

Министерство науки и высшего образования РФ
ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет»
Математический факультет
Направление 02.04.01 Математика и компьютерные науки
Профиль «Математическое и компьютерное моделирование»

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Вариационный квантовый алгоритм с оптимизацией
методом отжига

Автор:
Алешин Д.А.
Подпись:

Научный руководитель:
д. ф.-м. н. Цирулёв А.Н.
Подпись:

Допущен к защите:
Руководитель ООП: Цветков В.П.

(подпись, дата)

Тверь 2025

Оглавление

Введение	3
1 Общая схема квантовых вариационных алгоритмов	4
1.1 Базис Паули	4
1.1.1 Связь стандартного базиса и базиса Паули	4
1.1.2 Коммутационное и антикоммутационное соотношение	7
1.1.3 Коммутирующие элементы в алгебре Ли группы $SU(2^n)$	8
1.2 Вариационная квантовая оптимизация	10
1.3 Анзац и общая схема алгоритма	12
1.4 Пример, иллюстрирующий особенности алгоритма	14
2 Вариационный квантовый алгоритм на основе метода отжига	20
2.1 Метод отжига	20
2.2 Алгоритм	22
2.3 Сравнительные результаты тестирования	23
Заключение	23
Литература	24
Приложение Python	27

Введение

Глава 1

Общая схема квантовых вариационных алгоритмов

1.1 Базис Паули

1.1.1 Связь стандартного базиса и базиса Паули

Рассмотрим квантовую систему из n кубитов, где каждый кубит связан с двумерным гильбертовым пространством \mathcal{H} и его эрмитово сопряжённым пространством \mathcal{H}^\dagger . Обозначим через $\mathcal{H}_n = \mathcal{H}^{\otimes n}$ и $\mathcal{H}_n^\dagger = (\mathcal{H}^\dagger)^{\otimes n}$ гильбертово пространство системы и его эрмитово сопряжение соответственно. Пространство линейных операторов, действующих на \mathcal{H} и \mathcal{H}^\dagger левым и правым умножением, задаётся как $L(\mathcal{H}_n) = \mathcal{H}_n \otimes \mathcal{H}_n^\dagger$. Тогда

$$\dim_{\mathbb{C}} \mathcal{H}_n = \dim_{\mathbb{C}} \mathcal{H}_n^\dagger = 2^n, \quad \dim_{\mathbb{C}} L(\mathcal{H}_n) = 2^{2n}.$$

Пространство $L(\mathcal{H}_n)$ наделено скалярным произведением Гильберта-Шмидта:

$$\langle \hat{A}, \hat{B} \rangle = \text{tr}(\hat{A}^\dagger \hat{B}), \quad \hat{A}, \hat{B} \in L(\mathcal{H}_n), \quad (1.1)$$

которое естественно продолжает скалярное произведение в \mathcal{H}_n . Вещественное линейное пространство эрмитовых операторов далее обозначим как $H(\mathcal{H}_n)$.

Пусть $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ образуют ортонормированный базис в однокубитном пространстве \mathcal{H} . Единичная матрица и матрицы Паули задаются как:

$$\sigma_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \sigma_1 = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}, \sigma_2 = \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}, \sigma_3 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix},$$

а соответствующие операторы Паули представляются в виде:

$$\begin{aligned} \hat{\sigma}_0 &= |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|, \quad \hat{\sigma}_1 = |0\rangle\langle 1| + |1\rangle\langle 0|, \\ \hat{\sigma}_2 &= -i|0\rangle\langle 1| + i|1\rangle\langle 0|, \quad \hat{\sigma}_3 = |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|. \end{aligned}$$

Эти операторы одновременно эрмитовы и унитарны, а также образуют базис в \mathcal{H} . Обратное преобразование выражается следующим образом:

$$|0\rangle\langle 0| = \frac{\hat{\sigma}_0 + \hat{\sigma}_3}{2}, \quad |0\rangle\langle 1| = \frac{\hat{\sigma}_1 + i\hat{\sigma}_2}{2}, \quad |1\rangle\langle 0| = \frac{\hat{\sigma}_1 - i\hat{\sigma}_2}{2}, \quad |1\rangle\langle 1| = \frac{\hat{\sigma}_0 - \hat{\sigma}_3}{2}.$$

Для $k, l, m \in \{1, 2, 3\}$ выполняются свойства: $\text{tr} \hat{\sigma}_k = 0$, $\hat{\sigma}_k^2 = \hat{\sigma}_0$, а также

$$\hat{\sigma}_k \hat{\sigma}_l = -\hat{\sigma}_l \hat{\sigma}_k, \quad \hat{\sigma}_k \hat{\sigma}_l = i \text{sign}(\pi) \hat{\sigma}_m, \quad (klm) = \pi(123), \quad (1.2)$$

где $\pi(123)$ — произвольная перестановка множества $\{1, 2, 3\}$.

Рассмотрим стандартный¹ бинарный базис в \mathcal{H}_n , образованный ортонормированными базисами $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ в однокубитных пространствах. Позиция в тензорном произведении позволяет различать кубиты. Для фиксированного n элементы этого базиса и соответствующие им элементы двумерного базиса удобно записывать как:

$$|k\rangle = |k_1 \dots k_n\rangle = |k_1\rangle \otimes \dots \otimes |k_n\rangle, \quad \langle k| = \langle k_1 \dots k_n| = \langle k_1| \otimes \dots \otimes \langle k_n|,$$

где строки $k_1 \dots k_n$ ($k_1, \dots, k_n \in \{0, 1\}$) интерпретируются как двоичные числа с десятичным представлением k . Например, $|101\rangle = |5\rangle$ и $|00110\rangle = |6\rangle$.

¹Мы избегаем термина «вычислительный», так как он может приводить к неоднозначности. И базис Паули, и стандартный базис являются вычислительными в одинаковом контексте.

В стандартном базисе:

$$|u\rangle = \sum_{k=0}^{2^n-1} u_k |k\rangle, \quad \hat{A} = \sum_{k,l=0}^{2^n-1} a_{kl} |k\rangle\langle l|,$$

где $|u\rangle \in \mathcal{H}_n$ и $\hat{A} \in L(\mathcal{H}_n)$.

Базис Паули $P(\mathcal{H}_n)$ в $L(\mathcal{H}_n)$ определяется как:

$$\{\hat{\sigma}_{k_1\dots k_n}\}_{k_1,\dots,k_n \in \{0,1,2,3\}}, \quad \hat{\sigma}_{k_1\dots k_n} = \hat{\sigma}_{k_1} \otimes \dots \otimes \hat{\sigma}_{k_n}, \quad (1.3)$$

где $\hat{\sigma}_{0\dots 0}$ — тождественный оператор. Базис $P(\mathcal{H}_n)$ содержит 4^n элементов. Для краткости будем использовать обозначение:

$$\hat{\sigma}_K = \hat{\sigma}_{k_1\dots k_n},$$

где строка Паули $k_1\dots k_n$ ($k_1, \dots, k_n \in \{0, 1, 2, 3\}$) соответствует числу K в десятичной системе ($0 \leq K \leq 4^n - 1$). Строка Паули K и элемент $\hat{\sigma}_K$ взаимно однозначно соответствуют друг другу.

Сравним $P(\mathcal{H}_n)$ со стандартным базисом. Для элементов базиса Паули выполняются:

$$\hat{\sigma}_{k_1\dots k_n} \hat{\sigma}_{k_1\dots k_n} = \hat{\sigma}_{0\dots 0}, \quad \text{tr } \hat{\sigma}_{0\dots 0} = 2^n, \quad \text{tr } \hat{\sigma}_{k_1\dots k_n} \Big|_{k_1\dots k_n \neq 0\dots 0} = 0. \quad (1.4)$$

Базис Паули является эрмитовым, унитарным и ортогональным относительно скалярного произведения (1.1). Отметим, что оператор $|k\rangle\langle l|$ из стандартного базиса не является унитарным или эрмитовым при $k \neq l$. Стандартный базис не включает тождественный оператор, который в этом базисе записывается как:

$$\sum_{k=0}^{2^n-1} |k\rangle\langle k|.$$

В базисе Паули любой оператор \hat{U} из унитарной группы $U(\mathcal{H}_n)$ (где $\hat{U}^\dagger \hat{U} = \hat{\sigma}_{0\dots 0}$) раскладывается в виде:

$$\hat{U} = \sum_{i_1,\dots,i_n \in \{0,1,2,3\}} U_{i_1\dots i_n} \hat{\sigma}_{i_1\dots i_n}, \quad \hat{U}^\dagger = \sum_{i_1,\dots,i_n \in \{0,1,2,3\}} \bar{U}_{i_1\dots i_n} \hat{\sigma}_{i_1\dots i_n},$$

где коэффициенты удовлетворяют условиям:

$$\sum_{i_1, \dots, i_n \in \{0,1,2,3\}} \bar{U}_{i_1 \dots i_n} U_{i_1 \dots i_n} = 1, \quad \sum_{\substack{i_1, \dots, i_n, j_1, \dots, j_n \in \{0,1,2,3\} \\ (i_1, \dots, i_n) \neq (j_1, \dots, j_n)}} \bar{U}_{i_1 \dots i_n} U_{j_1 \dots j_n} = 0.$$

Последнее условие эквивалентно $2^{2n-1}(2^n - 1)$ независимым соотношениям.

Эрмитовы операторы в базисе Паули разлагаются с вещественными коэффициентами.

1.1.2 Коммутационное и антикоммутационное соотношение

Коммутатор определяет взаимодействие операторов при их перестановке. Для операторов A и B он задаётся как:

$$[A, B] = AB - BA.$$

Если $[A, B] = 0$, операторы коммутируют; в противном случае — нет. В базисе Паули коммутаторы выражаются через символ Леви-Чивиты ε_{ijk} :

$$[\sigma_i, \sigma_j] = 2i\varepsilon_{ijk}\sigma_k,$$

где ε_{ijk} равен 1 при чётной перестановке индексов (i, j, k) , -1 при нечётной и 0 в остальных случаях. Например:

$$[\sigma_1, \sigma_2] = 2i\sigma_3, \quad [\sigma_2, \sigma_3] = 2i\sigma_1.$$

Антикоммутатор характеризует симметричное произведение операторов:

$$\{A, B\} = AB + BA.$$

Если $\{A, B\} = 0$, операторы антикоммутируют. Для операторов Паули:

$$\{\sigma_i, \sigma_j\} = 2\delta_{ij},$$

где δ_{ij} — символ Кронекера (1 при $i = j$, 0 иначе). Примеры:

$$\{\sigma_1, \sigma_2\} = 0, \quad \{\sigma_2, \sigma_3\} = 0.$$

Коммутаторы и антикоммутаторы применяются в квантовой механике для анализа свойств систем (спин электрона, кубиты), в квантовой теории поля (взаимодействия частиц) и квантовых вычислениях (алгоритмы, коррекция ошибок). Коммутаторы помогают определить совместную измеримость наблюдаемых, а антикоммутаторы — описать фермионные системы.

1.1.3 Коммутирующие элементы в алгебре Ли группы $SU(2^n)$

Рассмотрим базис Паули и множество строк Паули длины n :

$$\text{Str}_n = \{K = k_1 \dots k_n\}_{k_1, \dots, k_n \in \{0, 1, 2, 3\}}.$$

1. Множество $\mathbb{F}_4 = \{0, 1, 2, 3\}$ образует квадгруппу Клейна с умножением:

$$0 \cdot k = k, \quad k \cdot k = 0, \quad k \cdot l = m,$$

где $k, l, m \in \{1, 2, 3\}$ и (klm) — произвольная перестановка $(1\ 2\ 3)$.

2. Функция $s : \mathbb{F}_4 \times \mathbb{F}_4 \rightarrow \{1, i, -i\}$ задаётся значениями:

$$\begin{aligned} s(0, 0) = s(0, k) = s(k, 0) = s(k, k) &= 1, \quad k = 1, 2, 3, \\ s(1, 2) = s(2, 3) = s(3, 1) &= i, \quad s(2, 1) = s(3, 2) = s(1, 3) = -i. \end{aligned}$$

3. Функция $S : \text{Str}_n \times \text{Str}_n \rightarrow \{1, -1, i, -i\}$ определяется как:

$$S_{KL} = s(k_1, l_1) \cdot s(k_2, l_2) \cdot \dots \cdot s(k_n, l_n),$$

где $K = k_1 k_2 \dots k_n$ и $L = l_1 l_2 \dots l_n$.

Симметрия функции S зависит от числа пар (k_r, l_r) (на позициях r в строках K и L), где $k_r, l_r \in \{1, 2, 3\}$ и $k_r \neq l_r$, а также от их взаимного порядка. Пусть ω_{KL}^+ и ω_{KL}^- — количество пар вида $(1, 2), (2, 3), (3, 1)$ и $(2, 1), (3, 2), (1, 3)$ соответственно, и $\omega_{KL} = \omega_{KL}^+ + \omega_{KL}^-$. Тогда

$$S_{(KL)} = \frac{S_{KL}}{2} (1 + (-1)^{\omega_{KL}}), \quad S_{[KL]} = \frac{S_{KL}}{2} (1 - (-1)^{\omega_{KL}}), \quad (1.5)$$

где

$$S_{KL} = i^{\omega_{KL}} (-1)^{\omega_{KL}^-}.$$

$\omega_{KL} \bmod 4$	0	2	0	2	1	3	1	3
$\omega_{KL}^- \bmod 4$	0	1	1	0	0	1	1	0
S_{KL}		1	-1	-1	i	i	$-i$	$-i$
$S_{(KL)}$	1	1	-1	-1	0	0	0	0
$S_{[KL]}$	0	0	0	0	i	i	$-i$	$-i$

Таблица 1: Множитель до $\hat{\sigma}_M$ в (1.6) для $\hat{\sigma}_K \hat{\sigma}_L$, $\{\hat{\sigma}_K, \hat{\sigma}_L\}$, и $[i\hat{\sigma}_K, i\hat{\sigma}_L]$.

Здесь $S_{(KL)}$ и $S_{[KL]}$ — симметричная и антисимметричная части S_{KL} . Значения S_{KL} , $S_{(KL)}$ и $S_{[KL]}$ приведены в таблице 2.

Композицию элементов базиса Паули, их антикоммутаторов и коммутаторов можно компактно выразить в виде, удобном для программной реализации:

$$\hat{\sigma}_K \hat{\sigma}_L = S_{KL} \hat{\sigma}_M, \quad \{\hat{\sigma}_K, \hat{\sigma}_L\} = S_{(KL)} \hat{\sigma}_M, \quad [i\hat{\sigma}_K, i\hat{\sigma}_L] = -S_{[KL]} \hat{\sigma}_M, \quad (1.6)$$

где

$$\hat{\sigma}_M = \hat{\sigma}_{m_1 \dots m_n}, \quad m_r = k_r \cdot l_r \quad (r = 1, \dots, n). \quad (1.7)$$

Две строки Паули длины n могут коммутировать, даже имея ненулевые элементы в одних и тех же позициях. Например, операторы $\hat{\sigma}_{11}$, $\hat{\sigma}_{22}$ и $\hat{\sigma}_{33}$ коммутируют друг с другом. Унитарная матрица перехода из стандартного базиса $\{|i_1 \dots i_n\rangle \langle j_1 \dots j_n|\}$ в базис Паули содержит только элементы 0, ± 1 и $\pm i$. Например:

$$|00 \dots 0\rangle \langle 00 \dots 0| \rightarrow \frac{1}{2^n} \sum_{i_1, \dots, i_n \in \{0,3\}} \hat{\sigma}_{i_1 \dots i_n}.$$

Общее выражение для стандартных ортогональных проекторов имеет вид:

$$|i_1 \dots i_n\rangle \langle i_1 \dots i_n| = \frac{1}{2^n} \sum_{k_1, \dots, k_n \in \{0,3\}} \mathcal{X}_{k_1}^{i_1} \dots \mathcal{X}_{k_n}^{i_n} \hat{\sigma}_{k_1 \dots k_n},$$

где

$$\mathcal{X}_0^0 = \mathcal{X}_3^0 = \mathcal{X}_0^1 = 1, \quad \mathcal{X}_3^1 = -1.$$

Из выражения (1.6) следует, что: 1. Множество $\{i\hat{\sigma}_K\}_{K=0}^{4^n-1}$ образует ортонормированный базис в $\mathfrak{su}(2^n)$. 2. Множество

$$\tilde{P}(\mathcal{H}_n) = \{\epsilon \hat{\sigma}_K \mid K \in \text{Str}_n, \epsilon \in \{\pm 1, \pm i\}\},$$

содержащее 4^{n+1} элементов, образует группу — т.н. n -кубитную группу Паули.

Нормализатор группы Паули в унитарной группе:

$$\mathcal{C}(\mathcal{H}_n) = \left\{ \hat{U} \in U(\mathcal{H}_n) \mid \hat{U} \hat{\sigma}_K \hat{U}^\dagger \in \tilde{P}(\mathcal{H}_n), \quad \forall \hat{\sigma}_K \in \tilde{P}(\mathcal{H}_n) \right\},$$

называется группой Клиффорда. Исходя из (1.2), (1.4) и (1.7) получаем следующее утверждение

Утверждение 1. *Взаимные унитарные преобразования базисных операторов Паули подчиняются соотношениям $\hat{\sigma}_{i_1 \dots i_n} \hat{\sigma}_{k_1 \dots k_n} \hat{\sigma}_{i_1 \dots i_n} = \pm \hat{\sigma}_{i_1 \dots i_n}$, где знак плюс стоит тогда и только тогда, когда количество троек $(i_m k_m i_m)_{m \in \{1, \dots, n\}}$, удовлетворяют условиям $i_m \neq k_m$, $i_m \neq 0$, и $k_m \neq 0$ четности.*

l	0	1	2	3	4	5	6	7
$l_2 l_1 l_0$	000	001	010	011	100	101	110	111
$k_2 k_1 k_0$	011	011	011	011	011	011	011	011
$\bar{l} \wedge k$	011	010	001	000	011	010	001	000
$l \wedge k$	000	001	010	011	000	001	010	011
$l \wedge \bar{k}$	000	000	000	000	100	100	100	100
$\hat{\sigma}_I$	$\hat{\sigma}_{011}$	$\hat{\sigma}_{012}$	$\hat{\sigma}_{021}$	$\hat{\sigma}_{022}$	$\hat{\sigma}_{311}$	$\hat{\sigma}_{312}$	$\hat{\sigma}_{121}$	$\hat{\sigma}_{322}$

Таблица 2: Элементы базиса Паули, возникающие для $k = 011$.

1.2 Вариационная квантовая оптимизация

Пусть \mathcal{H}_n — гильбертово пространство квантовой системы, состоящей из n кубитов, $\mathcal{S} \subset \mathcal{H}_n$ — пространство векторов состояния (т.е. векторов, нормированных на единицу), $L(\mathcal{H}_n)$ — алгебра операторов на \mathcal{H}_n и $\hat{H} \in L(\mathcal{H}_n)$ — эрмитов оператор. Определим функцию

$$E(|u\rangle) = \langle u | \hat{H} | u \rangle, \quad |u\rangle \in \mathcal{S}. \quad (1.8)$$

В простейшей постановке **квантовой задачи оптимизации** требуется найти вектор состояния, на котором целевая функция (функция стоимости) E принимает минимальное значение, т.е., в формальной

записи, решить задачу

$$E(|u\rangle) \xrightarrow{|u\rangle \in \mathcal{S}} \min. \quad (1.9)$$

Ниже, для определенности и краткости, будем называть \hat{H} гамильтонианом системы, а целевую функцию E — энергией.

Сложность алгоритмов прямого вычисления собственных значений гамильтониана \hat{H} растет экспоненциально с ростом числа кубитов, поэтому для больших систем используются вариационные методы решения задачи оптимизации (1.9).

Вариационными квантовыми алгоритмами обычно называют такие гибридные квантово-классические алгоритмы, нацеленные на решение квантовых задач оптимизации посредством квантовых вычислений или их классической имитации, которые проводят вариационную настройку параметров квантовой схемы. Параметрически управляемое квантовое устройство, обычно представленное квантовой цепью, реализует анзац, т.е. унитарное преобразование стандартного начального состояния $|0\rangle^{\otimes n}$ или, как вариант, предудущего полученного состояния. На каждом шаге регулирующие параметры подбираются так, чтобы минимизировать энергию (целевую функцию). Обычно это выполняется путём измерения энергии состояний, предоставляемых вариационной схемой, и обновления параметров для минимизации целевой функции.

В точной математической формулировке сказанное означает, что в функции (1.8) вектор состояния $|u\rangle$ зависит от набора m параметров $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_m)$, которые принимают значения в некоторой связной и односвязной области $\Omega \in \mathbb{R}^m$. Вариационная формулировка квантовой задачи оптимизации (1.9) имеет вид

$$E(|u(\boldsymbol{\theta})\rangle) \xrightarrow{\boldsymbol{\theta} \in \Omega} \min, \quad E(|u(\boldsymbol{\theta})\rangle) = \langle u(\boldsymbol{\theta}) | \hat{H} | u(\boldsymbol{\theta}) \rangle. \quad (1.10)$$

Итак, цель вариационного квантового алгоритма — найти такой набор параметров, на котором энергия достигает минимума. Число параметров m в наборе $\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_m)$ зависит от конкретной задачи, в частности, от числа кубитов в квантовом устройстве. Для n кубитов размерность пространства состояний, $N = 2^n$, растет экспоненциально с ростом числа кубитов. Поэтому вариационный квантовый алгоритм должен быть

организован и выполнен так, чтобы выполнялось условие $m \ll N$, поскольку в противном случае высокий класс сложности алгоритма сделает его неэффективным с практической точки зрения.

Но наиболее важным вопросом является выбор зависимости вектора состояния $|u(\boldsymbol{\theta})\rangle$ от параметров. В вариационных квантовых алгоритмах используется *анзац* (унитарное преобразование) вида

$$|u(\boldsymbol{\theta})\rangle = \hat{U}(\boldsymbol{\theta})|u_0\rangle. \quad (1.11)$$

В общем случае форма анзаца определяет, какими будут параметры $\boldsymbol{\theta}$ и как их можно настроить для минимизации энергии (целевой функции). Структура анзаца, как правило, будет зависеть от поставленной задачи, так как во многих случаях можно использовать информацию о проблеме, чтобы подобрать анзац: это "анзац, подсказанный задачей". Однако можно построить анзацы достаточно общего вида, которые пригодны для использования в некоторых классах задач даже тогда, когда интуиция и известная информация о задаче не позволят его уточнить. Две наиболее распространенные формы анзаца рассмотрены в следующем разделе.

1.3 Анзац и общая схема алгоритма

В вариационных квантовых алгоритмах анзац (1.11) стандартно выбирается в виде композиции m последовательно примененных унитарных преобразований

$$\hat{U}(\boldsymbol{\theta}) = \hat{U}_m(\theta_m) \cdots \hat{U}_1(\theta_1). \quad (1.12)$$

В композиции (1.12) выбор операторов определяется типом задачи и технической возможностью их реализации на конкретном квантовом устройстве. Например, можно выбрать

$$\hat{U}_K(\theta_K) = \hat{W}_K \exp(i\theta_K \hat{\sigma}_K) = \hat{W}_K (\cos\theta_K \hat{\sigma}_{0\dots 0} + i \sin\theta_K \hat{\sigma}_K), \quad (1.13)$$

где $1 \leq K \leq m$, $\hat{\sigma}_K = \hat{\sigma}_{k_1} \otimes \dots \otimes \hat{\sigma}_{k_n}$, $k_1, \dots, k_n \in \{0, 1, 2, 3\}$, $K = k_1 \dots k_n$ (т.е. K — десятичное представление строки $k_1 \dots k_n$, рассматриваемой как число по основанию 4), n — число кубитов, а \hat{W}_K — независимый от параметров унитарный оператор. Как правило, в строке $k_1 \dots k_n$ только отдельные числа отличны от нуля, так что в тензорном произведении $\hat{\sigma}_{k_1} \otimes \dots \otimes \hat{\sigma}_{k_n}$ часть операторов являются тождественными.

В другом распространенном варианте операторы в композиции (1.12) имеют вид

$$\hat{U}_K(\theta_K) = \hat{W}_K(e^{i\theta_{k_1}\hat{\sigma}_{k_1}} \otimes \dots \otimes e^{i\theta_{k_n}\hat{\sigma}_{k_n}}), \quad (1.14)$$

где по-прежнему $1 \leq K \leq m$ и $K = k_1 \dots k_n$. Если в (1.13) все операторы \hat{W}_K могут быть тождественными, то в (1.14), по крайней мере некоторые операторы \hat{W}_K должны быть запутывающими и, следовательно, как минимум двухкубитными.

Таким образом, анзацы (1.12), (1.13) и (1.14) конкретизируют вариационную квантовую задачу оптимизации (1.10) и (1.11) в отношении параметрической зависимости вектора состояния,

$$|u(\boldsymbol{\theta})\rangle = \hat{U}(\boldsymbol{\theta})|0 \dots 0\rangle,$$

где начальное состояние имеет вид $|0 \dots 0\rangle = |0\rangle^{\otimes n}$. Если предположить далее, что мы в состоянии уверенно приготовить начальное состояние, реализовать анзац на физическом устройстве и вычислить значение энергии $E(|u(\boldsymbol{\theta})\rangle) = \langle u(\boldsymbol{\theta}) | \hat{H} | u(\boldsymbol{\theta}) \rangle$ посредством измерений (с привлечением классического компьютера), то следующий — основной — вопрос можно сформулировать так: как искать параметры, которые обеспечивают глобальный минимум энергии. Этот этап выполняется с помощью классического компьютера, так что вариационный квантовый алгоритм — гибридный квантово-классический алгоритм: параметризованная квантовая схема и измерительный прибор представляют квантовую часть, а алгоритм настройки параметров — классическую.

Опишем кратко схему алгоритма псевдокодом (см. также Рис. 1.1).

Алгоритм вариационной квантовой оптимизации

1. Ввод начального вектора параметров $\boldsymbol{\theta}$. Полагаем $\boldsymbol{\theta}_0 = \boldsymbol{\theta}$.
2. Генерация состояния $|u(\boldsymbol{\theta})\rangle = \hat{U}(\boldsymbol{\theta})|0\rangle^{\otimes n}$ и случайного вектора $\delta\boldsymbol{\theta}$.
3. Вычисление энергии $E(\boldsymbol{\theta}) = \langle u(\boldsymbol{\theta}) | \hat{H} | u(\boldsymbol{\theta}) \rangle$ с текущим вектором $\boldsymbol{\theta}$.
4. Алгоритмический переход к вектору параметров $\boldsymbol{\theta}_1 = \boldsymbol{\theta} + \delta\boldsymbol{\theta}$.
Если $E(\boldsymbol{\theta}_1) < E(\boldsymbol{\theta})$, то положим $\boldsymbol{\theta} = \boldsymbol{\theta}_1$ и запомним $\boldsymbol{\theta}_0 = \boldsymbol{\theta}_1$.
5. Условие завершения работы. Если условие выполнено, то выходим с результатом $|u(\boldsymbol{\theta}_0)\rangle$ и $E(\boldsymbol{\theta}_0)$. Иначе переходим к метке 2.

Переход к новому вектору параметров θ_1 является вторым ключевым пунктом (после выбора анзаца), который характеризует различные типы вариационных квантовых алгоритмов. Условие завершения работы может быть выбрано очень многими способами. Простейшим и одновременно универсальным является условие отсутствия понижения энергии в течение определенного числа циклов работы алгоритма.

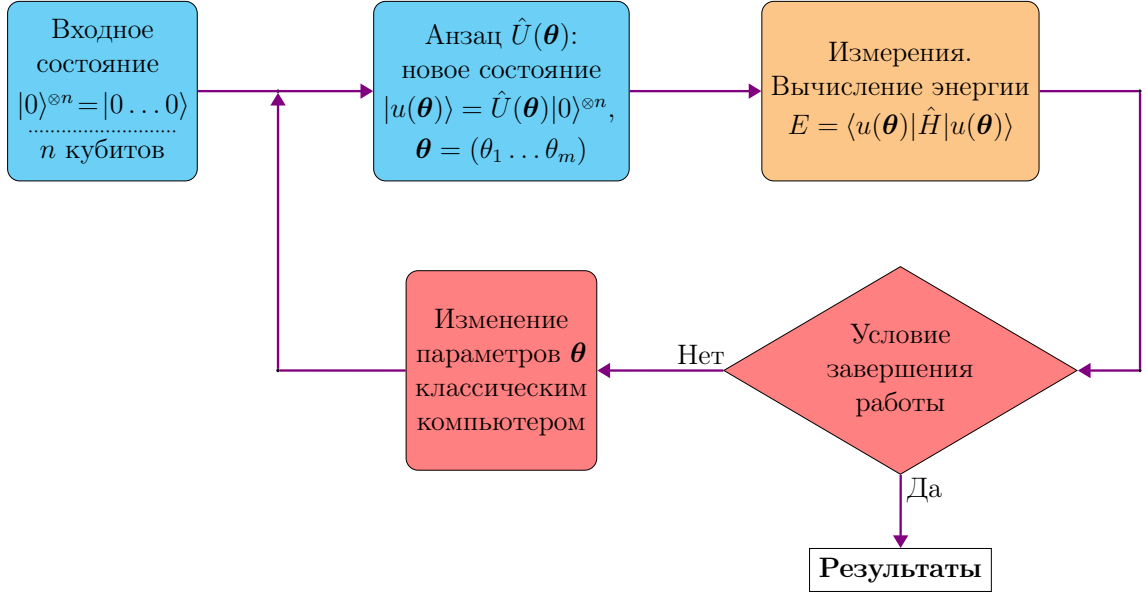


Рис. 1.1: Общая схема квантового вариационного алгоритма.

1.4 Пример, иллюстрирующий особенности алгоритма

Для иллюстрации алгоритма рассмотрим гамильтониан

$$\hat{H} = 2 \hat{\sigma}_{03} + \hat{\sigma}_{30} - 4 \hat{\sigma}_{11}, \quad (1.15)$$

который в стандартном базисе $\{|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle, |11\rangle\}$ имеет матрицу

$$H = \begin{pmatrix} 3 & 0 & 0 & -4 \\ 0 & -1 & -4 & 0 \\ 0 & -4 & 1 & 0 \\ -4 & 0 & 0 & -3 \end{pmatrix}.$$

Используя систему Maple находим собственные значения и собственные состояния в порядке возрастания собственных значений, начиная с основного состояния $|u_0\rangle$ с собственным значением E_0 :

$$E_0 = -5, \quad |u_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{5}} |00\rangle + \frac{2}{\sqrt{5}} |11\rangle, \quad (1.16)$$

$$E_1 = -\sqrt{17}, \quad |u_1\rangle = \frac{\sqrt{17}+1}{\sqrt{34+2\sqrt{17}}} |01\rangle + \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{17+\sqrt{17}}} |10\rangle, \quad (1.17)$$

$$E_2 = \sqrt{17}, \quad |u_1\rangle = -\frac{\sqrt{17}-1}{\sqrt{34-2\sqrt{17}}} |01\rangle + \frac{\sqrt{8}}{\sqrt{17-\sqrt{17}}} |10\rangle, \quad (1.18)$$

$$E_3 = 5, \quad |u_3\rangle = -\frac{2}{\sqrt{5}} |00\rangle + \frac{1}{\sqrt{5}} |11\rangle. \quad (1.19)$$

Рассмотрим далее пошаговое выполнение вариационного квантового алгоритма, который позволяет найти состояние, близкое к основному.

Первый шаг — выбор анзаца, т.е. унитарного преобразования $\hat{U}(\boldsymbol{\theta})$. В гамильтониан (1.15) не входят операторы вида $\hat{\sigma}_{k2}$ и $\hat{\sigma}_{2k}$ с $k \neq 2$, поэтому имеет смысл сразу выбирать анзац так, чтобы при действии на $k \neq 2$ он давал вектор состояния с вещественными коэффициентами. Других наводящих соображений относительно формы анзаца не видно, поэтому следует рассмотреть разные варианты. В общем случае вектор параметров $\boldsymbol{\theta}$ четырехмерен. В простейшем варианте анзац с четырехмерным вектором параметров $\boldsymbol{\theta} = (\xi, \lambda, \mu, \nu)$ можно выбирать как композицию экспонент

$$\hat{U}(\boldsymbol{\theta}) = e^{i\xi\hat{\sigma}_{02}} e^{i\lambda\hat{\sigma}_{03}} e^{i\mu\hat{\sigma}_{30}} e^{i\nu\hat{\sigma}_{11}} \quad (1.20)$$

операторов Паули, присутствующих в гамильтониане (1.15). Вычислим вначале

$$\begin{aligned} e^{i\mu\hat{\sigma}_{30}} e^{i\nu\hat{\sigma}_{11}} |00\rangle &= (\cos\mu \hat{\sigma}_{00} + i \sin\mu \hat{\sigma}_{30}) (\cos\nu |00\rangle + i \sin\nu |11\rangle) \\ &= \cos\mu \cos\nu |00\rangle - \sin\mu \sin\nu |11\rangle + i \sin\mu \cos\nu |00\rangle + i \cos\mu \sin\nu |11\rangle \\ &= e^{i\mu} \cos\nu |00\rangle + i e^{i\mu} \sin\nu |11\rangle = e^{i\mu} \cos\nu |00\rangle + e^{i(\mu+\pi/2)} \sin\nu |11\rangle. \end{aligned}$$

Действуя на результат оператором $e^{i\lambda\hat{\sigma}_{03}}$, получим следующий промежу-

точный вектор состояния:

$$\begin{aligned}
e^{i\lambda\hat{\sigma}_{03}}e^{i\mu\hat{\sigma}_{30}}e^{i\nu\hat{\sigma}_{11}}|00\rangle &= e^{i\mu}\cos\nu\left(\cos\lambda\hat{\sigma}_{00}+i\sin\lambda\hat{\sigma}_{03}\right)|00\rangle \\
&\quad + e^{i(\mu+\pi/2)}\sin\nu\left(\cos\lambda\hat{\sigma}_{00}+i\sin\lambda\hat{\sigma}_{03}\right)|11\rangle \\
&= e^{i\mu}\cos\nu\left(\cos\lambda+i\sin\lambda\right)|00\rangle + e^{i(\mu+\pi/2)}\sin\nu\left(\cos\lambda+i\sin\lambda\right)|11\rangle \\
&= e^{i(\mu+\lambda)}\cos\nu|00\rangle + e^{i(\mu+\pi/2-\lambda)}\sin\nu|11\rangle. \tag{1.21}
\end{aligned}$$

Очевидно, что этот анзац не является универсальным.

Варьируя параметры λ, μ, ν , можно получить основное состояние (1.16) с точностью до несущественного множителя $e^{i(\mu+\pi/4)}$, например, при

$$\lambda = \pi/4, \quad \mu \in \mathbb{R}, \quad \cos\nu = 1/\sqrt{5}, \quad \sin\nu = 2/\sqrt{5}. \tag{1.22}$$

Здесь μ — любое, поэтому к нужному результату приводит более простой анзац (при $\mu = 0$) $\hat{U}(\boldsymbol{\theta}) = e^{i\lambda\hat{\sigma}_{03}}e^{i\nu\hat{\sigma}_{11}}$, однако заранее это нам не известно. Более того основное состояние (1.16) можно достигнуть (что заранее также неизвестно и неочевидно) даже однопараметрическим анзацем

$$e^{i\nu\hat{\sigma}_{12}}|00\rangle = \left(\cos\nu\hat{\sigma}_{00}+i\sin\nu\hat{\sigma}_{12}\right)|00\rangle = \cos\nu|00\rangle + \sin\nu|11\rangle,$$

с теми же значениями $\cos\nu$ и $\sin\nu$, что и в (1.22).

Действуя на (1.21) оператором $e^{i\xi\hat{\sigma}_{02}}$, получим вектор состояния

$$\begin{aligned}
|\Phi\rangle &= \hat{U}(\boldsymbol{\theta})|00\rangle \\
&= \left(\cos\xi\hat{\sigma}_{00}+i\sin\xi\hat{\sigma}_{02}\right)\left(e^{i(\mu+\lambda)}\cos\nu|00\rangle + e^{i(\mu+\pi/2-\lambda)}\sin\nu|11\rangle\right) \\
&= e^{i(\mu+\lambda)}\sin\xi\cos\nu|01\rangle - e^{i(\mu+\pi/2-\lambda)}\sin\xi\sin\nu|10\rangle \\
&\quad + e^{i(\mu+\lambda)}\cos\xi\cos\nu|00\rangle + e^{i(\mu+\pi/2-\lambda)}\cos\xi\sin\nu|11\rangle, \tag{1.23}
\end{aligned}$$

который зависит от четырех параметров. Из формы данного вектора видно, что анзац (1.20) универсален (с учетом замечания о вещественности коэффициентов, сделанного выше). Основное состояние достигается при произвольном $\mu \in \mathbb{R}$ и

$$\xi = 0, \quad \lambda = \{\pi/4, 7\pi/4\}, \quad \cos\nu = 1/\sqrt{5}, \quad \sin\nu = \{2/\sqrt{5}, -2/\sqrt{5}\} \tag{1.24}$$

или

$$\xi = \pi, \lambda = \{\pi/4, 7\pi/4\}, \cos\nu = -1/\sqrt{5}, \sin\nu = \{-2/\sqrt{5}, 2/\sqrt{5}\}. \quad (1.25)$$

Для сокращения записи имеет смысл освободиться в (1.23) от фазового множителя и записать вектор состояния в виде

$$\begin{aligned} |\Phi\rangle = \sin\xi \big(\cos\nu |01\rangle - e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu |10\rangle \big) \\ + \cos\xi \big(\cos\nu |00\rangle + e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu |11\rangle \big) \end{aligned} \quad (1.26)$$

Второй шаг — вычисление энергии состояния, т.е. среднего значения $\langle\Phi|\hat{H}|\Phi\rangle$. Заметим, что первый и второй шаги должны выполняться на квантовых устройствах, а при классической симуляции алгоритма необходимо проводить явные вычисления. Из (1.15) и (1.26) находим

$$\begin{aligned} \hat{H}|\Phi\rangle = \sin\xi \big(2\hat{\sigma}_{03} + \hat{\sigma}_{30} - 4\hat{\sigma}_{11} \big) \big(\cos\nu |01\rangle - e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu |10\rangle \big) \\ + \cos\xi \big(2\hat{\sigma}_{03} + \hat{\sigma}_{30} - 4\hat{\sigma}_{11} \big) \big(\cos\nu |00\rangle + e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu |11\rangle \big) \\ = \sin\xi \left\{ \left(4e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu - \cos\nu \right) |01\rangle \right. \\ \left. - \left(e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu + 4\cos\nu \right) |10\rangle \right\} \\ + \cos\xi \left\{ \left(3\cos\nu - 4e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu \right) |00\rangle \right. \\ \left. - \left(4\cos\nu + 3e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu \right) |11\rangle \right\}. \end{aligned}$$

Поскольку

$$\begin{aligned} \langle\Phi| = \sin\xi \big(\cos\nu \langle 01| - e^{-i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu \langle 10| \big) \\ + \cos\xi \big(\cos\nu \langle 00| + e^{-i(\pi/2-2\lambda)} \sin\nu \langle 11| \big), \end{aligned}$$

то

$$\begin{aligned}
E_{\Phi} &= \langle \Phi | \hat{H} | \Phi \rangle \\
&= \sin^2 \xi \left\{ \cos \nu (4e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin \nu - \cos \nu) \right. \\
&\quad \left. + \sin \nu (\sin \nu + 4e^{-i(\pi/2-2\lambda)} \cos \nu) \right\} \\
&\quad + \cos^2 \xi \left\{ \cos \nu (3 \cos \nu - 4e^{i(\pi/2-2\lambda)} \sin \nu) \right. \\
&\quad \left. - \sin \nu (4e^{-i(\pi/2-2\lambda)} \cos \nu + 3 \sin \nu) \right\} \\
&= \sin^2 \xi (4 \sin 2\lambda \sin 2\nu - \cos 2\nu) + \cos^2 \xi (3 \cos 2\nu - 4 \sin 2\lambda \sin 2\nu). \quad (1.27)
\end{aligned}$$

Разумеется, если взять значения ξ , λ , $\cos \nu$, $\sin \nu$ как в (1.24) или в (1.25), то мы получим энергию основного состояния (1.16), т.е. $E_{\Phi} = -5$.

Третий шаг — изменение значений параметров λ, μ, ν (с целью минимизации E_{Φ}) и возвращение к первому шагу; предполагается, что в начале выполнения алгоритма начальные значения параметров заданы. Из (1.27) видно, что на значение E_{Φ} параметр μ не влияет, а параметры λ, ν должны варьироваться в области $[0, \pi] \times [0, \pi]$. Однако изначально это неизвестно, поэтому все четыре параметра должны варьироваться в области $[0, 2\pi] \times [0, 2\pi] \times [0, 2\pi] \times [0, 2\pi]$. Имеет смысл установить независимость энергии от параметра μ (и ее зависимость от остальных параметров) в начале работы алгоритма.

Мы уже знаем, что глобальный минимум энергии достигается для четырех наборов параметров (1.24) и (1.25). Соответствующие собственные векторы, вычисленные по выражению (1.26) отличаются от (1.16) только фазовыми множителями. Теперь необходимо выяснить, имеются ли у функции (трех переменных) (1.27) другие локальные минимумы.

Используя систему Maple, вычислим производные

$$\begin{aligned}
&\partial_{\xi} E_{\Phi}, \quad \partial_{\lambda} E_{\Phi}, \quad \partial_{\nu} E_{\Phi}, \\
&A = \partial_{\xi}^2 E_{\Phi}, \quad B = \partial_{\lambda}^2 E_{\Phi}, \quad C = \partial_{\nu}^2 E_{\Phi}, \\
&K = \partial_{\xi\lambda} E_{\Phi}, \quad L = \partial_{\xi\nu} E_{\Phi}, \quad M = \partial_{\lambda\nu} E_{\Phi}.
\end{aligned}$$

Находим

$$\begin{aligned}
\partial_\xi E_\Phi &= 4 \sin 2\xi (2 \sin 2\lambda \sin 2\nu - \cos 2\nu), \\
\partial_\lambda E_\Phi &= -8 \cos 2\xi \cos 2\lambda \sin 2\nu, \\
\partial_\nu E_\Phi &= \sin^2 \xi (8 \sin 2\lambda \cos 2\nu + 2 \sin 2\nu) - \cos^2 \xi (6 \sin 2\nu + 8 \sin 2\lambda \cos 2\nu), \\
A &= 8 \cos 2\xi (2 \sin 2\lambda \sin 2\nu - \cos 2\nu), \\
B &= 16 \cos 2\xi \sin 2\lambda \sin 2\nu, \\
C &= 4 \cos^2 \xi (4 \sin 2\lambda \sin 2\nu - 3 \cos 2\nu) - 4 \sin^2 \xi (4 \sin 2\lambda \sin 2\nu - \cos 2\nu), \\
K &= 16 \sin 2\xi \cos 2\lambda \sin 2\nu, \\
L &= 4 \sin 2\xi (4 \sin 2\lambda \cos 2\nu + 2 \sin 2\nu), \\
M &= -16 \cos 2\xi \cos 2\lambda \cos 2\nu.
\end{aligned}$$

Необходимые и достаточные условия минимума имеют вид

$$\begin{aligned}
&\partial_\xi E_\Phi = 0, \quad \partial_\lambda E_\Phi = 0, \quad \partial_\nu E_\Phi = 0, \\
&A > 0, \quad \det \begin{pmatrix} A & K \\ K & B \end{pmatrix} > 0, \quad \det \begin{pmatrix} A & K & L \\ K & B & M \\ L & M & C \end{pmatrix} > 0.
\end{aligned}$$

Снова проводя вычисления с помощью системы Maple, обнаруживаем четыре точки локального минимума с энергией $E_\Phi = -\sqrt{17}$:

$$\begin{aligned}
\xi &= \frac{\pi}{2}, & \lambda &= \frac{\pi}{4}, & \nu &= \pi - \frac{1}{2} \arctan(4), \\
\xi &= \frac{\pi}{2}, & \lambda &= \frac{\pi}{4}, & \nu &= 2\pi - \frac{1}{2} \arctan(4), \\
\xi &= \frac{\pi}{2}, & \lambda &= \frac{3\pi}{4}, & \nu &= \frac{1}{2} \arctan(4), \\
\xi &= \frac{\pi}{2}, & \lambda &= \frac{3\pi}{4}, & \nu &= \pi + \frac{1}{2} \arctan(4).
\end{aligned}$$

Таким образом, в процессе оптимизации целевой функции должны использоваться методы, которые позволяют избежать попадания в точку локального минимума, например, метод отжига.

Глава 2

Вариационный квантовый алгоритм на основе метода отжига

2.1 Метод отжига

Метод отжига или, подробнее, метод имитации отжига относится к семейству методов Монте-Карло, разработанных для поиска *глобального* минимума целевой функции. Этот метод обладает одним существенным преимуществом по сравнению с аналитическими методами оптимизации: он применим к целевым функциям произвольной природы. Особенно важно то, что метод отжига полностью сохраняет свою эффективность в задачах, где целевая функция не дифференцируема и при этом имеет большое число локальных минимумов. По этой причине, метод отжига, как фундаментальная концепция в теории глобальной оптимизации, широко используется в квантовых вычислениях, особенно в вариационных квантовых алгоритмах (в их квантовой реализации, а не классической эмуляции), где вычисление целевой функции не обладает достаточной точностью. Основная идея метода заключается в постепенном снижении "температуры" системы, чтобы достичь состояния с минимальным значением целевой функции (далее, для краткости, энергии). В этом разделе подробно рассматривается классический вариант отжига и детали его практического применения.

Классический метод отжига основывается на аналогии с физическим процессом термического отжига, при котором материал медленно охлаждается, чтобы избежать образования дефектов и достичь состояния минимальной энергии. Математическое обоснование метода связано с распределением Больцмана, которое описывает вероятность состояния системы при заданной температуре T формулой

$$p(x) = \frac{1}{Z(T)} \exp \left(-\frac{E(x)}{k_B T} \right),$$

в которой $E(x)$ — энергия состояния x , k_B — постоянная Больцмана, а $Z(T)$ — статистическая сумма. Процесс отжига является дискретным и моделирует систему, которая на каждом шаге может переходить между состояниями x и y с вероятностью, которая зависит от разности энергий $\Delta E = E(y) - E(x)$:

$$p(x \rightarrow y) = \min \left(1, \exp \left(-\frac{\Delta E}{k_B T} \right) \right). \quad (2.1)$$

С вероятностью $1 - p(x \rightarrow y)$ состояние системы не изменяется.

В самом общем случае в абстрактную математическую постановку задачи оптимизации методом отжига входят следующие данные.

Список данных

1. Множество состояний C .
2. Энергия (целевая функция) $E : C \rightarrow \mathbf{R}$.
3. Семейство $Rnd = \{R_s\}_{s \in J}$ отображений $R_s : C \rightarrow C$, где множество индексов J , вообще говоря, не счетно.
4. Начальная температура T , минимальная температура T_{min} и закон ее понижения $T_k \rightarrow T_{k+1} = F(T_k, k)$, где k — шаг процесса отжига.

Практическая реализация имитации отжига обычно осуществляется посредством последовательности конечного числа шагов — случайных испытаний. Каждое испытание состоит, во-первых, из случайного выбора некоторого отображения $R_s \in Rnd$, задающего переход $x \rightarrow y = R_s(x)$, т.е. этот переход выбирается случайным образом из некоторого семейства

возможностей. В зависимости от типа задачи вероятностное распределение (вероятностная мера) на Rnd выбирается в достаточно широком диапазоне (нормальное распределение, распределение Коши, равномерное распределение и т.д.). Такое распределение, в свою очередь, может зависеть от температуры.

Во-вторых, с помощью генератора псевдослучайных чисел выбирается значение ε равномерно распределенной на интервале $(0, 1)$ случайной величины. Если выполнено условие

$$\varepsilon < \exp \frac{E(x) - E(y)}{k_B T},$$

то переход $x \rightarrow y$ принимается даже если энергия нового состояния, $E(y)$, больше, чем энергия $E(x)$ предыдущего состояния. В противном случае, когда $E(y) \leq E(x)$, данное условие выполняется. Такой способ перехода предохраняет от попадания в локальный минимум, в особенности, если процедуру отжига повторять несколько раз. Наконец, в третьих, на каждом шаге производится понижение температуры в соответствии с некоторым правилом. Постепенное уменьшение температуры приводит к уменьшению вероятности перехода в состояния с более высокой энергией, в то время как система стремится к состоянию глобального минимума энергии.

2.2 Алгоритм

В задачах квантовой оптимизации в системе из n кубитов множество состояний C , входящее в *Список данных* из предыдущего раздела 2.1, является подмножеством в пространстве состояний системы \mathcal{H}_n . Оно возникает в результате применения параметризованного анзаца $\hat{U}(\boldsymbol{\theta})$ к начальному состоянию $|0 \dots 0\rangle = |0\rangle^{\otimes n}$, так что $|u(\boldsymbol{\theta})\rangle = \hat{U}(\boldsymbol{\theta}) |0\rangle^{\otimes n}$, где

$$\boldsymbol{\theta} = (\theta_1, \dots, \theta_m) \in \Omega = [0, 2\pi]^m.$$

Таким образом, $|u(\boldsymbol{\theta})\rangle \in C$ — это функция на пространстве параметров Ω со значениями в \mathcal{H}_n ; при этом C не является подпространством в \mathcal{H}_n . Энергия (целевая функция на Ω) из *Списка данных*, п. 2, определяется выражением $E(\boldsymbol{\theta}) = \langle u(\boldsymbol{\theta}) | \hat{H} | u(\boldsymbol{\theta}) \rangle$.

В предлагаемом алгоритме выбор отображения из семейства Rnd (*Список данных, п. 3*) равновероятен в отношении любого отображения в следующем смысле. С помощью генератора псевдослучайных чисел выбирается m значений $\varepsilon_i \in (0, 1)$, $i = 1, \dots, m$ случайной величины, равномерно распределенной на данном интервале, а затем формируется случайный вектор

$$\delta\theta = (\delta\theta_1, \dots, \delta\theta_m) \in \Omega, \quad \delta\theta_i = \varepsilon_i \pi.$$

Отображение $R_{\delta\theta}: C \rightarrow C$ определяется формулой $|u(\theta)\rangle \mapsto |u(\theta + \delta\theta)\rangle$, где вектор $\theta + \delta\theta$ берется по модулю 2π . Далее производим понижение температуры (*Список данных, п. 4*) по простейшей схеме равномерного уменьшения ее значения на каждом шаге процесса отжига $T_{k+1} = T_k - \tau$, где выбор значения τ производится на основе численных экспериментов с конкретной задачей.

Краткая формулировка алгоритма на уровне псевдокода выглядит следующим образом.

Вариационная квантовая оптимизация методом отжига

1. Вводим начальный вектор $\theta \in \Omega$, минимальную температуру T_{min} , текущую температуру $T > T_{min}$ и значение τ . Положим $\theta_0 = \theta$.
2. Генерируем состояние $|u(\theta)\rangle$ и вычисляем энергию $E(\theta)$ при текущей температуре T .
3. Генерируем случайный вектор $\delta\theta \in \Omega$, $\theta_1 = \theta + \delta\theta \pmod{2\pi}$. Вычисляем энергию $E(\theta_1)$.
4. Если $E(\theta_1) \leq E(\theta)$, то полагаем $\theta = \theta_1$ и $\theta_0 = \theta_1$. Иначе генерируем $\varepsilon \in (0, 1)$ и если $\varepsilon < \exp\{[E(\theta) - E(\theta_1)]/T\}$, то полагаем $\theta = \theta_1$.
5. Понижаем температуру: $T \mapsto T - \tau$.
6. Если $T > T_{min}$, то переходим к метке 2. Иначе выходим с результатом $|u(\theta_0)\rangle$ и $E(\theta_0)$.

2.3 Сравнительные результаты тестирования

Заключение

Литература

- [1] V. V. Nikonov, A. N. Tsirulev. *Pauli basis formalism in quantum computations*. Volume 8, No 3, pp. 1 – 14, 2020.
([doi:10.26456/mmg/2020-831](https://doi.org/10.26456/mmg/2020-831))
- [2] J. Preskill. *Quantum Computing in the NISQ era and beyond*. Quantum, vol. 2, p. 79, 2018.
([quantum-journal:q-2018-08-06-79](https://arxiv.org/abs/quantum-journal:q-2018-08-06-79))
- [3] M. Cerezo, et al. *Variational Quantum Algorithms*. Nature Reviews Physics, vol. 3, pp. 625-644, 2021.
([nature:42254-021-00348-9](https://arxiv.org/abs/nature:42254-021-00348-9))
- [4] A. Peruzzo, et al. *A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor*. Nature Communications, vol. 5, p. 4213, 2014.
([nature:ncomms5213](https://arxiv.org/abs/nature:ncomms5213))
- [5] E. Farhi, J. Goldstone, and S. Gutmann. *A Quantum Approximate Optimization Algorithm*. arXiv preprint arXiv:1411.4028, 2014.
([arXiv:1411.4028](https://arxiv.org/abs/1411.4028))
- [6] J. R. McClean, et al. *The theory of variational hybrid quantum-classical algorithms*. New Journal of Physics, vol. 18, p. 023023, 2016.
([iopscience:1367-2630-18-2-023023](https://arxiv.org/abs/iopscience:1367-2630-18-2-023023))
- [7] A. Kandala, et al. *Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets*. Nature, vol. 549, pp. 242-246, 2017.
([nature:nature23879](https://arxiv.org/abs/nature:nature23879))
- [8] A. W. Harrow, A. Hassidim, and S. Lloyd. *Quantum algorithm for linear systems of equations*. Physical Review Letters, vol. 103, no. 15, p. 150502,

2009.
([aps:PhysRevLett.103.150502](#))
- [9] J. Biamonte, et al. *Quantum machine learning*. Nature, vol. 549, pp. 195-202, 2017.
([nature:nature23474](#))
- [10] A. A. Lopatin. *Квантовая механика и её приложения*. Санкт-Петербургский Государственный Университет.
([math.spbu:user/gran/sb1/lopatin](#))
- [11] A. Aspuru-Guzik, A. D. Dutoi, P. J. Love, M. Head-Gordon. *Simulated Quantum Computation of Molecular Energies*. Science, vol. 309, no. 5741, pp. 1704-1707, 2005.
([science:1113479](#))
- [12] M. Schuld, I. Sinayskiy, F. Petruccione. *An introduction to quantum machine learning*. Contemporary Physics, vol. 56, no. 2, pp. 172-185, 2015.
([tandfonline:00107514.2014.964942](#))
- [13] A. Daskin, S. Kais. *Decomposition of unitary matrices for finding quantum circuits: Application to molecular Hamiltonians*. The Journal of Chemical Physics, vol. 141, no. 23, p. 234115, 2014.
([aip:1.4904315](#))
- [14] J. Romero, R. Babbush, J. R. McClean, C. Hempel, P. J. Love, A. Aspuru-Guzik. *Strategies for quantum computing molecular energies using the unitary coupled cluster ansatz*. Quantum Science and Technology, vol. 4, no. 1, p. 014008, 2018.
([iopscience:2058-9565/aad3e4](#))
- [15] V. Havlicek, A. D. Córcoles, K. Temme, A. W. Harrow, A. Kandala, J. M. Chow, J. M. Gambetta. *Supervised learning with quantum-enhanced feature spaces*. Nature, vol. 567, pp. 209-212, 2019.
([nature:s41586-019-0980-2](#))
- [16] N. Moll, P. Barkoutsos, L. Bishop, J. M. Chow, A. Cross, D. J. Egger, S. Filipp, A. Fuhrer, J. M. Gambetta, M. Ganzhorn, et al. *Quantum*

optimization using variational algorithms on near-term quantum devices.
Quantum Science and Technology, vol. 3, no. 3, p. 030503, 2018.
([iopscience:2058-9565/aab822](#))

Приложение Python

```
1 #constants/file_paths.py
2 import sys
3 from pathlib import Path
4
5 def get_base_path() -> Path:
6     """Возвращает путь к директории с EXE (или к проекту в
7     dev-режиме)."""
8     if getattr(sys, "frozen", False):
9         # Для скомпилированного EXE берём директорию исполняемого файла
10         return Path(sys.argv[0]).parent
11     else:
12         # Для разработки возвращаем корень проекта
13         return Path(__file__).parent.parent
14
15 # Путь к hamiltonian_operators.txt (внешний файл)
16 HAMILTONIAN_FILE_PATH = get_base_path() / "params" /
17     "hamiltonian_operators.txt"
18
19 # Файл вывода создаётся в текущей рабочей директории
20 OUTPUT_FILE_PATH = get_base_path() / "output.log"
21
22 #constants/pauli.py
23 PAULI_MAP = {
24     (1, 2): (1j, 3),
25     (2, 1): (-1j, 3),
26     (3, 1): (1j, 2),
27     (1, 3): (-1j, 2),
28     (2, 3): (1j, 1),
29     (3, 2): (-1j, 1),
30 }
31
32 #params/hamiltonian_operators.txt
33 # Действительная часть | Мнимая часть | Строка Паули
34
35 2.0 0.0 03
36 1.0 0.0 30
37 -4.0 0.0 11
```

```

38
39
40 #utils/console_and_print.py
41 from rich.console import Console
42 from typing import Any
43 from constants.file_paths import OUTPUT_FILE_PATH
44
45
46 def console_and_print(console: Console, message: Any) -> None:
47     """
48     Выводит результат выполнения программы в файл и консоль
49
50     :param console: Объект Console для вывода в консоль
51     :param message: Сообщение для вывода
52     """
53     console.print(message)
54     with open(OUTPUT_FILE_PATH, "a", encoding="utf-8") as file:
55         file.write(console.export_text() + "\n")
56
57
58 #utils/create_table.py
59 from rich.table import Table
60 from rich.panel import Panel
61 from rich import box
62 from typing import List, Dict, Any
63
64
65 def create_table(
66     columns: List[Dict[str, str]],
67     data: List[List[Any]],
68     title: str,
69     border_style: str = "yellow",
70 ) -> Panel:
71     table = Table(box=box.ROUNDED, border_style="yellow")
72     for col in columns:
73         table.add_column(
74             col["name"],
75             justify=col.get("justify", "default"),
76             style=col.get("style", ""),
77         )
78     for row in data:
79         table.add_row(*row)
80     return Panel(table, title=title, border_style=border_style)
81
82
83 #utils/format_ansatz.py
84 from .format_complex_number import format_complex_number
85
86
87 def format_ansatz(
88     pauli_operators: list[list[int]], result: dict[tuple, complex]

```

```

89 ) -> tuple[str, str]:
90     """
91     Форматирует анзац в символьное и численное представление.
92
93     :param pauli_operators: Список операторов Паули (списки индексов).
94     :param result: Словарь с результатами вычислений {оператор: коэффициент}.
95     :return: Символьное представление анзаца и его численное значение.
96     """
97     # Формируем  $U(\theta)$ 
98     ansatz_symbolic = "U( $\theta$ ) = " + " * ".join(
99         [
100             f"e(i $\theta_{i+1}$  * {format_complex_number(op[0] )} *  $\sigma_{\{i\}}$  )".join(map(str,
101                 op[1:])))"
102             for i, op in enumerate(pauli_operators)
103         ]
104     )
105     # Формируем U
106     ansatz_numeric = "U = " + " + ".join(
107         [
108             f"{format_complex_number(c)} * {format_complex_number(op[0] )} *  $\sigma_{\{i\}}$  ".join(
109                 op[1:])))"
110             if isinstance(op, (list, tuple))
111             and len(op) > 1
112             and isinstance(op[0], complex)
113             else f"{format_complex_number(c)} *  $\sigma_{\{i\}}$  ".join(map(str, op)))"
114             for op, c in result.items()
115         ]
116     )
117     return ansatz_symbolic, ansatz_numeric
118
119 #utils/format_complex_number.py
120 from sympy import re as sp_re, im as sp_im
121 from .format_number import format_number
122
123
124
125 def format_complex_number(c) -> str:
126     """
127     Универсальный форматировщик комплексных чисел для SymPy и стандартны
128     х типов.
129     """
130     # Извлечение компонентов через SymPy
131     real = float(sp_re(c))
132     imag = float(sp_im(c))
133
134     real_str = format_number(real) if abs(real) > 1e-12 else ""
135     imag_str = ""

```

```

136     if abs(imag) > 1e-12:
137         abs_imag = abs(imag)
138         imag_value = format_number(abs_imag)
139
140         # Специальные случаи для ±1
141         if imag_value == "1":
142             imag_str = "i" if imag > 0 else "-i"
143         else:
144             imag_sign = "" if imag > 0 else "-"
145             imag_str = f"{imag_sign}{imag_value}i"
146
147     # Сборка результата
148     parts = []
149     if real_str:
150         parts.append(real_str)
151     if imag_str:
152         parts.append(imag_str)
153
154     if not parts:
155         return "0"
156
157     # Корректное объединение компонентов
158     result = parts[0]
159     for part in parts[1:]:
160         if part.startswith("-"):
161             result += f"-{part[1:]}"
162         else:
163             result += f"+{part}"
164
165     # Фикс артефактов форматирования
166     return result.replace("+ -", "- ").replace("1i",
167         "i").replace(".0i", "i")
168
169 #utils/format_number.py
170 def format_number(num: float | int) -> str:
171     """
172     Универсальный форматировщик чисел с точным определением целочисленны
173     х значений
174     и подавлением артефактов вычислений с плавающей точкой.
175     """
176     # Проверка на целое число с учетом погрешности вычислений
177     if abs(num - round(num)) < 1e-15:
178         return str(int(round(num)))
179
180     # Форматирование с ручным управлением десятичными знаками
181     s = f"{num:.14f}".rstrip("0").rstrip(".")
182
183     # Исправление артефактов вида ".5" → "0.5"
184     if s.startswith("."):
185         s = "0" + s

```

```

185     elif s.startswith("-."):
186         s = s.replace("-", "-0.")
187
188     # Удаление лишних десятичных знаков после 4-го
189     if "." in s:
190         int_part, dec_part = s.split(".")
191         dec_part = dec_part[:4].ljust(4, "0").rstrip("0")
192         s = f"{int_part}.{dec_part}" if dec_part else int_part
193
194     return s
195
196
197 #utils/get_operator_for_console.py
198 from .format_complex_number import format_complex_number
199 from typing import Union
200
201
202 def get_operator_for_console(c: Union[complex, float, int], i: str) ->
    str:
203     """
204     Функция создана для 'красивого' вывода оператора Паули в консоль.
205     Избегает ситуаций, когда у нас выводится конструкция вида '1*σ'
206
207     :param c: Коэффициент оператора Паули.
208     :param i: Строка оператора Паули.
209     :return: Отформатированную строку.
210     """
211     if c == 1:
212         return f"σ_{i}"
213     else:
214         return f"{format_complex_number(c)}*σ_{i}"
215
216
217 #utils/initialize_environment.py
218 from rich.console import Console # Для красивого вывода в консоль
219 from constants.file_paths import OUTPUT_FILE_PATH
220
221
222 def initialize_environment() -> Console:
223     """Инициализирует окружение и возвращает консольный объект."""
224     if OUTPUT_FILE_PATH.exists():
225         OUTPUT_FILE_PATH.unlink()
226     return Console(force_terminal=True, color_system="truecolor",
227                    record=True)
228
229
230 #utils/print_composition_table.py
231 from rich.console import Console # Для красивого вывода в консоль
232 from typing import Tuple, List, Callable
233 from .console_and_print import console_and_print
234 from .create_table import create_table

```



```

234 from .format_complex_number import format_complex_number
235
236
237 def print_composition_table(
238     console: Console,
239     pauli_compose: Callable[[List[int], List[int]], Tuple[complex,
240         List[int]]],
241     pauli_strings: List[List[int]],
242 ) -> None:
243     """Выводит таблицу композиций операторов Паули."""
244     results = []
245     for s1 in pauli_strings:
246         for s2 in pauli_strings:
247             coeff, product = pauli_compose(s1, s2)
248             results.append((s1, s2, format_complex_number(coeff),
249                 product))
250
251     table_data = [
252         [str(s1), str(s2), str(h).lower(), str(p)] for s1, s2, h, p in
253         results
254     ]
255     console_and_print(
256         console,
257         create_table(
258             columns=[
259                 {"name": "Оператор 1", "style": "cyan", "justify":
260                     "center"},
261                 {"name": "Оператор 2", "style": "magenta", "justify":
262                     "center"},
263                 {"name": "Коэффициент", "style": "green", "justify":
264                     "center"},
265                 {"name": "Результат", "style": "red", "justify":
266                     "center"},
267             ],
268             data=table_data,
269             title="Композиции операторов Паули",
270             border_style="green",
271         ),
272     )
273
274
275 #utils/print_hamiltonian.py
276 from rich.console import Console
277 from rich.panel import Panel
278 from typing import Tuple, List
279 from .get_operator_for_console import get_operator_for_console
280 from .console_and_print import console_and_print
281
282 def print_hamiltonian(
283     console: Console, pauli_operators: List[Tuple[complex, List[int]]]

```

```

278 ) -> None:
279     """Выводит представление гамильтониана в консоль."""
280     hamiltonian_str = "H = " + " + ".join(
281         [get_operator_for_console(c, ' '.join(map(str, i))) for c, i in
282          pauli_operators]
283     )
284     console_and_print(
285         console,
286         Panel(
287             hamiltonian_str,
288             title="[bold]Введенный гамильтониан[/bold]",
289             border_style="green",
290         ),
291     )
292
293 #utils/print_pauli_table.py
294 from rich.console import Console # Для красивого вывода в консоль
295 from typing import Tuple, List
296 from .format_complex_number import format_complex_number
297 from .console_and_print import console_and_print
298 from .create_table import create_table
299
300
301 def print_pauli_table(
302     console: Console, pauli_operators: List[Tuple[complex, List[int]]]
303 ) -> None:
304     """Выводит таблицу операторов Паули."""
305     table_data = [[format_complex_number(c), str(i)] for c, i in
306                  pauli_operators]
307     console_and_print(
308         console,
309         create_table(
310             columns=[
311                 {"name": "Коэффициент", "style": "cyan"},
312                 {"name": "Индекс", "style": "magenta", "justify":
313                  "center"}],
314             data=table_data,
315             title="Операторы Паули",
316             border_style="purple",
317         ),
318     )
319
320 #utils/read_file_lines.py
321 from pathlib import Path
322
323
324 def read_file_lines(file_path, ignore_comments):
325     """

```

```

326     Читает строки из файла, игнорируя комментарии (строки, начинающиеся
        с '#').
327
328     :param file_path: Путь к файлу.
329     :param ignore_comments: Игнорировать строки, начинающиеся с '#'.
330     :return: Список строк.
331     :raises FileNotFoundError: Если файл не найден.
332     """
333     file_path = Path(file_path) if not isinstance(file_path, Path) else
        file_path
334     if not file_path.exists():
335         raise FileNotFoundError(f"Файл {file_path} не найден.")
336     with open(file_path, "r") as file:
337         return [
338             line.strip()
339             for line in file
340             if not (ignore_comments and line.strip().startswith("#"))
341         ]
342
343
344 #utils/read_hamiltonian_data.py
345 import numpy as np # Для работы с комплексными числами и математическим
        и операциями
346 from .read_file_lines import read_file_lines
347
348
349 def read_hamiltonian_data(file_path):
350     """
351     Читает данные из файла hamiltonian_operators.txt и возвращает два сп
        иска:
352     - Список операторов Паули в виде коэффициента оператора и строки Пау
        ли.
353     - Список строк операторов Паули.
354
355     :param file_path: Путь к файлу.
356     :return: (pauli_operators, pauli_strings)
357     :raises FileNotFoundError: Если файл не найден.
358     """
359     lines = read_file_lines(file_path, ignore_comments=False)
360     pauli_operators = []
361     pauli_strings = []
362     for line in lines:
363         parts = line.strip().split()
364         if len(parts) == 3:
365             real_part, imag_part, index_str = (
366                 float(parts[0]),
367                 float(parts[1]),
368                 str(parts[2]),
369             )
370             coefficient = np.complex128(real_part + imag_part * 1j)
371             index_list = [int(c) for c in index_str]

```

```

372         if coefficient != 0:
373             pauli_operators.append((coefficient, index_list))
374             pauli_strings.append(index_list)
375     return pauli_operators, pauli_strings
376
377
378 #program.py
379 import numpy as np
380 import sys
381 import io
382 from rich.progress import Progress, BarColumn, TextColumn, SpinnerColumn
383 from rich.panel import Panel
384 from typing import Tuple, List, Dict
385
386 # Импорт самописных util функций
387 from utils.console_and_print import console_and_print
388 from utils.print_pauli_table import print_pauli_table
389 from utils.read_hamiltonian_data import read_hamiltonian_data
390 from utils.print_hamiltonian import print_hamiltonian
391 from utils.print_composition_table import print_composition_table
392 from utils.format_ansatz import format_ansatz
393 from utils.initialize_environment import initialize_environment
394
395 # Импорт констант
396 from constants.file_paths import HAMILTONIAN_FILE_PATH
397 from constants.pauli import PAULI_MAP
398
399 # Установка кодировки для корректного вывода
400 sys.stdout = io.TextIOWrapper(sys.stdout.buffer, encoding="utf-8")
401 sys.stderr = io.TextIOWrapper(sys.stderr.buffer, encoding="utf-8")
402
403
404 def generate_random_theta(m: int) -> np.ndarray:
405     """Генерирует массив из m случайных углов в диапазоне [0, 2π)."""
406     return np.random.uniform(0, 2*np.pi, size=m).astype(np.float64)
407
408
409 def multiply_pauli(i: int, j: int) -> Tuple[complex, int]:
410     """
411     Вычисляет произведение базисных операторов Паули.
412     Возвращает: (коэффициент, индекс результата)
413     """
414     if i == j:
415         return (1, 0)
416     if i == 0:
417         return (1, j)
418     if j == 0:
419         return (1, i)
420     return PAULI_MAP.get((i, j), (1, 0))
421
422

```

```

423 def pauli_compose(s1: List[int], s2: List[int]) -> Tuple[complex,
List[int]]:
424     """
425     Вычисляет композицию двух операторов Паули.
426     Возвращает: (коэффициент, результирующий оператор)
427     """
428     coefficient = 1.0
429     result = []
430     for a, b in zip(s1, s2):
431         coeff, idx = multiply_pauli(a, b)
432         coefficient *= coeff
433         result.append(idx)
434     return coefficient, result
435
436
437 def calculate_ansatz(
438     theta: np.ndarray, pauli_operators: List[Tuple[complex, List[int]]]
439 ) -> Tuple[Dict[Tuple[int, ...], complex], str, str]:
440     """
441     Вычисляет анзац в виде произведения экспонент операторов Паули.
442     Возвращает: (словарь операторов, символьное представление, численное
    представление)
443     """
444     operator_length = len(pauli_operators[0][1])
445     result = {tuple([0] * operator_length): 1.0}
446
447     for t, (_, op) in zip(theta, pauli_operators):
448         cos_t = np.cos(t)
449         sin_t = np.sin(t)
450         new_result: Dict[Tuple[int, ...], complex] = {}
451
452         for existing_op, existing_coeff in result.items():
453             # Слагаемое с  $\cos(\theta) \cdot I$ 
454             identity_coeff = existing_coeff * cos_t
455             new_result[existing_op] = new_result.get(existing_op, 0) +
                identity_coeff
456
457             # Слагаемое с  $i \sin(\theta) \cdot \sigma$ 
458             pauli_coeff = existing_coeff * 1j * sin_t
459             compose_coeff, compose_op =
                pauli_compose(list(existing_op), op)
460             final_coeff = pauli_coeff * compose_coeff
461             final_op = tuple(compose_op)
462             new_result[final_op] = new_result.get(final_op, 0) +
                final_coeff
463
464     result = new_result
465
466     symbolic_str, numeric_str = format_ansatz(pauli_operators, result)
467     return result, symbolic_str, numeric_str
468

```

```

469
470 def compute_uhu(
471     u_dict: Dict[Tuple[int, ...], complex], h_terms:
472         List[Tuple[complex, List[int]]]
473 ) -> Dict[Tuple[int, ...], complex]:
474     """
475     Вычисляет оператор  $U^\dagger H U$ .
476     Возвращает: словарь {оператор: коэффициент}
477     """
478     uhu_dict: Dict[Tuple[int, ...], complex] = {}
479
480     for coeff_h, op_h in h_terms:
481         for j_op, j_coeff in u_dict.items():
482             conjugated_j_coeff = np.conj(j_coeff)
483             c1, op_uh = pauli_compose(list(j_op), op_h)
484
485             for k_op, k_coeff in u_dict.items():
486                 c2, op_uhu = pauli_compose(op_uh, list(k_op))
487                 total_coeff = conjugated_j_coeff * k_coeff * coeff_h *
488                     c1 * c2
489
490                 # Стабилизация малых значений
491                 if abs(total_coeff) < 1e-12:
492                     continue
493
494                 op_tuple = tuple(op_uhu)
495                 uhu_dict[op_tuple] = uhu_dict.get(op_tuple, 0) +
496                     total_coeff
497
498     return uhu_dict
499
500
501 def calculate_expectation(uhu_dict: Dict[Tuple[int, ...], complex]) ->
502 float:
503     """
504     Вычисляет  $\langle 0 | U^\dagger H U | 0 \rangle$  для состояния  $|0...0\rangle$ .
505     Возвращает: ожидаемое значение
506     """
507     expectation = 0.0
508     for op, coeff in uhu_dict.items():
509         if all(p in {0, 3} for p in op):
510             expectation += coeff.real
511     return expectation
512
513
514 def generate_neighbor_theta(
515     current_theta: np.ndarray, step_size: float = 0.1
516 ) -> np.ndarray:
517     """Генерирует соседнее решение, добавляя случайное изменение к текущ
518         ему theta."""
519     perturbation = np.random.normal(scale=step_size,
520                                     size=current_theta.shape)

```

```

514     return np.clip(current_theta + perturbation, 0.0, 1.0)
515
516
517 def simulated_annealing(
518     initial_theta: np.ndarray,
519     pauli_operators: list,
520     initial_temp: float = 1000.0,
521     cooling_rate: float = 0.99,
522     min_temp: float = 1e-5,
523     num_iterations_per_temp: int = 500,
524     step_size: float = 0.5,
525 ) -> tuple:
526     """Реализует алгоритм имитации отжига с термализацией."""
527     current_theta = initial_theta.copy()
528     best_theta = current_theta.copy()
529     best_energy = float("inf")
530     rng = np.random.default_rng()
531
532     with Progress(
533         SpinnerColumn(),
534         TextColumn("[progress.description]{task.description}"),
535         BarColumn(bar_width=None),
536         TextColumn("[progress.percentage]{task.percentage:>3.0f}%"),
537     ) as progress:
538         task = progress.add_task("[cyan]Отжиг...", total=100)
539
540         temp = initial_temp
541         iteration = 0
542
543         while temp > min_temp:
544             for _ in range(num_iterations_per_temp):
545                 # Генерация соседнего решения с адаптивным шагом
546                 perturbation = rng.normal(0,
547                     step_size*(temp/initial_temp),
548                     size=current_theta.shape)
549                 neighbor_theta = (current_theta + perturbation) %
550                     (2*np.pi)
551
552                 # Вычисление энергии нового состояния
553                 ansatz_dict, _, _ = calculate_ansatz(neighbor_theta,
554                     pauli_operators)
555                 uhu_dict = compute_uhu(ansatz_dict, pauli_operators)
556                 current_energy = calculate_expectation(uhu_dict)
557
558                 # Критерий принятия решения
559                 energy_diff = current_energy - best_energy
560                 if energy_diff < 0 or rng.random() <
561                     np.exp(-energy_diff / temp):
562                     current_theta = neighbor_theta.copy()
563
564                     if current_energy < best_energy:

```

```

560         best_theta = current_theta.copy()
561         best_energy = current_energy
562
563         iteration += 1
564         if iteration % 100 == 0:
565             progress.update(task, advance=1)
566
567         temp *= cooling_rate
568
569     return best_theta, best_energy
570
571
572 def main():
573     """Основная логика программы."""
574     console = initialize_environment()
575
576     # Явная проверка существования файла
577     if not HAMILTONIAN_FILE_PATH.exists():
578         msg = (
579             f"Файл [bold]{HAMILTONIAN_FILE_PATH}[/] не найден!\n"
580             "Убедитесь, что рядом с EXE есть папка [bold]params[/] с фай-
581             лом [bold]hamiltonian_operators.txt[/].\"
582         )
583         console_and_print(console, Panel(msg, border_style="red"))
584         return
585
586     try:
587         pauli_operators, pauli_strings =
588             read_hamiltonian_data(HAMILTONIAN_FILE_PATH)
589
590         print_hamiltonian(console, pauli_operators)
591         print_pauli_table(console, pauli_operators)
592         print_composition_table(console, pauli_compose, pauli_strings)
593
594     except FileNotFoundError:
595         console_and_print(
596             console,
597             Panel(
598                 f"[red]Файл {HAMILTONIAN_FILE_PATH} не найден[/red]",
599                 border_style="red"
600             ),
601         )
602         return
603
604     if len(pauli_operators) < 2:
605         console_and_print(
606             console,
607             Panel("[red]Требуется минимум 2 оператора Паули[/red]",
608                 border_style="red"),
609         )
610         return

```



```

607
608 best_energy = float("inf")
609 best_result = None
610
611 # Собираем все результаты для анализа
612 all_results = []
613
614 for m in range(2, len(pauli_operators) + 1):
615     initial_theta = generate_random_theta(m)
616
617     optimized_theta, energy = simulated_annealing(
618         initial_theta=initial_theta,
619         pauli_operators=pauli_operators,
620         initial_temp=100.0,
621         cooling_rate=0.95,
622         min_temp=1e-3,
623         num_iterations_per_temp=100,
624         step_size=0.1,
625     )
626
627     all_results.append(
628         {
629             "m": m,
630             "theta": optimized_theta,
631             "energy": energy,
632         }
633     )
634
635     # Обновляем лучший результат
636     if energy < best_energy:
637         best_energy = energy
638         best_result = all_results[-1]
639
640 _, ansatz_symbolic, ansatz_numeric = calculate_ansatz(
641     best_result["theta"], pauli_operators[: best_result["m"]]
642 )
643
644 console_and_print(
645     console,
646     Panel(
647         ansatz_symbolic,
648         title="[bold]Символьное представление анзаца[/]",
649         border_style="green",
650     ),
651 )
652
653 console_and_print(
654     console,
655     Panel(
656         ansatz_numeric,
657         title="[bold]Численное представление анзаца[/]",

```

```

658         border_style="purple",
659     ),
660 )
661
662 console_and_print(
663     console,
664     Panel(
665         f"{best_result['energy']:.6f}",
666         title="[bold]Энергия ( $\langle 0|U^\dagger H U|0\rangle$  для состояния  $|0\dots 0\rangle$ ) [/]",
667         border_style="green",
668     ),
669 )
670
671 input('text')
672
673
674 if __name__ == "__main__":
675     main()

```