

# ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ

## Проект: Квантовая томография шумовых каналов в многокубитных системах (NoiseLab++)

Проект предполагает создание интерактивной программной лаборатории для исследования, реконструкции и анализа неизвестных квантовых шумовых каналов в системах от одного до трёх кубитов. В отличие от прямой симуляции заданных каналов, проект фокусируется на обратной задаче: восстановлении параметров и структуры неизвестного шумового канала по результатам ограниченного числа зашумлённых измерений через квантовую процессную томографию (QPT).

Пользователь сможет задавать произвольные неизвестные каналы, проводить томографические измерения с реалистичными ограничениями, восстанавливать представления канала и анализировать качество реконструкции через метрики близости квантовых процессов.

### 1. Модуль квантовой симуляции

- Программная модель квантовой системы на 1-3 кубита.
- Представление состояния:
  - базовый режим: statevector (чистые состояния);
  - расширенный режим: density matrix (смешанные состояния);
  - представление Паули-матриц для процессной томографии.
- Реализация применения квантовых гейтов одно-, двух- и трёхкубитных.
- Эволюция состояний через неизвестные шумовые каналы с параметрами.

### 2. Модуль квантовых операций

#### Однокубитные гейты:

- X, Y, Z (Паули-гейты)
- H (Адамара)

- S, T (фазовые гейты)
- Rx( $\theta$ ), Ry( $\theta$ ), Rz( $\theta$ ) (вращения)
- Произвольные U3( $\theta, \phi, \lambda$ )

#### **Двухкубитные гейты:**

- CNOT, CZ
- SWAP
- Управляемые вращения

#### **Операции измерения:**

- Измерение в произвольном базисе (X, Y, Z).
- Симуляция конечного числа измерений (shot-noise).
- Моделирование ошибок считывания (SPAM errors).

### **3. Модуль шумовых каналов**

#### **Однокубитные каналы:**

- Деполяризующий канал с параметром  $p$
- Амплитудное затухание (amplitude damping) с  $\gamma$
- Фазовое затухание (phase damping) с  $\lambda$
- Bit-flip, Phase-flip каналы
- Обобщённое амплитудное затухание (GAD)

#### **Двухкубитные каналы:**

- Коррелированный деполяризующий шум
- Кросс-токи (cross-talk)
- Декогеренция Белловых пар

#### **Генерация неизвестных каналов:**

- Случайная генерация физически допустимых каналов (CPTP maps).
- Комбинация базовых моделей с произвольными весами.
- Параметризованные семейства каналов для исследования.

### **4. Модуль квантовой процессной томографии**

#### **Подготовка входных состояний:**

- Набор базисных состояний для томографии:  $|0\rangle$ ,  $|1\rangle$ ,  $|+\rangle$ ,  $|-\rangle$ ,  $|+i\rangle$ ,  $|-i\rangle$
- Автоматическая генерация полного набора для  $n$  кубитов

#### **Измерительные базисы:**

- Паули-измерения: X, Y, Z для каждого кубита
- Полный набор для QPT:  $4^n$  входных состояний  $\times 3^n$  измерений

#### **Статистическая симуляция:**

- Конечное число отсчётов (shots): 100, 1000, 10000
- Биномиальное распределение результатов измерений
- Моделирование шума считывания

#### **Алгоритмы реконструкции:**

- Линейная инверсия (LSQ)
- Максимальное правдоподобие (MLE) с ограничениями СРТР
- Регуляризованные методы для неполных данных

## **5. Модуль представлений каналов**

#### **Матрица Чои (Choi matrix):**

- Реконструкция полной матрицы Чои размера  $4^n \times 4^n$
- Проверка физичности: положительная полуопределённость
- Визуализация действительной и мнимой частей

#### **Операторы Краусса:**

- Разложение канала в сумму операторов Краусса
- Определение ранга канала (числа независимых операторов)
- Анализ структуры ошибок через операторы Краусса

#### **Матрица переноса Паули (PTM):**

- Представление канала в базисе Паули
- Удобная форма для анализа марковских процессов
- Собственные значения и декогеренция

## 6. Модуль анализа и метрик

**Метрики близости каналов:**

- Process fidelity между истинным и восстановленным каналом
- Diamond distance (норма СРТР-отображений)
- Trace distance между матрицами Чой
- Gate fidelity (средняя верность на чистых состояниях)

**Статистический анализ:**

- N прогонов томографии (10/50/100) с независимым шумом
- Средние значения и стандартные отклонения метрик
- Зависимость точности от числа измерений (shots)
- Анализ систематических ошибок

**Сравнение с моделями:**

- Автоматическая подгонка под известные модели шума
- Определение доминирующего типа шума
- Оценка параметров моделей из восстановленного канала

## 7. Визуализация и интерфейс

**Панель управления экспериментом:**

- Выбор числа кубитов (1-3)
- Задание неизвестного канала: тип модели + параметры или случайная генерация
- Настройка параметров томографии: число shots, ошибки считывания
- Выбор алгоритма реконструкции
- Запуск томографии / Анализ результатов

**Визуализация каналов:**

- Тепловая карта матрицы Чой (действительная и мнимая части)
- Гистограммы операторов Краусса
- PTM в виде матрицы  $4^n \times 4^n$
- 3D представление канала через Блох-сферу для 1 кубита

**Графики и аналитика:**

- Process fidelity vs. число измерений
- Зависимость точности от параметра шума
- Сравнение истинных и восстановленных параметров
- Распределение результатов в N прогонах

#### Лог протокола:

- Список подготовленных состояний
- Результаты измерений с частотами
- Этапы реконструкции
- Итоговые метрики качества

## 8. Сценарии использования

- **Томография известного канала:** задать деполяризующий шум с  $p=0.1$ , провести QPT, сравнить восстановленный параметр с истинным.
- **Реконструкция неизвестного канала:** сгенерировать случайный канал, провести томографию, определить тип шума через сравнение с моделями.
- **Влияние конечной статистики:** изменять shots от 100 до 10000, наблюдать улучшение точности реконструкции.
- **Двухкубитная томография:** исследовать коррелированные шумы, оценить крос-токи между кубитами.
- **Неполные измерения:** исключить часть измерительных базисов, проанализировать устойчивость восстановления.
- **SPAM-ошибки:** добавить шум считывания 1-5%, оценить его влияние на метрики.
- **Машинное обучение:** использовать нейросеть для классификации типа шума по результатам измерений.

## 9. Технические требования

#### Программная реализация:

- Язык: Python 3.8+ с библиотеками NumPy, SciPy, Qiskit/Cirq
- Веб-интерфейс: React + Three.js для 3D визуализации
- Численная оптимизация: CVXPY для MLE с ограничениями CPTP

#### Производительность:

- Симуляция 1-кубитной томографии: менее 1 секунды
- Симуляция 2-кубитной томографии: 5-10 секунд

- Симуляция 3-кубитной томографии: до 1 минуты

## 10. Ожидаемый результат

Результатом работы станет программный инструмент, демонстрирующий полный цикл квантового эксперимента по диагностике неизвестных шумовых каналов, включающий подготовку состояний, измерения с реалистичными ограничениями, реконструкцию канала, анализ физических свойств и сравнение с теоретическими моделями. Инструмент будет сопровождаться отчётом с численными экспериментами, демонстрирующими точность различных методов томографии и влияние экспериментальных параметров на качество восстановления канала.