моделирование на основе стабилизаторов (Клиффордовы схемы)	Моделирование схем, состоящих только из Клиффордовых вентилей (CNOT, H, S)	Полиномиальная сложность ( $O(poly(N))$ ). Чрезвычайно быстрый метод, масштабируется на тысячи кубитов	Не является универсальным, не может моделировать не-Клиффордовы вентили	Высокая (в нише)	Тестирование и отладка классического управляющего контура АСУ ТП во взаимодействии с квантовым сопроцессором
Гибридная эмуляция (вариационные алгоритмы)	Эмуляция малой квантовой пробной схемы, управляемой классическим оптимизатором (внешний контур АСУ ТП)	Позволяет решать практические задачи оптимизации. Интегрируется с существующей логикой АСУ ТП	Качество решения сильно зависит от классического оптимизатора и пробной схемы	Очень высокая	Задачи оптимизации в реальном времени, подбор оптимальных параметров контроллеров АСУ ТП, оптимизация производственных планов
Метод квантовых траекторий	Статистическое усреднение по большому числу «квантовых траекторий» (выборки)	Низкие требования к памяти. Лучший метод для моделирования шума и декогеренции	Результат является статистической оценкой (вероятностный)	Средняя	Анализ отказоустойчивости квантовых алгоритмов и сенсоров в условиях реальных промышленных шумов (ЭМ-помехи, вибрации) на объекте АСУ ТП

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.



Таблица 3

Сравнительная характеристика вычислительных ресурсов  
и масштабируемости методов эмуляции квантовых вычислений

Метод эмуляции	Требуемые ресурсы	Вычислительная сложность (масштабируемость)	Точность и моделирование шума
Матричная эмуляция	Оперативная память. Требуется $O(2^N)$ для хранения вектора состояния	Экспоненциальная. Время выполнения одного вентиля – $O(2^N)$ . Время полной эмуляции – $O(M \times 2^N)$	Детерминированная (идеальная). Моделирование шума (через матрицы плотности) возможно, но увеличивает затраты до $O(4^N)$
Эмуляция на тензорных сетях	Оперативная память и ЦП/ГП. Затраты зависят не от $N$ , а от ранга тензора (меры запутанности)	Зависит от запутанности: – для низкой (например, одномерные цепочки) – близка к полиномиальной; – для высокой (например, случайные схемы) – экспоненциальная	Детерминированная (идеальная). Моделирование шума (через тензорные сети операторов) возможно, но вычислительно сложно
Моделирование на стабилизаторах	ЦП. Требования к памяти полиномиальные, $O(poly(N))$	П о л и н о м и а л ь н а я ( $O(poly(N, M))$ ). Самый быстрый метод для своего (неуниверсального) класса схем	Детерминированная (идеальная). Неприменимо для моделирования шума общего вида, так как не может выполнять не-Клиффордовы операции
Гибридная эмуляция	Комбинация: 1. Классический оптимизатор (ЦП). 2. Эмулятор квантовой схемы (ГП)	Определяется числом итераций ( $K$ ) классического оптимизатора. Общее время: $O(K \times T_{схемы})$	Алгоритмическая погрешность. Эмулятор точен, но сам метод (VQE/QAOA) несет риск сходимости к локальному минимуму
Метод квантовых траекторий	Время ЦП/ГП. Требования к памяти для одной траектории $O(2^N)$	Определяется числом выборок ( $R$ ) для достижения сходимости. Общее время: $O(K \times T_{схемы})$	Стохастическая (вероятностная). Метод специально предназначен для моделирования шума. Статистическая ошибка уменьшается с ростом $K$

Примечание: составлена автором на основе полученных данных в ходе исследования.

Для реализации эмуляторов с максимально возможным количеством запутанных кубитов и поддержкой максимально возможного количества операций используются методы разреженных матриц или разложение квантовой схемы на более мелкие схемы для выполнения распределенных вычислений [14].

Учитывая широкий спектр методов эмуляции, в табл. 2 представлены результаты сравнительного анализа наиболее известных из них с точки зрения их возможностей и ограничений, а также применимости к задачам АСУ ТП.

Сравнительный анализ, представленный в табл. 2, позволяет сделать следующие выводы.

Гибридные методы для целей АСУ ТП являются наиболее перспективными. Гибридная эмуляция, использующая вариационные алгоритмы (например, VQE или QAOA), обладает наивысшей пригодностью. Она напрямую решает практические задачи (оптимизация в реальном времени, настройка регуляторов, планирование)

и рассчитана на интеграцию с существующей классической логикой управления.

Матричная эмуляция мало пригодна для реальных задач. Из-за экспоненциальных требований к памяти матричный метод (симуляция полного вектора состояния) не может использоваться для решения сколько-нибудь масштабных производственных задач. Данный метод подходит для лабораторной проверки и верификации сверхмалых компонентов.

Методы стабилизаторов и квантовых траекторий критически важны не для решения задач АСУ ТП, а для обеспечения ее работоспособности. Моделирование на стабилизаторах позволяет отладить классическую часть управляющей системы, а метод траекторий – оценить, как реальные промышленные помехи (шум, декогеренция) повлияют на точность и стабильность квантового контура.

Тензорные сети хорошо подходят для решения структурированных задач с локальными взаимодействиями (например, моделирование процессов на конвейере или в линейных производственных цепочках).

Таблица 4

Примеры применения эмуляции квантовых вычислений  
для решения задач АСУ ТП в разных отраслях промышленности

Отрасль промышленности	Решаемая задача АСУ ТП	Тип задачи	Метод эмуляции	Компания	Научно-техническая цель
Автомоблестроение	Оптимизация траектории роботов-сварщиков на конвейере	Комбинаторная оптимизация (задача коммивояжера)	Гибридная эмуляция (алгоритм: QAOA)	Volkswagen, BMW	Верификация алгоритма; поиск оптимальной траектории (исключающей столкновения), превосходящей по качеству решения классических эвристик
Нефтехимия и фармацевтика	Моделирование новых катализаторов; разработка новых материалов/лекарств	Моделирование молекулярной динамики (квантовая химия)	Гибридная эмуляция (алгоритм: VQE)	BASF, ExxonMobil, Dow, Merck	Моделирование основного энергетического состояния молекулярных систем, для которых классические расчеты вычислительно затруднены
Аэрокосмическая промышленность	Оптимизация графика загрузки/разгрузки спутников; оптимизация аэродинамического профиля крыла	Комбинаторная оптимизация (планирование), вычислительная гидродинамика (CFD)	Гибридная эмуляция (алгоритм: QAOA)	Airbus, Boeing, Lockheed Martin	Решение задач календарного планирования высокой размерности ( $N > 10000$ ). Поиск оптимальных решений в задачах CFD
Энергетика	Оптимизация потоков в энергосистеме	Комбинаторная оптимизация (смешанная целочисленная)	Гибридная эмуляция (QAOA)/Эмуляция на тензорных сетях	Shell, Equinor, RWE	Разработка методов оптимизации режимов работы энергосистемы для минимизации затрат и обеспечения балансировки нагрузки
Логистика	Оптимизация маршрутов автономных транспортных средств на складе	Комбинаторная оптимизация	Эмуляция на тензорных сетях (для QAOA)	DHL	Демонстрация масштабируемости алгоритма для решения задач, превосходящих по размерности возможности эмуляции на основе полного вектора состояния

Примечание: составлена авторами на основе полученных данных в ходе исследования.

Учитывая вышеизложенное, на следующем этапе исследования представляется целесообразным провести сравнительную характеристику методов эмуляции квантовых вычислений в АСУ ТП по их фундаментальным вычислительным затратам, асимптотической сложности (масштабируемости) и способности моделировать ошибки (шум) (табл. 3).

Данные, приведенные в табл. 3, свидетельствуют о том, что выбор метода определяется компромиссом между универсальностью, масштабируемостью и способностью моделировать шум.

Матричная эмуляция, являясь детерминированным и универсальным методом, демонстрирует наихудшую масштабируемость. Ее применение ограничивается экспоненциальным ростом требований к памя-

ти  $O(2^N)$ , что делает ее непригодной для систем размером более 40–50 кубит. Моделирование шума (через матрицы плотности) возможно, но увеличивает затраты до  $O(4^N)$ .

Эмуляция на тензорных сетях предлагает решение проблемы памяти, так как ее затраты зависят от квантовой запутанности, а не напрямую от числа кубитов ( $N$ ). Для задач с низкой запутанностью (например, 1D-цепочки или некоторые задачи оптимизации) сложность может быть близка к полиномиальной, но для хаотичных схем с высокой запутанностью она также становится экспоненциальной [15].

Моделирование на стабилизаторах является полиномиально-быстрым ( $O(\text{poly}(N, M))$ ), но строго ограничено не-универсальными (Клиффордовыми) схемами. Это специализированный инструмент,

непригодный для решения общих задач оптимизации, но критически важный для тестирования систем коррекции ошибок.

Гибридная эмуляция и метод квантовых траекторий являются итерационными подходами. Их общая сложность зависит от числа итераций ( $K$ ), умноженного на сложность эмуляции одного шага (которая часто сама по себе экспоненциальна,  $O(M \times 2^N)$ ). Ключевое различие в том, что метод траекторий специально предназначен для стохастического анализа шума (его точность растет с числом выборок  $R$ ), тогда как гибридный метод решает задачу оптимизации (его точность зависит от сходимости классического оптимизатора).

Безусловно, значительный исследовательский интерес представляет не только академическая плоскость методов эмуляции, но и их практическое использование, результаты развертывания в конкретных промышленных приложениях. Это в итоге позволит оценить результаты применения методов на практике, их совместимость и способность решать реальные задачи АСУ ТП. С этой целью в табл. 4 систематизирован опыт ведущих мировых промышленных компаний, которые уже сегодня используют конкретные методы эмуляции для решения прикладных задач в своих технологических процессах.

Анализ практических примеров использования квантовой эмуляции в промышленных задачах АСУ ТП позволяет отметить следующее.

Как и в предыдущих вариантах сравнения методов эмуляции, доминирующими являются гибридные вариационные алгоритмы. В настоящее время они выступают в качестве стандарта для решения прикладных промышленных задач. По мнению автора, это обусловлено их природой: они изначально создавались для работы на доступных (или эмулируемых) квантовых процессорах малой и средней размерности (эра NISQ), используя классический оптимизатор, что идеально подходит для существующей архитектуры АСУ ТП.

Также на сегодняшний день наблюдается четкая специализация методов эмуляции по типу решаемых задач, например:

- VQE (вариационный квантовый алгоритм поиска собственных значений) используется для задач квантового моделирования (нефтехимия, фармацевтика), где целью является поиск основного состояния молекулы;

- QAOA (приближенный квантовый алгоритм оптимизации) является универсальным инструментом для комбинаторной оптимизации в самых разных приложениях

(логистика, планирование, маршрутизация роботов, оптимизация энергосетей).

### Заключение

Методы эмуляции квантовых вычислений являются фундаментальным инструментом в квантовых вычислениях. Они позволяют проводить тщательную разработку, всестороннее тестирование и добиваться значительного прогресса перед развертыванием на квантовом оборудовании. Кроме того, благодаря им обеспечивается прозрачность, гибкость и возможности, которые имеют решающее значение для продвижения внедрения технологий, исследований и разработок в этой области.

В статье проведен сравнительный анализ различных методов эмуляции для решения задач АСУ ТП, в частности рассмотрены такие методы, как матричная эмуляция, эмуляция на основе тензорных сетей, моделирование на основе стабилизаторов, гибридная эмуляция, метод квантовых траекторий. Характеристика методов осуществлялась с точки зрения их преимуществ и ограничений, пригодности, а также области целесообразного использования. Кроме того, отдельное внимание уделено фундаментальным вычислительным затратам методов, их асимптотической сложности (масштабируемости) и способности моделировать ошибки (шум). Представлены существующие на сегодняшний день успешные примеры применения эмуляции квантовых вычислений в различных отраслях промышленности.

### Список литературы

1. Тырышкин С.Ю. Исследование аналоговой эмуляции квантовых вычислений посредством квадратурной модуляции // Автоматизация. Современные технологии. 2025. Т. 79. № 7. С. 325–330. DOI: 10.36652/0869-4931-2025-79-7-325-330. EDN: LXROGR.
2. Weiwei Li, Chunbo Duan, Ying Wei, Hui Xu. Advancements in flexible memristors for neuromorphic computing: materials, mechanisms, and applications in synaptic emulation // FlexMatEarly. 2025. Vol. 45. P. 98–108. DOI: 10.1002/flm2.70012.
3. Alghadeer M., Aldawsari E., Selvarajan R., Alutaibi Kh., Kais S., Alharbi F.H. Psitrum: An open-source simulator for universal quantum computers // IET Quantum Communication. 2024. DOI: 10.1049/qtc2.12101. EDN: SDRKYT.
4. Siddi Moreau G., Pisani L., Profir M., Podda C., Leoni L., Cao G. Quantum Artificial Intelligence Scalability in the NISQ Era: Pathways to Quantum Utility // Advanced Quantum Technologies. 2025. Vol. 8. Is. 10. P. 51–58. DOI: 10.1002/qute.202400716.
5. Wu Ju, Liu Y. Benchmarking Quantum Computational Advantages on Supercomputers // Advanced Quantum Technologies. 2024. Vol. 7. Is. 11. DOI: 10.1002/qute.202400143. EDN: PDUCHJ.
6. Ахмед С.Х. Сравнение классических подходов машинного обучения с гибридными квантовыми подходами в прикладных задачах // Моделирование и анализ данных.

2023. Т. 13. № 3. С. 96–112. DOI: 10.17759/mda.2023130307. EDN: MOUDRW.

7. Ульянов С.В., Рябов Н.В., Зрелов П.В., Иванцова О.В., Кореньков В.В. Оценка возможностей классических компьютеров при реализации симуляторов квантовых алгоритмов // Программные продукты и системы. 2022. № 4. С. 618–630. DOI: 10.15827/0236-235X.140.618-630. EDN: JGTUFU.

8. Семенов А.С. Моделирование состояний Белла для программной реализации квантового симулятора // Труды МАИ. 2024. № 134. EDN: AKIJNU.

9. Burdine C., Bauer N., Siopsis G., Blair E.P. Efficient Simulation of Open Quantum Systems on NISQ Trapped-Ion Hardware // Advanced Quantum Technologies. 2025. DOI: 10.1002/qute.202400606. EDN: JANFUZ.

10. Li Ju., Lei H., Wang K., Li X., Chen Zh., Lam S., Tu X., Man Ka.L., Zhao Ch. Quantum Dot-Enhanced Dual-Modality Heterojunction Optoelectronic Synapse for Neuromorphic Computing // Advanced Optical Materials. 2025. Vol. 13. № 13. DOI: 10.1002/adom.202403474. EDN: NFEUHQ.

11. Ходченков В.Ю. Векторно-матричная модель вычислений – принципы построения и обработки // Системы компьютерной математики и их приложения. 2024. № 25.

С. 168–173. EDN: SUWCBR. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=74211514> (дата обращения: 13.12.2025).

12. Nguyen H.T., Usman M., Buyya R. iQuantum: A toolkit for modeling and simulation of quantum computing environments // Software – Practice and Experience. 2024. Vol. 54. Is. 6. P. 1141–1171. DOI: 10.1002/spe.3331. EDN: ZWFZAB.

13. Баскаков П.Е., Хабовец Ю.Ю., Пилипенко И.А., Кравченко В.О., Черкесова Л.В. Инструменты для выполнения и эмуляции квантовых вычислений // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. 2020. Т. 18. № 2. С. 43–53. DOI: 10.25205/1818-7900-2020-18-2-43-53. EDN: UPDTVJ.

14. Camps D., Lin L., Van Beeumen R., Yang Ch. Explicit Quantum Circuits for Block Encodings of Certain Sparse Matrices // SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications. 2024. Vol. 45. Is. 1. P. 801–827. DOI: 10.1137/22m1484298. EDN: ZMRLEH.

15. Oshima Kazuto A Novel Procedure for Generating Energy Eigenstates from Physical States by Classically Emulated Quantum Simulation: The Hydrogen Molecule as an Example // IET Quantum Communication. 2025. Vol. 6. Is. 1. P. 240–249. DOI: 10.1049/qtc2.70021.

**Конфликт интересов:** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The author declares that there is no conflict of interest.