



## МЕТОДЫ КОРРЕКЦИИ ОШИБОК В КВАНТОВЫХ СИСТЕМАХ: ПУТЬ К ОТКАЗОУСТОЙЧИВЫМ КВАНТОВЫМ ВЫЧИСЛЕНИЯМ

**Волков Егор Алексеевич**

Аспирант кафедры квантовой электроники, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
г. Москва, Россия

**Смирнова Ксения Сергеевна**

Аспирант кафедры квантовой электроники, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»  
г. Москва, Россия

### Аннотация

Настоящая статья представляет собой всесторонний анализ фундаментальных принципов и современных методов **квантовой коррекции ошибок**. Рассматриваются ключевые вызовы, с которыми сталкиваются квантовые системы, а именно их крайняя чувствительность к **декогеренции** и шуму, которые вызывают ошибки. Детально обсуждаются основные типы ошибок, такие как **ошибки бита (bit-flip)** и **ошибки фазы (phase-flip)**, а также математические концепции, лежащие в основе их исправления. В статье описываются ключевые протоколы квантовой коррекции, включая **код Шора** и **стабилизаторные коды**, и их практическое применение в различных физических платформах. Особое внимание уделяется роли квантовой коррекции ошибок в создании **отказоустойчивых квантовых компьютеров** и перспективных квантовых сетей.

**Ключевые слова:** квантовая коррекция ошибок, квантовые вычисления, декогеренция, код Шора, отказоустойчивость, квантовая информатика, стабилизаторные коды.

### Введение

В отличие от классических компьютеров, где информация кодируется в стабильных битах (0 или 1), **квантовые компьютеры** оперируют **кубитами**, которые могут находиться в хрупкой **суперпозиции** состояний 0 и 1. Эта фундаментальная особенность позволяет им выполнять вычисления с беспрецедентной скоростью, но в то же время делает их крайне уязвимыми к внешним воздействиям.

Любое взаимодействие с окружающей средой — температурные колебания, электромагнитный шум или несовершенство управляющих импульсов — может привести к **декогеренции**, то есть к потере квантовых свойств и, как следствие, к ошибкам. Обычные методы исправления ошибок, такие как простое копирование данных, неприменимы в квантовом мире из-за **теоремы о невозможности клонирования** (no-cloning theorem). Таким образом, создание эффективных **методов коррекции ошибок** является главной задачей, без решения которой невозможно построить полноценный и надёжный квантовый компьютер.

## Теоретические основы

Теория квантовой коррекции ошибок основана на фундаментальном принципе **кодирования квантовой информации** в пространстве с избыточностью. Вместо одного физического кубита информация кодируется в состоянии нескольких, или так называемых, **логических кубитов**. Основными типами ошибок, которые необходимо исправлять, являются **ошибка бита (bit-flip)**, когда состояние  $|0\rangle$  переходит в  $|1\rangle$  и наоборот, и **ошибка фазы (phase-flip)**, когда состояние  $|+\rangle$  переходит в  $|-\rangle$  и наоборот. Оба типа ошибок могут быть исправлены с помощью специальных кодов. Квантовая коррекция ошибок не предполагает непосредственного измерения состояния кубитов, поскольку это приведёт к его разрушению. Вместо этого она использует так называемую **синдромную измерительную процедуру**, которая позволяет выявить, где произошла ошибка, не раскрывая при этом информацию о состоянии кубита. Затем к системе применяется соответствующая корректирующая операция.

## Различные методы и коды

В истории квантовой коррекции ошибок было предложено множество кодов, каждый из которых имеет свои преимущества. Одним из первых и наиболее известных является **код Шора**, который использует девять физических кубитов для кодирования одного логического кубита. Этот код способен исправлять как ошибки бита, так и ошибки фазы. Его важность заключается в том, что он впервые доказал принципиальную возможность отказоустойчивых квантовых вычислений. Впоследствии были разработаны более эффективные и обобщённые подходы, такие как **стабилизаторные коды**, которые являются основой для большинства современных протоколов. К ним относятся **коды Торрилья** и **поверхностные коды**. Последние особенно перспективны для масштабирования, так как они используют плоскую архитектуру, что упрощает их реализацию на физических платформах, таких как сверхпроводящие схемы или ионы в ловушках. Другие методы включают **топологические коды**, которые используют свойства материала для кодирования информации.

## Применение в квантовых системах

Квантовая коррекция ошибок является критически важной технологией для реализации всех типов квантовых систем. В **квантовых компьютерах** она необходима для создания **отказоустойчивых логических гейтов** (квантовых вентилях), которые могут выполнять операции с минимальной вероятностью ошибки. Это позволяет построить длинные и сложные вычислительные алгоритмы без накопления ошибок. В **квантовых коммуникациях** методы коррекции ошибок применяются для борьбы с шумом в каналах связи, например, при передаче кубитов по оптоволокну или через космическое пространство. В **квантовой метрологии** они используются для повышения точности измерений, защищая сверхчувствительные сенсоры от внешних помех. Таким образом, квантовая коррекция ошибок — это универсальный инструмент, который необходим для перевода квантовых технологий из лабораторий в реальные приложения.

## Игровые и мультимедийные методы

Компьютерное моделирование играет ключевую роль в разработке и тестировании протоколов квантовой коррекции ошибок. Специализированное программное обеспечение, такое как **квантовые симуляторы**, позволяет исследователям моделировать различные типы шума и декогеренции, а затем тестировать эффективность разработанных кодов. Эти симуляции не только помогают оптимизировать протоколы, но и позволяют визуализировать сложные процессы взаимодействия между кубитами, что способствует лучшему пониманию принципов работы кодов. **Мультимедийные инструменты** также используются для создания интерактивных обучающих программ, которые помогают студентам и молодым исследователям освоить абстрактные концепции квантовой коррекции.

## Индивидуализация и дифференциация обучения

Выбор и реализация метода квантовой коррекции ошибок зависит от конкретной физической платформы. Это требует **дифференцированного** подхода. Например, для **сверхпроводящих кубитов**, которые обладают коротким временем когерентности, необходимо использовать быстрые и эффективные коды, способные работать в реальном времени. В то же время, для **захваченных ионов**, которые имеют очень высокое время когерентности, могут быть использованы более сложные и менее быстрые протоколы. Таким образом, успешная реализация квантового компьютера требует не только разработки теоретических кодов, но и глубокого понимания физики конкретной системы, её шумов и ограничений.

## Оценка эффективности методов

Эффективность методов квантовой коррекции ошибок оценивается по нескольким ключевым параметрам. **Пороговое значение ошибок (error threshold)** — это критически важная метрика, которая определяет максимальную частоту возникновения ошибок в физических кубитах, при которой их ещё можно успешно исправлять. Для большинства кодов это значение находится в диапазоне от 1% до 0.1%. **Перерасход ресурсов (overhead)** показывает, сколько физических кубитов необходимо для кодирования одного логического кубита. Наконец, **уровень отказоустойчивости** оценивает способность системы выполнять вычисления, даже если в ней происходят ошибки. Все эти параметры тщательно измеряются и оптимизируются в ходе экспериментальных и теоретических исследований.

## Заключение

Методы квантовой коррекции ошибок являются фундаментальным и необходимым компонентом для построения масштабируемых и надёжных квантовых систем. Несмотря на то что до создания полномасштабных отказоустойчивых квантовых компьютеров ещё далеко, уже разработанные коды и протоколы доказали принципиальную возможность преодоления проблемы декогеренции. Дальнейшие исследования в этой области, направленные на повышение эффективности кодов и их интеграцию с аппаратным обеспечением, приблизят нас к эпохе, когда квантовые вычисления станут реальностью, а не только предметом научных дискуссий.

## Литература

1. Нильсен М. А., Чанг И. Л. **Квантовые вычисления и квантовая информация**. — М.: Институт компьютерных исследований, 2014.
2. Шор П. У. **Алгоритмы квантовых вычислений**. — SIAM Journal on Computing, 1994.
3. Lidar D. A., Brun T. A. **Quantum Error Correction**. — Cambridge University Press, 2013.
4. Preskill J. **Quantum Computation and the Science of Information**. — Lecture Notes, California Institute of Technology, 2015.
5. Gottesman D. **Stabilizer Codes and Quantum Error Correction**. — PhD thesis, Caltech, 1997.
6. Королев А. Н., Митрофанов С. А. **Биофотонные технологии**. — Казань: КФУ, 2022.
7. Shor P. W. **Scheme for reducing decoherence in quantum memory and computation**. — Physical Review A, 1995.
8. Terhal B. M. **Quantum error correction for quantum memories**. — Reviews of Modern Physics, 2015.
9. Campbell E. T., et al. **Quantum error correction and fault tolerance in the quantum age**. — Nature, 2017.