

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроніки**  
(повна назва інституту/факультету)

**Кафедра мікроелектроніки**  
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри

\_\_\_\_\_ **Анатолій ОРЛОВ**

(підпис) (ініціали, прізвище)

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2021 р.

**Дипломна робота**

**на здобуття ступеня бакалавра**

за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка

(код і назва)

на тему: Фотонні системи з однокубітними квантовими обчисленнями.

Виконав : студент 4 курсу, групи ДП-71

(шифр групи)

Філоненко Євгеній Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник д. ф-м. н. Королюк Д. В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю

доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

\_\_\_\_\_ **Георгій СВЄЧНИКОВ**

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО

Рецензент \_\_\_\_\_

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає  
запозичень з праць інших авторів без  
відповідних посилань.

Студент \_\_\_\_\_

(підпис)

Київ – 2021 року

## Завдання на дипломну роботу

### Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет Електроніки  
(повна назва)

Кафедра мікроелектроніки  
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) 153 Мікро- та наносистемна техніки  
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ  
В.о.завідувача кафедри  
Анатолій ОРЛОВ  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

### ЗАВДАННЯ на дипломний проект (роботу) студенту

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Фотонні системи з однокубітними квантовими обчисленнями.

керівник проекту (роботи) д. ф-м. н. Королюк Д. В.,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом проекту (роботи)

3. Вихідні дані до проекту (роботи) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) 1) Кубіт; 2) Квантові обчислення; 3) Фотон як кубіт;  
4) Квантові помилки; 5) Квантові алгоритми; 6) Розробка програми та її запуск на квантовому комп'ютері.

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) презентація

6. Консультанти розділів проекту (роботи)<sup>1\*</sup>

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_ (підпис)

\_\_\_\_\_ (ініціали, прізвище)

<sup>1\*</sup> Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

## РЕФЕРАТ

Дипломна робота виконана на 55 сторінках, що містить 6 розділів, 20 ілюстрацій, 15 джерел посилань.

Об'єктом дослідження є квантові обчислення, квантові вентиля та використання фотону в якості кубіту в квантовому комп'ютері.

Метою роботи є з'ясувати нинішній стан використання фотону як кубіту, його недоліки та переваги над іншими фізичними об'єктами, які використовуються в якості кубітів.

Перший розділ присвячений поняттю кубіта, основного носія інформації в квантовому комп'ютері. Його порівняння з класичним бітом. Способи його представлення.

У другому розділі розглянуті основні концепції квантових обчислень. Розглянуті квантові вентиля Паулі та елемент Адамара.

У третьому розділі висвітлено питання стосовно використання фотону в якості кубіта. Властивості фотона, які роблять його можливим бути кубітом. Перспективи фотону, його недоліки та переваги над іншими квантовими об'єктами, які можуть бути використані в якості кубіту.

У четвертому розділі розглянуте питання квантових помилок, а саме квантова декогерентність, корекція та види квантових помилок.

П'ятим розділ присвячений квантовим алгоритмам, їх переваги над класичними. Розглянутий алгоритм Гровера, алгоритм пошуку об'єкта в невідсортованій базі даних.

Шостий заключний розділ присвячений описанню розробленої програми, квантової схеми та її запуск на симуляторі квантового комп'ютера, та на справжньому квантовому комп'ютері ІВМ.

Ключові слова: квантовий комп'ютер, квантові обчислення, кубіт, фотон, квантові помилки, декогерентність, квантові алгоритми, вентиля Паулі, елемент Адамара.

## ANNOTATION

The work is present on 55 pages, it contains 6 sections, 20 illustrations, 15 sources in the list of references.

The object of research is quantum computing, quantum gates and the use of a photon as a qubit in a quantum computer.

The purpose of the work is to find out the current state of use of the photon as a qubit, its disadvantages and advantages over other physical objects used as qubits.

The first section is devoted to the concept of qubit, the main carrier of information in a quantum computer. Its comparison with the classical bit. Ways to present it.

The second section discusses the basic concepts of quantum computing. Pauli quantum gates and the Hadamard element are considered.

The third section covers the use of the photon as a qubit. Properties of a photon that make it possible to be a qubit. Prospects of a photon, its disadvantages and advantages over other quantum objects that can be used as a qubit.

The fourth section discusses the issue of quantum errors, namely quantum decoherence, correction and types of quantum errors.

The fifth section is devoted to quantum algorithms, their advantages over classical ones. Grover's algorithm, algorithm for finding an object in an unordered database, is considered.

The sixth and final section is devoted to the description of the developed program, the quantum scheme and its launch on the quantum computer simulator, and on the real IBM quantum computer.

Keywords: quantum computer, quantum calculations, qubit, photon, quantum errors, decoherence, quantum algorithms, Pauli gates, Hadamard element.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1. КУБІТ .....	10
1.1. Суперпозиція станів.....	10
1.2. Представлення кубіту .....	12
1.3. Сфера Блоха.....	13
1.4. Вимірювання кубіту.....	15
2. КВАНТОВІ ОБЧИСЛЕННЯ .....	17
2.1. Вентилі Паулі .....	18
2.2. Вентиль Паулі-X .....	19
2.3. Вентиль Паулі-Z.....	20
2.4. Вентиль Паулі-Y .....	20
2.5. Елемент Адамара .....	20
3. ФОТОН ЯК КУБІТ.....	22
3.1. Виявлення фотону.....	26
3.2. Генерування фотонів .....	28
3.3. Керування фотоном .....	29
4. КВАНТОВІ ПОМИЛКИ.....	31
4.1. Квантова декогерентність .....	31
4.2. Квантова корекція помилок .....	32
4.3. Від класичної до квантової корекції помилок .....	34
4.4. Види квантових помилок .....	37
5. КВАНТОВІ АЛГОРИТМИ.....	39
5.1. Квантовий паралелізм .....	41
5.2. Пошук в базі даних .....	43
6. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ТА ЇЇ ЗАПУСК НА КВАНТОВОМУ КОМП'ЮТЕРІ	
46	
6.1. Програмне забезпечення .....	46

6.2. Код програми.....	47
6.3. Аналіз отриманих результатів .....	52
ВИСНОВКИ.....	53
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	54

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

КО – квантові обчислення

ФКО – фотонні квантові обчислення

ДФ – детектор фотонів

NAND – логічний вентиль НЕ І (NOT - AND)



## ВСТУП

Фізика квантової інформації та квантових обчислень – нова область науки, яка стрімко розвивається та виникла на стику квантової механіки, сучасної математичної фізики та інформатики. Великий інтерес до неї визваний захоплюючими перспективами, які обіцяють відкрити реалізацію її ідей фактично в усіх областях людської діяльності, пов'язаної з передачею, збереженням та обробкою інформації.

Очікується, що квантові комп'ютери зможуть вирішувати математичні проблеми, які неможливо вирішити за допомогою звичайних комп'ютерів.

Тому завданням даної роботи є теоретичне вивчення механізму квантових обчислень, основних логічних елементів, квантових помилок.

Досліджено основні квантові алгоритми, та їх переваги над класичними.

Також однією з цілей даної роботи було дослідження фотону в якості кубіта, його переваг та недоліків над іншими фізичними реалізаціями кубітів.

## 1. КУБІТ

Кубіт – квантовий біт, основний об’єкт інформації у квантових обчисленнях.

Звичайний класичний біт, який є основним об’єктом інформації у класичних обчисленнях може мати одне з двох значень 0 або 1. Принципова відмінність кубітів полягає у тому, що вони не обмежуються лише 0 та 1, кубіт може мати значення, яке є або одним із них, або будь-яке інше значення, яке знаходиться між 0 та 1. Дане явище називається квантовою суперпозицією та відповідно може відбуватись лише в квантах – дуже маленьких об’єктах. Це обумовлено квантовою природою явищ мікросвіту. Кубітом може виступати будь-який об’єкт, який має квантову поведінку, наприклад фотон.

### 1.1. Суперпозиція станів

Кубіт, що знаходиться в суперпозиції, при вимірюванні колапсує в одне з двох детермінованих станів (0 або 1). Імовірність стану 1 або 0 визначається суперпозицією кубіта. Якщо кубіт знаходиться в рівній суперпозиції, то він знаходиться наполовину в стані 0, наполовину в стані 1. Отже, при вимірюванні кубіт з 50% ймовірністю перейде в стан 0 і з такою ж вірогідністю - в стан 1. Якщо кубіт, скажімо, в 75 % переходить в стан 0 і в 25% в стан 1, при 100 вимірах кубіт перейде в стан 0 приблизно 75 раз і в стан 1 приблизно 25 раз.

Суперпозицію станів кубіта зображують графічно у вигляді координатної сітки на сфері, де кожний вузол відповідає певному стану (рис. 1.1).

Якщо кожний стан кубіта позначити як  $\alpha|0\rangle$  (функція, яка описує стан, коли спін квантової частинки направлений проти зовнішнього поля) та  $\beta|1\rangle$  (спін квантової частинки направлений по напрямленню зовнішнього поля), тоді будь-який стан із множини можливих буде визначатись наступним співвідношенням (суперпозицією):

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (1.1)$$

де  $\alpha$ ,  $\beta$  – комплексні функції, які задовольняють відношення  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$  ( $|\alpha|^2$  та  $|\beta|^2$  являються амплітудами ймовірності переходів у стани  $\alpha|0\rangle$  та  $\beta|1\rangle$ ).

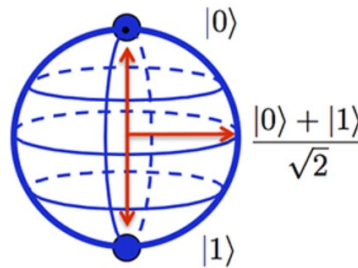


Рисунок 1.1 - Представлення кубіта

Стани  $|0\rangle$  та  $|1\rangle$  називають спеціальними станами обчислювального базису, які утворюють ортонормований базис цього векторного простору. Можна виміряти біт, щоб визначити стан, в якому він знаходиться. Наприклад, комп'ютери роблять це кожного разу, зчитуючи вміст своєї пам'яті. Проте ми не можемо виміряти кубіт, щоб визначити його квантовий стан (1.1). Квантовий біт може приймати нескінченно багато значень, проте як результат вимірювань ми можемо отримати або стан  $|0\rangle$  з імовірністю  $|\alpha|^2$ , або стан  $|1\rangle$  з імовірністю  $|\beta|^2$ . Цей розрив між спостережуваним станом кубіта та доступними нам спостереженнями лежить в основі квантових обчислень та квантової інформації. [1]

Кубіти можуть бути зв'язані (або заплутані) між собою. Що означає накладений зв'язок на них, внаслідок чого зміна стану одного із кубітів впливає на узгоджену зміну станів інших. Сукупність заплутаних між собою кубітів визначається як заповнений квантовий регістр бітів. Він спроможний знаходитись не тільки в усіх можливих комбінаціях складових його бітів, а і реалізувати

залежності між ними, що суттєво збільшує обчислювальні можливості систем, оснований на кубітах.

Отже, кубіти можуть містити значно більше інформації, ніж біти. Один біт містить таку ж кількість інформації, що і кубіт - обидва вони можуть містити одне значення. Однак чотири біти використовуються для зберігання того ж обсягу інформації, що два кубіта. Двох-кубітна система в рівній суперпозиції містить значення для чотирьох станів, що в класичному обчисленні вимагає чотирьох бітів. Вісім біт зберігають інформацію, яку можна зберегти в трьох кубітах, так як трьох-кубітна система може зберігати вісім станів - 000, 001, 010, 011, 100, 101, 110 і 111. І так далі.

## 1.2. Представлення кубіту

Стан одиничного кубіта можна описати двовимірним вектором-стовпцем одиничної норми, тобто величина в квадраті його елементів повинна в сумі складати 1. Цей вектор, який називається квантовим вектором стану, містить всю інформацію, необхідну для опису одно-кубітної квантової системи, так само, як один біт містить всю інформацію, необхідну для опису стану двійкової змінної.

Будь-який двовимірний вектор стовпця дійсних або комплексних чисел з нормою 1 представляє можливий квантовий стан, утримуваний кубітом. Таким чином  $\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$  представляє стан кубіта, якщо  $\alpha$  та  $\beta$  є комплексними числами, то вони задовольняють умову  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ . Деякі приклади дійсних векторів квантового стану, які описують кубіти:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \text{ та } \begin{bmatrix} 1 \\ \sqrt{2} \\ i \\ \sqrt{2} \end{bmatrix}.$$

Квантові вектори стану  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  та  $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$  займають особливе місце. Ці два вектори складають основу для векторного простору, що описує стан кубіта. Це означає, що будь-який вектор квантового стану можна записати як суму цих базисних векторів. Зокрема, вектор  $\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}$  може бути записаним як  $x\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + y\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ . Будь-яке обертання цих векторів може служити чудовою основою для кубіта і називається обчислювальною основою.

Ми приймаємо ці два квантові стан, щоб відповідати двом станам класичного біта, а саме 0 та 1. Стандартна конвертація полягає у наступному виборі:

$$0 \equiv \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, 1 \equiv \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix},$$

можна було б прийняти і протилежний вибір. Таким чином, із нескінченної кількості можливих квантових станів лише два відповідають станам класичних бітів, всі інші квантові стани – ні.

### 1.3. Сфера Блоха

Сфера Блоха існує для графічного представлення кубітів. Стан кубіта (1.1) можна переписати у вигляді:

$$|\psi\rangle = e^{i\gamma} \left( \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle \right), \quad (1.2)$$

де  $\theta, \varphi$  та  $\gamma$  – дійсні числа. Множник  $e^{i\gamma}$  не призводить до спостережуваних ефектів, тому цей множник можна проігнорувати. Формула (1.2) зводиться до наступного вигляду:

$$|\psi\rangle = \cos\frac{\theta}{2}|0\rangle + e^{i\varphi}\sin\frac{\theta}{2}|1\rangle$$

Числа  $\theta$  та  $\varphi$  задають точку на одиничній тривимірній сфері, як зображено на рис. 1.2. Сфера зображена на рисунку називається сферою Блоха. Вона існує для наочного представлення стану одиничного кубіту. Однак потрібно зауважити про обмеження даного представлення, оскільки невідоме узагальнення сфери Блоха для кількох кубітів.

Кубіт «живе» одночасно в абстрактному двовимірному гільбертовому просторі та у звичайному тривимірному евклідовому. Операції обчислення над кубітом задають через унітарні (оборотні) обертання вектора стану на сфері Блоха. Параметри обертання (напрямок осі та величину кута) задаються фізичною дією на квантовий об'єкт: напруженість електричного поля, частота електромагнітного імпульсу, поляризація фотона тощо. [1]

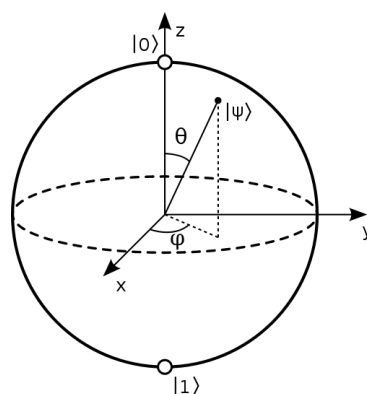


Рисунок 1.2 - Представлення стану кубіта на сфері Блоха

Ще пару прикладів візуалізації станів кубітів за допомогою сфери Блоха зображено на рис. 1.3.

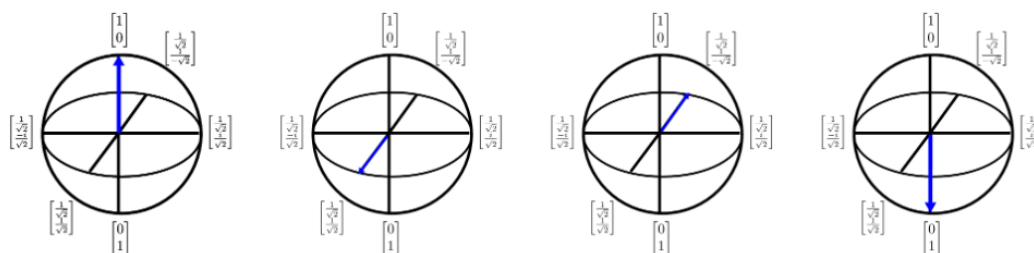


Рисунок 1.3 - Приклади візуалізації сфери Блоха

Стрілки на цій діаграмі показують напрямок, в який спрямований вектор квантового стану, і кожне перетворення стрілки можна розглядати як обертання навколо однієї з основних осей. Хоча думка про квантові обчислення як про послідовність обертань є потужною інтуїцією, використовувати цю інтуїцію для розробки та опису алгоритмів складно.

За допомогою нескінченної кількості вимірювань на однакових кубітах можливо визначити стан кубіта. У випадку не проведення вимірів, на сфері Блоха буде приховано всю еволюцію стану кубіта, так звана прихована квантова інформація. Об'єм цієї додаткової інформації зростає експоненційно зі збільшенням кількості кубітів. Розуміння прихованої інформації є визначальним у питанні про те, що саме робить квантову механіку таким ефективним інструментом обробки інформації.

#### 1.4. Вимірювання кубіту

Знаючи, як представити кубіт, ми можемо отримати певну інтуїцію щодо того, що представляють квантові стани кубіта, обговоривши концепцію вимірювання. Вимірювання відповідає неформальній ідеї «дивитись» на кубіт, який негайно згортає квантовий стан до одного з двох класичних станів  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  або  $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ . Коли кубіт, заданий квантовим вектором стану  $\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix}$  є вимірний, ми отримаємо результат 0 з імовірністю  $|\alpha|^2$  та результат 1 з імовірністю  $|\beta|^2$ . При результаті 0, новий стан кубіта є  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ ; 1 -  $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ .

Варто ще раз звернути увагу, що сума цих імовірностей складає 1 через умову нормалізації  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ .

Властивості вимірювання також означають, що загальний знак вектора квантового стану не має значення. Вектор зі знаком мінус еквівалентний наступному  $\alpha = -\alpha$  та  $\beta = -\beta$ . Тому що імовірність вимірювання 0 та 1 залежить від квадратичної величини доданків, введення знаків взагалі не змінює імовірності.

Важливою властивістю вимірювання є те, що воно не обов'язково пошкоджує всі вектори квантового стану. Якщо кубіт знаходиться у стані  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$ , який відповідає класичному стану 0, вимірювання цього стану завжди дасть результат 0 і залишить квантовий стан незмінним. В цьому випадку, якщо ми маємо тільки стани, які відповідають класичним бітам (наприклад кубіти, які є у станах  $\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}$  або  $\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ ) вимірювання не буде впливати на систему. Це означає, що ми можемо копіювати класичні дані та маніпулювати ними на квантовому комп'ютері, як це можна робити на класичному комп'ютері. Однак здатність зберігати інформацію в обох станах одночасно є тим, що виводить квантові обчислення за рамки того, що можливо класично.



## 2. КВАНТОВІ ОБЧИСЛЕННЯ

Зміни, що відбуваються з квантовим станом, можна описати мовою квантових обчислень. Для чого ж потрібні квантові обчислення? Хоча класичні комп'ютери стають все більш потужними, існують фізичні обмеження на зростання їх продуктивності, цю проблему можна вирішити з використанням квантових комп'ютерів. Сучасні комп'ютери нездатні розв'язати деякі важливі задачі, такі як, наприклад, моделювання квантово-механічних систем. Крім того, існують задачі, які можуть бути розв'язані лише з використанням квантових обчислень (обумовлені властивостями квантових систем). [1]

Фундаментальна модель квантових обчислень – квантові схеми. За аналогією з класичним комп'ютером, який містить дроти та логічні елементи, квантовий комп'ютер будується з квантових схем, що складаються з дротів та елементарних квантових елементів, які дозволяють передавати квантову інформацію та маніпулювати нею. Будь-яка квантова схема відображає перетворення квантової системи. Еволюція квантової системи, яка не зазнає вимірювання, переводить вихідний стан квантової системи в інший стан зі збереженням норми. Для гільбертового простору перетворення має бути оборотним, тобто унітарним. Будь-яке перетворення на  $d$ -вимірному комплексному векторному просторі може бути описане за допомогою матриці розміром  $d \times d$ . Нехай  $M^*$  - транспонована комплексно-спряжена матриця відносно матриці  $M$ . Матриця  $M$  називається унітарною (такою, що описує унітарні перетворення), якщо виконується умова  $M^* M = I$ . Довільне унітарне перетворення квантового простору є допустимим квантовим перетворенням, і навпаки. Таким чином, умова унітарності є єдиним обмеженням, яке накладається на квантові елементи. Унітарне перетворення може бути трактоване як повороти в комплексному векторному просторі.

Важливим наслідком того факту, що будь-яке квантове перетворення унітарне, є його оборотність. Тому квантові логічні елементи (квантові гейти –

quantum gates) мають бути оборотними.

Квантова схема є квантовою обчислювальною моделлю, побудованою з квантових логічних гейтів, в яких обчислювальні кроки синхронізовано по часу. Входи квантових гейтів зв'язані з входами схеми або виходами інших гейтів. Складна унітарна операція може бути представлена у вигляді схеми, яка складається з кількох квантових гейтів.

Здійснюючи унітарні перетворення, які відповідають певним логічним операціям, ми отримаємо квантовий процесор. Роль з'єднань (дротів) виконуватимуть кубіти, а роль логічних блоків (гейтів), на які розкладається весь процес обчислень, виконуватимуть унітарні перетворення. Дана концепція КО була запропонована у 1989 р. Девідом Дейчем. Дейча вважають винахідником універсального логічного блоку, використовуючи котрий можна здійснити будь-які КО. Доведено, що одно- та двохкубітних блоків достатньо для отримання всього необхідного набору унітарних перетворень. [1]

## 2.1. Вентилі Паулі

Вентилі Паулі названі на честь Вольфганга Паулі, який зумів увічнити себе двома найвідомішими принципами сучасної фізики: знаменитим принципом виключення Паулі та ефектом Паулі.

Ворота Паулі засновані на відомих матрицях Паулі (вони ж спінові матриці Паулі), які неймовірно корисні для обчислення змін спіна одиничного електрона. Оскільки спін електронів є одною з найголовніших властивістю використання для кубіта в сучасних квантових воротах, матриці і вентилі Паулі знаходять широке застосування. У будь-якому випадку для кожної осі в просторі (X, Y та Z) існує по суті один вентиль / матриця Паулі.

Вентилі Паулі - це одні з найпростіших квантових вентилів. Вентилі діють на один і лише один кубіт за раз. Це перекладається на прості матриці  $2 \times 2$ .

## 2.2. Вентиль Паулі-X

Вентиль Паулі-X відповідає класичному вентилю NOT. Саме з цих міркувань, вентиль-X також часто називається квантовим NOT вентиляем. На рис. 2.1 наведений приклад графічного зображення вентиляю.



Рисунок 2.1 - Графічне зображення вентиляю Паулі-X

Елемент NOT діє лінійно, здійснюючи наступні перетворення:

$$U_{NOT}(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle) \rightarrow \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$$

Для представлення квантового елемента NOT в матричному вигляді, визначимо матрицю X наступним чином:

$$X \equiv \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Якщо квантовий стан  $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  представити у векторному вигляді:

$$\psi = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix},$$

де  $\alpha$  відповідає амплітуді стану  $|0\rangle$ , а  $\beta$  -  $|1\rangle$ , то дію квантового елемента NOT можна представити наступним чином:

$$X \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \beta \\ \alpha \end{bmatrix}$$

### 2.3. Вентиль Паулі-Z

Елемент  $Z$  займає важливе місце в квантових схемах, він залишає стан  $|0\rangle$  без змін, а  $|1\rangle$  переводить к стан  $-|1\rangle$ :

$$Z \equiv \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

### 2.4. Вентиль Паулі-Y

Елемент  $Y$  є комбінацією елементів  $X$  та  $Z$ . Даний елемент здійснює наступні перетворення:

$$|0\rangle \rightarrow |1\rangle$$

$$|1\rangle \rightarrow -|0\rangle$$

В матричному вигляді елемент  $Y$  має наступний вигляд:

$$Y \equiv \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

### 2.5. Елемент Адамара

Елемент Адамара є фундаментальним квантом вентиляем. Елемент дозволяє нам відійти від полюсів сфери Блоха і створити суперпозицію.

Елемент Адамара представляє собою перетворення, які описуються наступною матрицею:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$$

Відіграє ключову роль в багатьох квантових схемах, здійснюючи такі перетворення:

$$|0\rangle \rightarrow \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

$$|1\rangle \rightarrow \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}}$$

Елемент Адамара є одним з найбільш корисних квантових елементів, тому розглянемо його роботу в представленні на сфері Блоха. Виявляється, тут дії однокубітних елементів відповідають обертанням сфери. Операція Адамара – це обертання сфери навколо осі  $y$  на  $90^\circ$  з наступним обертанням навколо площини  $xz$  на кут  $180^\circ$ , як показано на рис. 2.2.

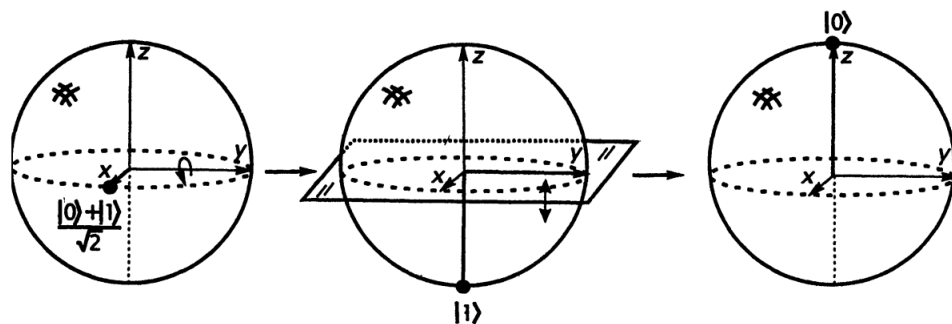


Рисунок 2.2 - Наглядне представлення елемента Адамара за допомогою сфери Блоха

На рис. 2.3 зображено однокубітні квантові елементи.

$$\begin{array}{l} \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad \text{---} \quad \boxed{\mathbf{X}} \quad \text{---} \quad \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle \\ \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad \text{---} \quad \boxed{\mathbf{Z}} \quad \text{---} \quad \alpha|0\rangle - \beta|1\rangle \\ \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad \text{---} \quad \boxed{\mathbf{H}} \quad \text{---} \quad \alpha \frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}} + \beta \frac{|0\rangle - |1\rangle}{\sqrt{2}} \end{array}$$

Рисунок 2.3 - Однокубітні квантові елементи та їх дія на квантовий стан

### 3. ФОТОН ЯК КУБІТ

Різні фізичні сутності можуть бути використані як кубіти, включаючи іони, надпровідні заряди, спіни атомного ядра тощо. Однак кожен із них має той чи інший недолік, який впливає при реалізації повно масштабного квантового комп'ютера з використанням цієї сутності. У цій гонці квантових комп'ютерів фотони також забезпечують кілька переваг порівняно з іншими сутностями, які використовують в якості кубітів.

Найбільша перевага використання фотонів в якості кубітів полягає в тому, що оптичний квантовий комп'ютер може запропонувати в порівнянні з іншими обчислювальними системами те, що вони забезпечують безперервну інтеграцію квантового зв'язку, це відбувається саме завдяки допомозі фотонів та квантових обчислень. Окрім того, використовуючи фотони не легко отримати декогерентність в порівнянні з багатьма іншими системами. Крім того, на відміну від інших претендентів на роль кубіта, фотони не потребують експлуатування при екстремально низьких температурах для того, щоб забезпечити мінімальний тепловий шум.

Однак ці переваги мають один великий недолік. Фотони не взаємодіють між собою. Це є бажана властивість при проектуванні одно-кубітових гейтів, але це створює перегороду при проектуванні дво-кубітних гейтів.

Фотони мають деякі властивості, які роблять їх надзвичайно привабливими для використання в квантових комп'ютерах: фотони мають відносно слабку взаємодію з навколишнього середовища та між собою. Це причина, по якій фотони можуть розповсюджуватись досить далеко у багатьох матеріалах, не розсіюючись і не поглинаючись, надаючи фотонним кубітам хороші властивості когерентності та роблячи їх корисними для передачі квантової інформації на великі відстані. Таким чином, дослідження та розробки в цій галузі важливі для створення міжміських квантових каналів зв'язку, навіть якщо інші технології обертаються

переважно для широкомасштабних обчислювальних програм. Розвиток можливостей фотонного квантового маніпулювання може мати трансформативні програми для квантового зондування та квантового зв'язку.

Експерименти, що доводять квантову запутаність фотонів, тривалі історії, що сягає найдавніших експериментів з пошуку порушень Теорема Белла в 1970-х. За останні кілька десятиліть методи були розроблені, що подолали багато перешкод для створення, маніпулювання та вимірювання багатофотонних переплутаних станів.

Багато в чому фотони - чудові кубіти; однокубітові ворота можуть бути виконуються із використанням стандартних оптичних пристроїв, таких як фазообмінники та роздільники променів, і, як уже згадувалося раніше, вони слабо взаємодіють з речовиною та один з одним, надаючи їм хорошої злагоженості. Але їх сила – слабка взаємодії - також створює велику перешкоду для розвитку фотонній квантові комп'ютери, оскільки двокубітні ворота стає важко створити. У лінійному оптичних квантових обчислень, ефективна сильна взаємодія створюється а поєднання однофотонних операцій та вимірювань, які можуть бути використаним для реалізації двокубітного затвора. Другий підхід, який використовує оптично активні дефекти та квантові точки, які сильно взаємодіють фотони для індукції сильної ефективною взаємодії між фотонами, щодо оптично керованих напівпровідникових кубітів.

У фотонних квантових обчисленнях, як правило, кубіти індивідуальні фотони, з двома різними поляризаціями фотонів (вгору-вниз і ліворуч), що виконують роль двох кубітових станів. Однокубітні ворота можуть бути реалізовані зі стандартними пасивними оптичними компонентами, що використовуються для обертання поляризації, але двокубітні ворота вимагають нелінійності з низькими втратами, що є важко досягти. Як описано в розділі "захоплені іони", створюються випадкові вимірювання на двох вихідних портах роздільника променя сильна ефективна нелінійність і реалізація двокубітових воріт, але ворота імовірнісні. На щастя, ворота сигналізують про успіх (фотони

виявляються на обох детекторах), що означає, що алгоритми можуть бути реалізовані, але вимоги до часу є складними, і а необхідне постійне джерело відповідних ініціалізованих фотонів. Останнім часом, квантові обчислювальні схеми на основі вимірювань, в яких дуже переплутаний “стан кластера” будується перед початком обчислень а саме обчислення здійснюється шляхом проведення вимірювань, викликали значний інтерес.

Багато технічних розробок, необхідних для реалізації фотонного квантові обчислення були досягнуті за останні кілька років. Фотонні чіпи продовжують вдосконалюватися, і рівень втрати фотонів як усередині фотонні елементи та інтерфейси наближаються до необхідних значень мати можливість реалізувати квантову корекцію помилок. Дуже висока ефективність були розроблені фотонні детектори, які є ключовими для здійснення корекції помилок. Ці детектори на основі нанопроволок працюють на температури гелію (близько 4 K), тому охолодження до цієї температури буде потрібно, але, як було описано раніше, таке охолодження, як очікується, буде цілком можливо Припускаючи постійний прогрес у зменшенні рівня втрат фотонів, Основна перешкода на шляху виготовлення пристроїв помірних розмірів - розробити джерело, яке з високою швидкістю генерує триплети заплутаних фотонів. Джерела триплетів переплутаних фотонів існують, але швидкість становить які генеруються сплутані фотонні триплети, потрібно збільшити по суті для цієї стратегії, щоб забезпечити широкомасштабні обчислення. Щодо 2018 рік був найбільшою заплутаною і повністю пов'язаною системою кубітів продемонстровано з використанням трьох ступенів свободи на кожному з шести фотонів, хоча цей метод стикається зі своїми проблемами і навряд чи буде масштабним.

Максимальна масштабованість: оскільки фотони використовуються у фотонному кванті обчислювальні машини зазвичай мають довжини хвиль, які становлять близько мікрона, і оскільки фотони рухаються зі швидкістю світла і, як правило, направляються вздовж одного виміру оптичного чіпа, кількість фотонів і отже, кількість кубітів у фотонному пристрої не може бути такою великою як у



системах з кубітами, які можна локалізувати у просторі. Однак масиви з багатотисячними кубітами, як очікується, буде можливим. Крім того, технологія буде вирішальною для розвитку комутаційних мереж що дозволить квантовий зв'язок у великих масштабах.

Існують різні властивості фотонів, які дозволяють їм бути використовуватись як кубіти. Серед основних - рух по прямій, вони рухаються з постійною швидкістю в даному середовищі та їх поляризацією, тобто полем вібрації електричного поля. Використовуючи ці властивості ми можемо побудувати два основних типи фотонних кубітів:

### 1) Двоканальні кубіти. (dual-rail qubits)

Фотони рухаються по прямій. Отже, якщо обрано два шляхи руху і покладено фотон на будь-який з них, залежно від того, на якому шляху виявлений фотон, ми можемо сказати стосовно квантового стану фотону  $|0\rangle$  або  $|1\rangle$  відповідно. На рис. 3 зображено двоканальний кубіт.



Рисунок 3 - Двоканальний фотонний кубіт. В залежності від того в якому каналі знаходиться фотон, стан кубіту є  $|0\rangle$  або  $|1\rangle$

### 2) Поляризаційний кубіт.

Виходить, що площина вібрації електричного поля може бути під будь-яким кутом, незалежним від напрямку поширення світла (якщо воно перпендикулярне напрямку розповсюдження у 3 вимірах). Отже, електричне поле може приймати будь-який напрямок у двовимірному просторі. Цей двовимірний простір може бути представлений основою, що складається з горизонталі поляризація,  $\langle H|$  та

вертикальна поляризація,  $\langle V \rangle$ . Тоді будь-який інший напрямок можна записати як суперпозицію цих двох.

### 3.1. Виявлення фотону

Життя фотона в квантовому експерименті починається з його генерації і закінчується його виявленням. Обидва процеси повинні бути ефективними, а їх продуктивність та властивості відіграють важливу роль фотонних квантових обчисленнях. Цей розділ присвячений огляду на технологію виявлення одиночних фотонів.

Ідеальний детектор фотонів клацає кожного разу, коли фотон потрапляє на нього і негайно перезапускає свою роботу. Він не виробляє помилково позитивних сигналів, коли не було виявлено реальних фотонів (так званий "темний рахунок"), а також повідомляє, скільки фотонів було виявлено в тому ж просторово-часовому режимі. Таких ідеальних детекторів фотонів поки не існує. Існуючі ДФ відповідно характеризуються ефективністю виявлення  $\eta_d$ , часом скидання  $\tau_R$  (що встановлює максимальну швидкість виявлення), часом виявлення тремтіння  $\tau_j$ , швидкістю підрахунку  $C_d$  та можливістю розпізнавання числа фотонів. Хоча для ФКО насправді не потрібен "ідеальний" ДФ, покращуючи ефективність ДФ до дуже високих рівнів важливо для реалістичної та масштабованої платформи.

Якщо не брати до уваги історичний та екзотичний підходи, то для вибору оптичних квантових інформаційних наукових досліджень ДФ був обраний лавинний фотодіод Si, що працює в режимі Гейгера. Це відносно швидкі ( $\tau_R \leq 100$  нс), малошумні (типовий відлік  $C_d \sim 100$  в секунду) детектори. На жаль, в них присутня обмежена квантова ефективність, як правило, до  $\eta_d \approx 65\%$ , встановлює практичне обмеження кількості фотонів, які можна одночасно використовувати в експерименті. Ймовірність виявити, скажімо, десять фотонів з десятьма детекторами вже менше ніж 2%, і все зростає в геометричній прогресії із

збільшенням числа фотонів. Сі лавині фотодіоди не мають можливостей розпізнавання числа фотонів, і їх максимальний діапазон довжин хвиль досить обмежений. Зокрема, він не охоплює телекомунікаційні діапазони близько 1310 і 1550 нм. Еквівалентний детектор для 1550 нм, InGaAs лавинний фотодіод, страждає від меншої квантової ефективності та вищої можливості підрахунків.

Неефективне виявлення було значним обмежуючим фактором для ФКО протягом деякого часу. Справа почала повертатися на краще з появою надпровідних нанопровідних одно-фотонних детекторів (ННОФД). Вони забезпечили щось наближене до прямої заміни звичайних лавинних фотодіодів: Вони мають порівнянний час скидання ( $\tau_R \approx 40$  нс), але можуть досягти ефективності виявлення до  $\eta_d \approx 0.93$  в діапазоні довжин хвиль телекомунікацій. ННОФД працюють, пропускаючи струм через надпровідний нанопровід, близький до критичного струму - тоді енергія, поглинена навіть одним фотоном, може перевести пристрій до нормального опору. Подальший стрибок напруги фільтрується і посилюється, і реєструється як виявлення. ННОФД дещо складніші в експлуатації, ніж лавинні фотодіоди, оскільки вони вимагають криогенних температур 0,8 К – 3 К (залежно від надпровідного матеріалу), але значне підвищення ефективності виявлення виправдовує незручності. Продуктивність ННОФД також може бути оптимізована до будь-якої довжини хвилі, вибравши відповідний матеріал і створивши відповідну оптичну порожнину, яка огортає нанопровід. Вони також можуть бути розроблені для ефективного взаємодії з волоконно-оптичними входами. Коротше кажучи, не лише забезпечуючи значне збільшення ефективності виявлення, ННОФД дозволили працювати на довжині хвилі телекомунікацій, що виграє від попередньої розробки оптичних матеріалів та ефективних фотонних інструментів. Ця продуктивність детектора корисна для квантового зв'язку та інших програм із низькими втратами.

Досі тривають дослідження надпровідних детекторів, спрямовані на розуміння механізмів виявлення в різних типах нанопроводочних матеріалів, покращення його ефективності з точки зору часу перезавантаження та коливання часу та

розробки нових методів точних вимірювань ефективності виявлення. Також внутрішня можливість кількості підрахунків низька, ННОФД сприйнятливі до випромінювання фонового теплового випромінювання із середовища кімнатної температури вхідного волокна - це можливо уникнути спектральною фільтрацією.

Основним обмеженням цієї технології є відсутність роздільної здатності фотонного числа. Існують інші типи детекторів, заснований на датчиках перехідного краю, також може застосовуватися в експериментах, де підрахунок числа фотонів є важливим. Детектори перехідного краю працюють як болометри з роздільною здатністю на рівні одного фотона: поглинання поблизу надпровідного переходу змінює опір пристрою монотонно з числом фотонів, яке можна прочитати через інтегральні схеми. Детектори перехідного краю мають відмінні навички підрахунку кількості фотонів: в останніх експериментах вони змогли ефективно розрізнити до 20 фотонів в одному просторово-часовому режимі. У той же час вони показали, що можуть досягти  $\eta_d \approx 0.95$  в телекомунікаційному діапазоні довжин хвиль, з подальшим розвитком, що веде до ще вищого  $\eta_d \approx 0.98$ , що наближається до ідеального  $\eta_d = 1$ . Детектори перехідного краю також можна оптимізувати до будь-якої довжини хвилі у видимому та ІЧ діапазонах. Критичним недоліком детектора є його повільна робота з часом мікросекунди скидання та коливанням часу 50 нс. Зусилля щодо покращення показників часу досі триває, демонструється час скидання так швидко, як  $\tau_R \approx 460$  нс, і тремтіння часу до  $\tau_j \approx 2.3$  нс (для фотонів 775 нм). Тим не менше, ці цифри принаймні на два порядки перевищують те, що можна було б вважати практичним для ФКО, де для практичного перемикання літаючих фотонів, ймовірно, потрібні тактові цикли  $\leq 10$  нс.

### 3.2. Генерування фотонів

Наявність виняткових детекторів мало корисно, якщо неможливо ефективно зробити високоякісні фотони, на яких можна кодувати кубіти.

Обчислювальні завдання в найближчій і довгостроковій перспективі вимагають можливості одночасного генерування великої ( $N \approx 10 - 10^{11}$ ) кількості окремих фотонних станів. Очевидним способом досягнення цього є наявність великої ( $N \approx 10 - 10^{11}$ ) кількості детермінованих джерел, які можуть одночасно виробляти по одному і лише одному фотону, натисканням однієї кнопки (тобто на тригерну подію). Більше того, ці фотони обов'язково повинні бути:

- ефективно зібрані, щоб бути відправленими в процесор РQS і не втрачені (наприклад, шляхом поглинання, розсіювання, дифракції або невідповідності режиму під час генерації та процесу з'єднання волокна);
- у чистому квантовому стані і не відрізнити один від одного;
- і сумісні з матеріалом з низькими втратами та високоефективною технологією виявлення зверху.

В даний час джерел, які належним чином задовольняють цей перелік, не існує. Однак справді детерміновані високоякісні джерела фотонів розробляються з використанням різноманітних фізичних систем, таких як захоплені іони та атоми, кольорові центри в діамантах, напівпровідники, квантові точки, та інші, більш екзотичні, методи. Деякі з них покладаються на використання єдиного випромінювача, який, в принципі, природно забезпечує одно-фотонну емісію на вимогу, тоді як інші, такі як атомний ансамбль та параметричні нелінійні процеси вимагають сигналів попередження та перемикування, щоб зробити їх такими.

### 3.3. Керування фотоном

Коротко звернемо увагу на технології маніпулювання фотонами для ФКО. Точний та детальний контроль поляризацією фотона, траєкторією або статичним значенням часу завжди був силою ФКО. Нещодавно, це поширювалося на виконання перетворених режимів в інтегрованій квантовій оптиці. Сучасні

електрооптичні елементи, такі як Покелс комірки або інтегровані електрооптичні модулятори, дозволяють швидко переключати поляризацію, достатньо чітко виконувати тести Белла з локалізацією та закритими лазівками свободи вибору або перемикають просторовий режим для цілей мультиплексування джерел. Ефективні способи для маніпулювання такі як частота або поперечні просторові режими також є в розробці, включаючи методи, що передають інформацію від одного ступеня свободи до іншого, наприклад поляризація до просторового поперечного режиму, дискретних змінних до безперервної змінної, перетворення частоти, тощо.

## 4. КВАНТОВІ ПОМИЛКИ

До цього часу ми мали справу виключно з замкнутими квантовими системами, тобто з квантовими системами, які не зазнають небажаних взаємодій із зовнішнім середовищем. Хоча можна зробити завдання, які можуть виконуватися в принципі в ідеальних системах, але на практиці спостереження загартовуються тим, що в реальному світі не існує ідеально закритих систем, крім, можливо, Всесвіт в цілому. Реальні системи страждають від небажаної взаємодії з зовнішнім світом. Ці небажані взаємодії виявляються як шум в квантовій системі обробки інформації. Потрібно розуміти та контролювати такі шумові процеси та квантові помилки, при побудові квантових систем обробки інформації.

### 4.1. Квантова декогерентність

Здається, що квантові обчислення з кожним днем стають дедалі прогресивнішими. Кубіти стають чистішими, ворота покращуються, а алгоритми ускладнюються. Очевидно, лише питання часу, коли квантові обчислення стануть основною технологією. Однак залишається велика перешкода, яка потребуватиме величезних зусиль для подолання: декогерентність.

Квантові комп'ютери обіцяють експоненціальне прискорення у вирішенні певних типів задач за допомогою квантових принципів, таких як суперпозиція та переплутування, але використання квантових станів також робить квантовий комп'ютер набагато вразливішим до помилок, ніж класичний комп'ютер. Ці помилки виникають внаслідок декогеренції - процесу, в якому середовище взаємодіє з кубітами, неконтрольовано змінюючи їх квантові стани і спричиняючи втрату інформації, що зберігається квантовим комп'ютером.

Декогерентність може виникати в багатьох аспектах навколишнього середовища: зміна магнітного та електричного полів, випромінювання теплих

предметів поблизу або перехресні взаємодії між кубітами. Квантові вчені вирішили для них роботу з боротьби з усіма цими потенційними джерелами декогеренції.

Ще одне застосування квантової механіки таке, що експлуатує, а не нарікає на надзвичайну чутливість квантового стану до навколишнього середовища. Це поле квантових вимірювань.

Метою квантових вимірювань є використання накладених та заплутаних станів, які набагато чутливіші до навколишнього середовища, ніж звичайні класичні стани. Вища чутливість цих станів дозволяє нам виміряти довкілля точніше, ніж ми могли б.

Ось як це працює. Принцип невизначеності Гейзенберга говорить, що якщо ми дуже точно вимірюємо один аспект системи, наприклад, позицію об'єкта, то ми втрачаємо інформацію про інший аспект системи, наприклад, як швидко об'єкт рухається. У регулярному класичному стані, який не поводить квантово механічно, невизначеність положення та імпульсу є фіксованими значеннями. Але якщо ми маємо квантовий контроль над станом, ми можемо зігнути правила на свою користь.

Квантовий процес зменшення невизначеності в одному напрямку також влучно називають стисканням.

## **4.2. Квантова корекція помилок**

Протоколи квантової корекції помилок відіграють центральну роль у реалізації квантових обчислень; вибір коду виправлення помилок вплине на весь стек квантових обчислень, починаючи з макета кубітів на фізичному рівні для створення стратегій компіляції на програмному рівні. Як такий, знайомство з квантовим кодуванням є важливою передумовою розуміння поточної та майбутньої архітектур квантових обчислень.

Замість бітів у традиційних комп'ютерах квантові комп'ютери працюють, керуючи та маніпулюючи квантовими бітами (кубітами). Через точний контроль



квантових явищ, таких як переплутування, в принципі можливо, щоб такі пристрої на основі кубітів перевершили свої класичні аналоги. З цією метою були розроблені ефективні алгоритми квантових обчислень додатки, такі як цілочисельна факторизація, пошук, оптимізація та квантова хімія.

В даний час не існує кращої технології кубіта; досліджуються різноманітні фізичні системи для використання в якості кубітів, включаючи фотони, захоплені іони, надпровідні ланцюги та спіни в напівпровідниках. Недоліком усіх цих підходів є те, що він є важко достатньо ізолювати кубіти від впливу зовнішніх шумів, що означає помилки під час квантові обчислення неминучі. На відміну від цього, біти в класичному комп'ютері зазвичай реалізуються як надійні стани ввімкнення / вимкнення транзисторних перемикачів, які диференціюються на мільярди електронів. Це забезпечує класичні біти з великими межами помилок, які майже викорінюють фізичні помилки рівень. Для квантових комп'ютерів, де кубіти реалізуються як крихкі квантові системи, цього немає такий захист від помилок. Як такий, будь-яка квантова модель комп'ютерної моделі на основі струму і майбутні кубітові технології вимагатимуть певного виду активної корекції помилок.

Керуючись вимогами високопродуктивних мереж зв'язку та Інтернету, є добре розроблена теорія класичного виправлення помилок. Однак адаптація існуючої класичної Методи квантової корекції помилок не є простими. Кубіти підлягають забороні клонування теорема, що означає квантову інформацію, не можна дублювати так само, як класичну інформація. Крім того, неможливо проводити довільні вимірювання на кубітному регістрі через проблему колапсу хвильової функції. Спочатку побоювалися, що ці обмеження будуть створюють непереборний виклик життєздатності квантових обчислень. Однак прориву було досягнуто в 1995 році Пітером Шором, в якому пропонується перша квантова корекція помилок схеми. Метод Шора продемонстрував, як квантову інформацію можна надмірно кодувати заплутавши його через розширену систему кубітів. Подальші результати тоді це продемонстрували розширення цієї методики в принципі можуть бути використані для довільного придушення квантової помилки

норми, за умови дотримання певних фізичних умов на самих кубітах. Це було с ці розробки в квантовій корекції помилок, з яких перейшло поле квантових обчислень теоретична цікавість до практичної можливості.

### 4.3. Від класичної до квантової корекції помилок

Основним принципом виправлення помилок в класичних обчисленнях, в яких дані представлені у вигляді послідовностей бітів є те, що збільшується кількість бітів, що використовуються для кодування заданого обсягу інформації. Точний спосіб це надлишкове кодування досягається, визначається набором інструкцій, відомим як виправлення помилок код.

Наприклад, припустимо, ми хочемо передати біт з одного місця в інше через шумний класичний канал зв'язку. Ефект шуму в каналі полягає в перевертанні біт, що передається з імовірністю  $p > 0$ , тоді як з імовірністю  $1 - p$  біт є передається без помилок. Такий канал відомий як двійковий симетричний канал, і показаний на рис. 4.1. Простий засіб захисту від впливу шуму у двійковому симетричному каналі має замінити біт, який ми хочемо захистити, трьома копії себе.

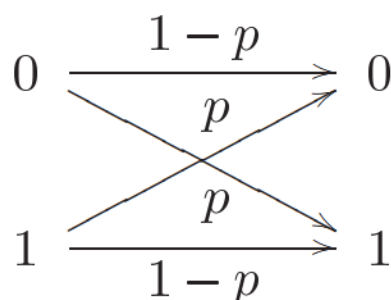


Рисунок 4.1 - Бінарний симетричний канал

Такий спосіб виправлення помилок є трибітний код повторення, шифратор що дублює кожне бітове значення  $0 \rightarrow 000$  та  $1 \rightarrow 111$ . Більш формально ми можемо визначити три біти шифратор як відображення від «необробленого» двійкового алфавіту  $\beta$  до кодового алфавіту  $C_3$ :

$$\beta = \{0, 1\} \rightarrow C_3 = \{000, 111\}$$

де закодовані бітові рядки «000» та «111» називаються логічними кодовими словами коду  $C_3$ . Як приклад, розглянемо простий випадок, коли ми хочемо передати однобітове повідомлення «0» одержувачу в іншому місці. Використовуючи трибітове кодування, повідомлення, яке ми хотіли б відправити буде кодовим словом «000».

А тепер уявимо, що повідомлення під час передачі спричиняє одну помилку відхилення біта бітовий рядок, який отримує одержувач, - «010». У цьому випадку одержувач зможе зробити висновок про це передбачене кодове слово - «000» за допомогою більшості голосів. Те саме буде справедливим для всіх випадків, коли кодове слово зазнає лише однієї помилки. Однак, якщо кодове слово зазнає двох помилок фліп-фліпу, більшість голосів призведе до неправильного кодового слова. Остаточний сценарій, який слід врахувати, - це коли всі три біти перевертаються так, що кодове слово «000» стає «111». У цьому випадку повідомлення пошкоджене також є кодовим словом: одержувач, таким чином, не зможе дізнатися, що сталася помилка. Відстань коду визначається як мінімальна кількість помилок, які змінять одне кодове слово на інший таким чином. Ми можемо пов'язати відстань  $d$  коду з кількістю помилок, які він може виправити наступним чином:

$$d = 2t + 1,$$

де  $t$  - кількість помилок, які може виправити код. Зрозуміло, що наведене вище рівняння виконується для трибітового коду, де  $t = 1$  і  $d = 3$ .

Загалом коди виправлення помилок описуються в термінах позначення  $[n, k, d]$ , де  $n$  – це загальна кількість бітів на кодове слово,  $k$  - кількість закодованих бітів (довжина оригіналу біт-рядок), а  $d$  - відстань коду. Під цим позначенням трибітний код повторення позначений  $[3, 1, 3]$ .

Таким чином, для захисту квантових станів від впливу шуму ми хотіли б розробити квантові коди для виправлення помилок, засновані на подібних принципах. Існують деякі важливі відмінності між класичною інформацією та квантовою інформацією, що вимагає нових ідей бути введеними, щоб зробити можливими такі квантові коди, що виправляють помилки. Зокрема, на перший погляд, у нас є три досить суттєві труднощі:

- Немає клонування: можна спробувати реалізувати код повторення квантово механічно шляхом дублювання квантового стану три або більше разів. Це заборонено Теорема про відсутність клонування. Навіть якщо клонування була можливо, неможливо було б виміряти і порівняти три квантові стани вихід з каналу.
- Помилки постійні: на одному кубіті може виникати континуум різних помилок. Визначення помилки, яка сталася для того, щоб її виправити, здається, вимагає нескінченна точність, а отже і нескінченні ресурси.
- Вимірювання руйнує квантову інформацію: при класичній корекції помилок ми спостерігати за виходом з каналу та вирішити, яку процедуру декодування прийняти. Спостереження в квантовій механіці зазвичай руйнує квантовий стан при спостереження, і робить процес відтворення неможливим.

На щастя, жодна з цих проблем не є фатальною, як ми продемонструємо. Припустимо, ми відправляємо кубіти через канал, який залишає кубіти недоторканими з імовірністю  $1 - p$ , і перевертає кубіти з ймовірністю  $p$ . Тобто, з імовірністю  $p$  приймається стан  $|\psi\rangle$  стан  $X|\psi\rangle$ , де  $X$  - звичайний оператор сигма  $x$  Паулі або оператор фліп-біту. Це Канал називається бітовим фліп-каналом, і тепер ми пояснимо код фліп-біту, який може використовувати для захисту кубітів від впливу шуму від цього каналу.

Припустимо, ми кодуємо єдиний кубітовий стан  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  в три кубіти наступним чином  $\alpha|000\rangle + \beta|111\rangle$ . Зручний шлях запису цього шифрування є наступним:

$$|0\rangle \rightarrow |0_L\rangle \equiv |000\rangle$$

$$|1\rangle \rightarrow |1_L\rangle \equiv |111\rangle$$

де розуміється, що суперпозиції базових станів беруться за відповідні суперпозиції закодованих станів. Позначення  $|0_L\rangle$  та  $|1_L\rangle$  вказують на те, що це логічний  $|0\rangle$  та логічний  $|1\rangle$  стани, а не фізичний нуль та один стан. Схема виконання цього кодування показано на рис. 4.2.

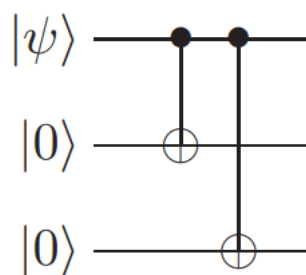


Рисунок 4.2 - Схема кодування для трикубітного бітового фліп-коду. Дані, що кодуються, надходять у схему на верхню лінію

#### 4.4. Види квантових помилок

В результаті оцифрування помилки, існує два основні типи квантових помилок, які потрібно враховувати квантовими кодами. Помилки типу Паулі  $X$  можна вважати квантовими біт-фліпс (bit-flips) які мають наступну відповідність  $X|0\rangle = |1\rangle$  та  $X|1\rangle = |0\rangle$ . Дія  $X$ -помилки на загальний стан кубіта є

$$X|\varphi\rangle = \alpha X|0\rangle + \beta X|1\rangle = \alpha|1\rangle + \beta|0\rangle$$

Другий тип квантової помилки,  $Z$ -помилка, часто називають фазовим відхиленням і не має класичного аналога. Фазово-відхилення відображення базису кубітів  $Z|0\rangle = |0\rangle$  та  $Z|1\rangle = -|1\rangle$ , а отже, має наступну дію на загальний стан кубіта

$$Z|\varphi\rangle = \alpha Z|0\rangle + \beta Z|1\rangle = \alpha|0\rangle - \beta|1\rangle$$

Наразі для простоти я обмежив обговорення когерентними помилками, що діють на одиничні кубіти. Однак, оцифровка результату помилки узагальнює до довільних процесів квантових помилок, включаючи ті які описують некогерентну еволюцію квантового стану в результаті взаємодії кубітів з їх середовищем.

## 5. КВАНТОВІ АЛГОРИТМИ

Чи можемо ми моделювати класичну логічну схему за допомогою квантової схеми? Не дивно, що відповідь на це питання виявляється позитивною. Було б дуже дивно, якби цього не можливо було зробити, оскільки фізики вважають, що всі аспекти навколишнього світу, включаючи класичні логічні схеми, зрештою можна пояснити за допомогою квантової механіки. Квантові схеми не можна використовувати для безпосереднього моделювання класичних схем тому, що унітарні квантові логічні ворота за своєю суттю є оборотними, тоді як багато класичні логічні ворота, такі як ворота, за своєю суттю незворотні.

Будь-яку класичну схему можна замінити еквівалентною схемою, що містить лише оборотні (реверсивні) елементи, використовуючи реверсивні ворота, відомі як ворота Тоффолі. Ворота Тоффолі має три вхідні біти та три вихідні біти, як показано на рис 5.1. Два біти є контрольні біти, на які не впливає дія воріт Тоффолі. Третій біт – ціль біт, який перевертається, якщо для обох контрольних бітів встановлено значення 1, а в іншому випадку залишається в спокої. Зауважте, що застосування два рази Тоффолі двічі до набору бітів має ефект  $(a, b, c) \rightarrow (a, b, c \oplus ab) \rightarrow (a, b, c)$ , отже, ворота Тоффолі є реверсивними воротами.

Входи			Виходи		
$a$	$b$	$c$	$a'$	$b'$	$c'$
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	0	1
0	1	0	0	1	0
0	1	1	0	1	1
1	0	0	1	0	0
1	0	1	1	0	1
1	1	0	1	1	1
1	1	1	1	1	0

Рисунок 5.1 - Таблиця істинності для елемента Тоффолі та його схемна реалізація

Ворота Тоффолі можна використовувати для імітації NAND воріт, як показано на рис. 5.2, та також можна використовувати для FANOUT, як показано на рис. 5.3. За допомогою цих двох операцій стає можливим моделювати всі інші елементи в класичному ланцюзі, а отже, довільним класична схема може бути змодельована еквівалентною оборотною ланцюгом.

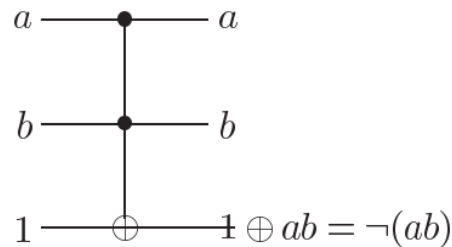


Рисунок 5.2 - Класична схема, що реалізує ворота NAND за допомогою воріт Тоффолі. Два верхні біти представляють входні дані до NAND, в той час як третій біт готується у стандартному стані 1, іноді його називають допоміжним станом.

Вихід з NAND є на третій біт

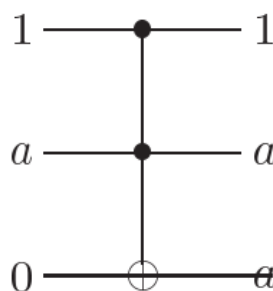


Рисунок 5.3 - FANOUT на основі воріт Тоффолі, причому другий біт є входним сигналом до FANOUT (і два інших біти стандартних станів допоміжних елементів), а вихід FANOUT з'являється на другому і третьому бітах

Ворота Тоффолі були описані як класичні ворота, але вони також можуть бути реалізовані як квантові логічні ворота. За визначенням, квантова логічна реалізація воріт Тоффолі просто переставляє обчислювальні базові стани так само, як класичний ворота Тоффолі. Наприклад, квантові ворота Тоффолі, що діють на стан  $|110\rangle$ , перевертають третій кубіт оскільки перші два встановлені, в результаті чого стан  $|111\rangle$ . Не складно записати це перетворення як матрицю 8 на 8,  $U$ , і явно



перевірити, що  $U$  є унітарна матриця, і, отже, ворота Тоффолі є законними квантовими воротами. Квантові Ворота Тоффолі можуть бути використані для імітації незворотних класичних логічних воріт, як класичні. Ворота Тоффолі були і гарантують, що квантові комп'ютери здатні виконувати будь-які обчислення, яке може зробити класичний (детермінований) комп'ютер.

Що робити, якщо класичний комп'ютер недетермінований, тобто має здатність генерувати випадкові біти, які будуть використані при обчисленні? Не дивно, що це легко імітувати це за допомогою квантового комп'ютеру. Для виконання такого моделювання виявляється достатньо виробляти випадкові справедливі підкидання монет, що можна зробити, підготувавши кубіт у стані  $|0\rangle$ , відправляючи його через ворота Адамара для отримання  $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ , а потім вимірюючи стан. Результат буде  $|0\rangle$  або  $|1\rangle$  з імовірністю 50/50. Це забезпечує квантовий комп'ютер можливість ефективно імітувати недетермінований класичний комп'ютер.

Звичайно, якби здатність моделювати класичні комп'ютери була єдиною особливістю квантових комп'ютерів, мало б було сенсу йти на всі проблеми експлуатації квантових ефектів! Перевага квантових обчислень полягає в тому, що можуть бути обчисленими набагато потужніші функції за допомогою кубітів і квантових воріт.

## 5.1. Квантовий паралелізм

Квантовий паралелізм є фундаментальною особливістю багатьох квантових алгоритмів. Евристично і, ризикуючи надто спростити, квантовий паралелізм дозволяє квантовим комп'ютерам оцінити функцію  $f(x)$  для багатьох різних значень  $x$  одночасно. У цьому підрозділі буде розглянуто, як працює квантовий паралелізм, та деякі його обмеження.

Припустимо,  $f(x): \{0, 1\} \rightarrow \{0, 1\}$  - це функція з однобітовим доменом та діапазоном. Зручним способом обчислення цієї функції на квантовому комп'ютері

є розгляд двох кубітовий квантовий комп'ютер, який запускається у стані  $|x, y\rangle$ . З відповідною послідовністю логічних воріт можна перетворити цей стан в  $|x, y \oplus f(x)\rangle$ , де  $\oplus$  вказує додавання за модулем 2; перший регістр називається регістром даних, а другий реєстром 'Цільовий' реєстр. Дамо перетворення, визначене відображенням  $|x, y\rangle \rightarrow |x, y \oplus f(x)\rangle$  а ім'я,  $U_f$ , і зауважте, що це легко виявляється унітарним. Якщо  $y = 0$ , то кінцевий стан другий кубіт - це лише значення  $f(x)$ . Для наших цілей це можна вважати таким чорний ящик, як зображено на рис. 5.4.

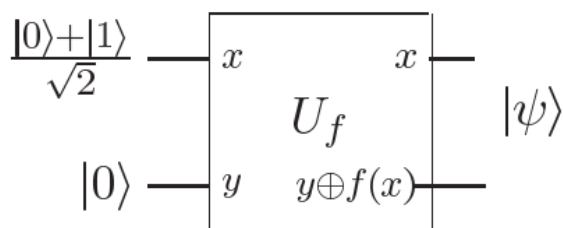


Рисунок 5.4 - Квантова схема для розрахунку  $f(0), f(1)$  одночасно.  $U_f$  квантова схема, яка трансформує входи такі як  $|x, y\rangle$  до  $|x, y \oplus f(x)\rangle$ .

Розглянемо схему, показану на рисунку 10.1.1., яка застосовує  $U_f$  до входу, що не знаходиться в обчислювальній основі. Натомість регістр даних готується в суперпозиції  $(|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ , які можна створити за допомогою воріт Адамара, що діють на  $|0\rangle$ . Тоді ми застосовуємо  $U_f$ , на результуючий стан:

$$\frac{|0, f(0)\rangle + |1, f(1)\rangle}{\sqrt{2}}$$

Це чудовий стан! Різні терміни містять інформацію як про  $f(0)$ , так і про  $f(1)$ ; це майже так, ніби ми оцінили  $f(x)$  для двох значень  $x$  одночасно, ознаки відомий як "квантовий паралелізм". На відміну від класичного паралелізму, де по кілька ланцюгів кожен побудовані для обчислення  $f(x)$  виконуються одночасно, тут використовується одна схема  $f(x)$  оцінити функцію для кількох значень  $x$

одночасно, використовуючи здатність квантового комп'ютера знаходитись у суперпозиціях різних станів.

Цю процедуру можна легко узагальнити на функції на довільній кількості бітів, шляхом використовуючи загальну операцію, відому як перетворення Адамара, або іноді перетворення Уолша - Адамара. Ця операція - це просто  $n$  воріт Адамара, що діють паралельно на  $n$  кубітів. Наприклад, на рис. 5.5 показано випадок  $n = 2$  із спочатку підготовленими кубітами як  $|0\rangle$ , що дає

$$\left(\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}\right)\left(\frac{|0\rangle + |1\rangle}{\sqrt{2}}\right) = \frac{|00\rangle + |01\rangle + |10\rangle + |11\rangle}{2}$$

як вихід.  $H^{\otimes 2}$  слугує для позначення паралельної дії двох воріт Адамара і '⊗' читається як 'тензор'. Більш загально, результат виконання перетворення Адамара над  $n$  кубітами спочатку у всіх станах  $|0\rangle$  є

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_x |x\rangle,$$

де сума перевищує всі можливі значення  $x$ , і для позначення цієї дії ми пишемо  $H^{\otimes n}$ . Тобто перетворення Адамара виробляє рівну суперпозицію всіх обчислювальних базових станів. Більше того, він робить це надзвичайно ефективно, створюючи суперпозицію  $2^n$  станів, використовуючи лише  $n$  воріт.

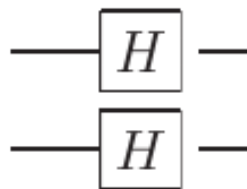


Рисунок 5.5 - Перетворення Адамара  $H^{\otimes 2}$  на двох кубітах.

## 5.2. Пошук в базі даних

Прикладом ефективного квантового алгоритму є алгоритм пошуку інформації в невпорядкованій базі даних, іноді ще названий алгоритмом перебору. В 1997 році був запропонований алгоритм вирішення наступної достатньо простої задачі: даний неупорядкований набір з  $N$  предметів, знайти номер предмету, який співпадає з даним зразком. Класичний метод послідовного порівняння зразку зі всіма предметами потребує в середньому  $N/2$  порівнянь. Запропонований Гровером квантовомеханічний алгоритм потребує порядку  $\sqrt{N}$  кроків. Працює він наступним чином.

Ми повинні якось розрізнити потрібний елемент за номером  $j$  від усіх інших. Припустимо, що нам для цієї задачі сконструйований унітарний оператор порівняння  $S$ , котрий виділяє потрібний елемент наступним чином: він діє як тотожний на не потрібні елементи та міняє фазу у потрібного:

$$S|i\rangle = |i\rangle \text{ при } i \neq j \text{ та } S|j\rangle = -|j\rangle$$

Візьмемо квантовий регістр, достатньо довгий, щоб число його станів перевищувало  $N$ . Переведем його в «універсальний» стан, в котрому всі можливі стани регістра присутні з рівними амплітудами. Позначимо амплітуду виділеного стану  $a$ , звичайного –  $b$ . Якщо стан регістру для стислості обозначити парою цих амплітуд, можна описати первісний стан як

$$|a, b\rangle = a|j\rangle + b \sum_{i \neq j} |i\rangle,$$

де по умові нормування  $a^2 + (N - 1)b^2 = 1$ . В первісному стані  $a = b = 1/\sqrt{N}$ . Застосуємо до цього стану складне перетворення  $U_G$ , котре визначене наступним чином: спочатку перетворення  $S$ , потім перетворення Фур'є, зміна знака у всіх

компонент за виключенням  $|0\rangle$ , зворотнє перетворення Фур'є. Можна показати, що це перетворення приводить до наступного результату:

$$U_G|a, b\rangle = \left| \frac{2N-2}{N}b + \frac{N-2}{N}a, \frac{N-2}{N}b - \frac{2}{N}a \right\rangle.$$

Коефіцієнт при виділеному елементі став дещо більше, чим при інших. Фактично виконаний певний поворот в просторі в напрямлені чистого стану  $|j\rangle$ . Далі ми застосовуємо перетворення  $U_G$   $m$  разів, де  $m \approx (\pi/4)\sqrt{N}$ . При цьому первісний стан наближується до чистого  $|j\rangle$ . Залишається тільки заміряти його.

Іноді цей метод порівнюють з випічкою пирога в печі: квантовий стан поміщають в «квантову піч», и відповідь миттєво визріває до готовності. Якщо його висунути дуже рано, він буде сирий, неточний; якщо перетримати, він згорить та розсиплеться. Доведено, що метод цей оптимальний – ніякий квантовий алгоритм не може працювати швидше ніж за час порядку  $O(\sqrt{N})$ . Слід зауважити, що прискорення в даному випадку не експоненційне, так що для теорії обчислень цей метод нічого нового не дає.

Але практична користь даного методу велика. Це насправді є універсальний алгоритм перебору. Існує багато задач, в котрих знайти відповідь не є просто, а перевірити, що рішення правильне – просто. Яскравим прикладом є підбір пароля до зашифрованих даних. Будь-яку таку задачу можна вирішувати повним перебором методу Гровера – перевірку правильності рішення можна вставити в алгоритм порівняння  $S$ .

## 6. РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ТА ЇЇ ЗАПУСК НА КВАНТОВОМУ КОМП'ЮТЕРІ

В якості практичної частини була розроблена програма, яка демонструє принцип дії елемента Адамара, логічного вентиля Паулі Х та операції порівняння. В ході програми задіяно два кубіти: до одного з котрих задіяний елемент Адамара, а до іншого вентиль Паулі Х, який спрацьовує при істинному значенні (квантовий стан  $|1\rangle$ ) першого кубіту, який завдяки дії елемента Адамара знаходиться в суперпозиції. Таким чином утворюється квантова заплутаність, при котрому квантовий стан одного кубіта впливає на стан іншого.

Програма була запущена на класичному комп'ютері, використовуючи спеціальне програмне забезпечення (більш детально в пункті 6.1.), яке імітує квантовий комп'ютер. Можна назвати це ідеальні умови для квантової системи, без впливу на систему зовнішнього середовища. Також відбувся запуск програми на справжньому квантовому комп'ютері компанії IBM, який територіально знаходиться в Мельбурні. Цікавим фактом сьогодення дійсного квантового комп'ютеру є те, що для запуску програми потрібно зайняти чергу. В моєму випадку черга зайняла 4 години.

Отримані результати виконання програм на класичному та квантовому комп'ютері описані та проаналізовані в пункті 6.3.

### 6.1. Програмне забезпечення

В якості програмного забезпечення використовувалось Qiskit. Qiskit - це програмне забезпечення з відкритим кодом для роботи з квантовими комп'ютерами на рівні схем, імпульсів та алгоритмів. Крім того, поверх цього основного модуля існує кілька API додатків для конкретного домену.

Основна мета Qiskit - створити стек програмного забезпечення, який дає змогу користування квантовими комп'ютерами кожному, незалежно від рівня їх кваліфікації або сфери інтересів. Qiskit дозволяє легко розробляти експерименти та програми та запускати їх на реальних квантових комп'ютерах або класичних тренажерах. Qiskit підтримує Python 3.6 або новіші версії.

Використовувалась Qiskit версії 0.26.2. Офіційний сайт: <https://qiskit.org>.

## 6.2. Код програми

Першим кроком є підключення необхідних модулів з бібліотеки qiskit:

```
from qiskit import *
```

далі необхідно вказати необхідну кількість кубітів, яка буде використовуватись в системі, в нашому випадку це два кубіти. Робиться наступним чином:

```
qr = QuantumRegister(2)
```

змінна qr – це змінна, яка являється масивом, що містить два об'єкти класу кубітів. Наступним кроком є вказання необхідної кількості класичних бітів, оскільки вимір стану кубіта – це є процес перенесення стану кубіта на класичний біт. Відповідно в нашому випадку необхідною кількістю класичних бітів є два

```
cr = ClassicalRegister(2)
```

далі треба «зібрати» квантову схему:

```
circ = QuantumCircuit(qr, cr)
```

для того, щоб впевнитись, що ми маємо необхідну кількість кубітів та бітів в схемі ми можемо скористатись наступними командами:

```
%matplotlib inline
circ.draw()
```

результатом роботи функції `draw()` є вивід в консоль поточної схеми рис. 6.1. Як можна побачити зі схеми, наразі ми маємо два кубіти та два класичних біти, що відповідає дійсності.

```
q0_0:
q0_1:
c0: 2/
```

Рисунок 6.1 – Результат в консолі після команди `circ.draw()`

Наступним кроком є створення елемента Адамара, який буде діяти на перший кубіт:

```
circ.h(qr[0])
circ.draw(output='mpl')
```

На рис. 6.2. можна побачити поточний стан схем з елементом Адамара.

```
q00 — H —
q01 —
c0 2
```

Рисунок 6.2 – Проміжна схема, застосування елемента Адамара



Наступним кроком є застосування вентиля Паулі X на другому кубіті та логічне порівняння, яке застосовує вентиль Паулі X тільки в тому випадку, коли перший кубіт знаходиться в істинному логічному стані. Відповідно створюємо квантову запутаність.

```
circ.cx(qr[0], qr[1])
circ.draw(output='mpl')
```

Проміжна схема виглядає наступним чином рис. 6.3.

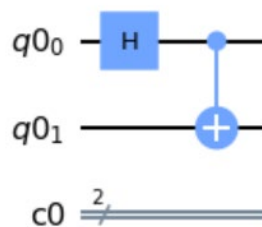


Рисунок 6.3 – Проміжна схема, застосування вентиля Паулі X

Передостаннім важливим кроком є вимірювання квантових станів. Реалізується це наступним чином. По суті це процес копіювання квантового стану кубіту у класичний стан біту.

```
circ.measure(qr, cr)
circ.draw(output='mpl')
```

На рис. 6.4. можна побачити кінцеву схему.

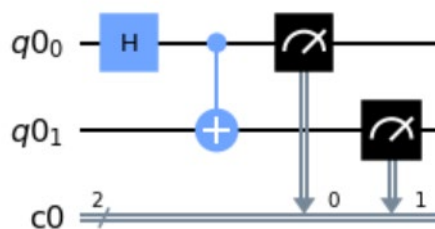


Рисунок 6.4 – Кінцева схема програми

Фінальним кроком є запуск програми. Для початку запустимо програму на симуляторі квантового комп'ютеру:

```
simulator = Aer.get_backend('qasm_simulator')
result = execute(circ, backend = simulator).result()
```

Щоби графічно побачити результати підключаємо необхідну бібліотеку та виводимо результати:

```
from qiskit.tools.visualization import plot_histogram
plot_histogram(result.get_counts(circ))
```

На рис. 6.5. можна побачити результат програми.

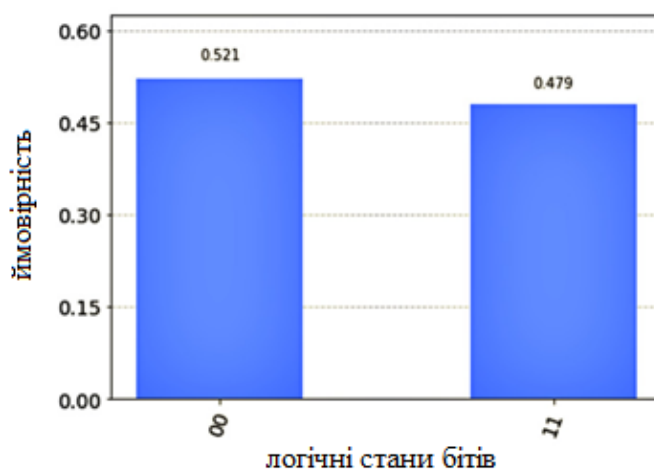


Рисунок 6.5 – Результат програми на класичному комп'ютері

Тепер запустимо програму на дійсному квантовому комп'ютері IBM. Для цього в першу чергу необхідну загрузити дані свого аккаунту, який був попередньо створений на IBM Quantum (офіційний сайт: <https://quantum-computing.ibm.com>) та вкажемо на якому конкретному комп'ютері ми хочемо запустити програму.

```

IBMQ.load_account()
provider = IBMQ.get_provider('ibm-q')
qcomp = provider.get_backend('ibmq_16_melbourne')
job = execute(circ, backend=qcomp)

```

Для того щоб відслідковувати стан своєї черги підключаємо наступну бібліотеку та виведемо наш номер в черзі.

```

from qiskit.tools.monitor import job_monitor
job_monitor(job)

```

Отримуємо повідомлення в консолі, що наша програма є під 36-тим номером у черзі.

Job Status: job is queued (36)

Почекавши в черзі 4 години отримуємо результат виконання програми (рис. 6.6.).

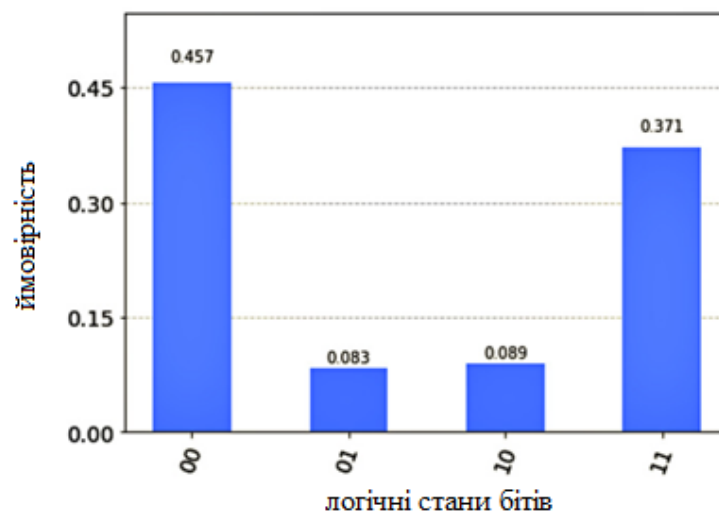


Рисунок 6.6 – Результат програми на справжньому квантовому комп'ютері

### 6.3. Аналіз отриманих результатів

Проаналізувавши результати отримані на класичному та квантовому комп'ютері можна зробити наступні висновки. Очікуваний результат програми є отримання станів 00 та 11 з 50% у кожного, по факту це підкидання монети. Оскільки вентиль Паулі X це аналог логічній функції НІ. В той час, коли перший кубіт перебуває в істинному логічному стані, він дає змогу застосуватись вентилю Паулі X на другому кубіті, відповідно переводячи другий кубіт з  $|0\rangle$  в  $|1\rangle$ . Таким чином маємо два кубіти в стані  $|1\rangle$ . Відповідно коли перший кубіт перебуває у квантову стані  $|0\rangle$ , що не відповідає вимогам для застосування вентиля Паулі X, то і другий перебуває у стані  $|0\rangle$ . Оскільки на перший кубіт діє елемент Адамара, тобто він перебуває у суперпозиції. То справді стан 00 та 11 на класичних бітах буде очікуватись з 50 % кожний. Цей результат і демонструє класичний комп'ютер з невеликою похибкою, яку можна списати на похибку обчислень.

Але у випадку з справжнім квантовим комп'ютером маємо наступну картину, що найбільша вірогідність припадає саме на стани 00 та 11, але присутня також невелика ймовірність на стани 01 та 10, що суперечить логіці програми. Отриманий результат демонструє, що справжній квантовий комп'ютер в нинішній час ще не є досконалим, присутні проблеми пов'язані з квантовими помилками, декогерентністю. Доречно буде зауважити, що квантові комп'ютери IBM використовують електрони в якості кубітів.

## ВИСНОВКИ

Під час виконання дипломної роботи було досліджено основу квантових комп'ютерів – кубіт та умови, необхідні для його фізичної реалізації. Вивчено основні логічні квантові елементи, проблеми декогерентності та квантових помилок, основні квантові алгоритми та зроблено їх порівняння з класичними. Проаналізовано та досліджено особливості використання фотону в якості кубіта, його переваги та недоліки.

Використовуючи фотони можна уникнути проблеми декогерентності в порівнянні з багатьма іншими системами. Крім того, на відміну від інших претендентів на роль кубіта, фотони не потребують експлуатування при екстремально низьких, криогенних температурах. Однак ці переваги мають один великий недолік. Фотони не взаємодіють між собою. Це є бажана властивість при проектуванні одно-кубітових воріт, але це створює перегороду при проектуванні дво-кубітних воріт.

Однак переваги, які має фотон дають йому дуже велику перспективу бути використаним в якості кубіта в квантовому комп'ютері.

В ході дипломної роботи була розроблена програма, квантова схема, яка була запущена на симуляторі та на дійсному квантовому комп'ютері. Отримані результати підтверджують, що нинішній квантовий комп'ютер (запуск відбувався на комп'ютері IBM, який використовує електрони в якості кубітів) має певні погрішності, які пов'язані з квантовими помилками та декогерентністю. Проаналізувавши властивості фотона, можу зробити наступний висновок, квантовий комп'ютер, який буде розроблений на фотонній системі буде мати меншу погрішність та стане більш доступний у використанні.

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Карлаш, Г.Ю. Квантові інформаційні системи. Навчальний посібник для спеціальності «Прикладна фізика та наноматеріали» / Карлаш Г.Ю. – Київ: факультет радіофізики, електроніки та комп’ютерних систем Київського національного університету імені Тараса Шевченка, 2018. – 77 с.
2. The qubit in quantum computing. – Режим доступу до ресурсу: <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/quantum/concepts-the-qubit>
3. Quantum Computing for Everyone. – Режим доступу до ресурсу: <https://medium.com/swlh/quantum-computing-for-everyone>
4. Сигов, А.С. Квантовая информатика: обзор основных достижений / Сигов А.С. – Москва: Российский технологический университет, 2019. – 37 с.
5. Demystifying Quantum Gates – One Qubit At A Time. – Режим доступу до ресурсу: <https://towardsdatascience.com/demystifying-quantum-gates-one-qubit-at-a-time-54404ed80640>
6. Rishabh, S. Linear Optical Quantum Computing / Rishabh Sahu – 2017.
7. Grumbling, E. Quantum Computing: Progress and Prospects. / Grumbling E. - Washington, DC: National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, 2019. – 252 p.
8. Nielsen, M. Quantum Computation and Quantum Information / M. Nielsen - Cambridge, 2000.
9. Соловьев, В.М. Квантовые компьютеры и квантовые алгоритмы. Ч. 1. / В.М. Соловьев. - Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика, 2015, том 15, выпуск 4, 462–477.
10. Соловьев, В.М, Квантовые компьютеры и квантовые алгоритмы. Ч. 2. / В.М. Соловьев. - Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Математика. Механика. Информатика, 2016, том 16, выпуск 1, 104–112
11. Качаев, И. А. Квантовые вычисления / И.А. Качаев – Протвино, 2001. – 24с.

12. Migdall, A. Single-Photon Generation and Detection: Physics and Applications, Experimental Methods in the Physical Sciences / A. Migdall: Academic Press, 2013.
13. Silva, M. Thresholds for linear optics quantum computing with photon loss at the detectors / M. Silva – Canada, 2005.
14. Eisaman, M. Single-photon sources and detectors / M. Eisaman – American Institute of Physics, 2011.
15. Preskill, J. Quantum Information and Computation / J. Preskill – California, USA: California Institute of Technology, 1998 – 777 p.