УДК 004.383.3

А.І. Тасьмук

В.В. Мартинюк

КВАНТОВІ КОМП'ЮТЕРИ: ПРИНЦИП РОБОТИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У статті розглядаються концепції та закони квантових комп'ютерів і порівнюються з класичними обчислювальними системами. Вона досліджує кубіт, суперпозицію та квантову заплутаність. Обговорюються технічні обмеження сучасного проектування квантових процесорів та потенційне застосування квантових процесорів у науковій роботі та дослідженнях інформаційної безпеки.

Ключові слова: *квантові комп'ютери, квантові обчислення, кубіт, суперпозиція, квантова заплутаність, квантовий процесор, інформаційна безпека, класичні обчислювальні системи.*

Abstract

The article reviews the concepts and laws of quantum computers and compares them with classical computing systems. It explores qubit, superposition, and quantum entanglement. It discusses the technical limitations of current quantum processor design and the potential applications of quantum processors in scientific work and information security research.

Keywords: *quantum computers, quantum computing, qubit, superposition, quantum entanglement, quantum processor, information security, classical computing systems.*

Вступ

Процес цифровізації суспільства є причиною вибуху даних, що ускладнює алгоритми, які керують цими даними. У таких ситуаціях звичайне обчислювальне обладнання все частіше досягає фізичних меж своїх можливостей. Через проблеми з розсіюванням тепла, розміром транзисторів і швидкістю передачі сигналу шукаються нові обчислювальні парадигми. Зараз одним із найперспективніших напрямків є квантові обчислення, які базуються на фундаментальних законах квантової механіки. Суперпозиція та квантова заплутаність — це два фізичні явища, які дозволяють квантовим комп'ютерам існувати в декількох станах одночасно та формувати корельовані квантові структури. У майбутньому, однак, алгоритми можуть незабаром бути здатними виконувати багато завдань на швидкості, якої класичні комп'ютери просто не досягали, особливо для таких складних цілей, як розв'язання задач у криптографії та моделювання реальних фізичних процесів. У цьому контексті вивчення того, як будувати квантові процесори, дослідження технічних обмежень та визначення сфер практичного застосування є актуальним науковим завданням. Ця робота буде досліджувати фізичні принципи роботи квантових комп'ютерів, порівнювати їх з класичними обчислювальними системами та розглядати можливості застосування квантових процесорів у наукових дослідженнях та інформаційній безпеці.

Результати дослідження

Функціонування квантового комп'ютера базується на математичному описі стану кубіта у гільбертовому просторі. Узагальнений стан одного кубіта визначається як

$$\psi = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \tag{1}$$

де ψ — вектор стану;
α, β — комплексні амплітуди ймовірності;
$|0\rangle$, $|1\rangle$ — базисні стани;
$|\alpha|^2$ та $|\beta|^2$ — ймовірності отримання відповідного результату під час вимірювання;
умова нормування має вигляд

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1, \tag{2}$$

Аналіз рівняння (1) показує, що на відміну від класичного біта, кубіт може перебувати у стані суперпозиції. Якщо система складається з n кубітів, її стан описується вектором розмірності 2^n, що забезпечує експоненційне зростання кількості можливих конфігурацій. Саме ця властивість є основою потенційної обчислювальної переваги квантових систем.

Для двох кубітів заплутаний стан може бути представлений у вигляді

$$\Phi = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}, \tag{3}$$

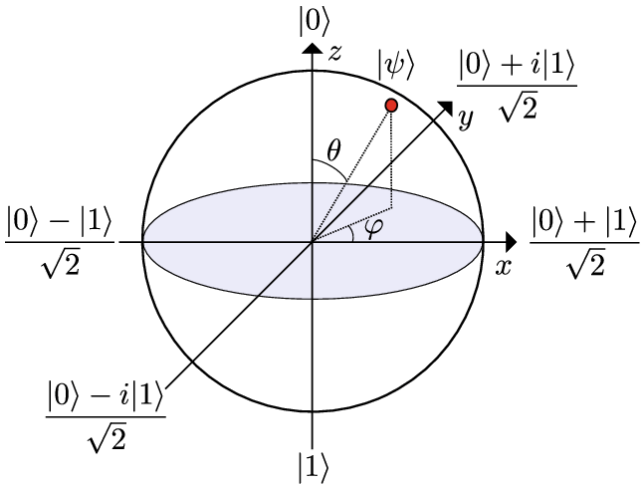


Рис. 1 – Схематичне представлення кубіта на сфері Блоха та приклад заплутаного стану двох кубітів

де Φ — вектор заплутаного стану.

Такий стан не може бути розкладений у добуток окремих станів кожного кубіта, що свідчить про наявність квантової кореляції між ними.

З фізичної точки зору, реалізація кубіта можлива на основі різних технологій: надпровідних контурів, іонних пасток або фотонних систем. Для надпровідних кубітів енергетичний розрив між рівнями можна описати співвідношенням

$$E = hf, \tag{4}$$

де E — енергія переходу (Дж),
h — стала Планка (6.626×10^{-34} Дж·с),
f — частота переходу (Гц).

Практичні дослідження показують, що стабільність квантових обчислень визначається часом когерентності τ (с), протягом якого система зберігає фазову інформацію. Встановлено, що при зниженні температури до порядку 10^{-3} K час когерентності суттєво зростає, що пояснює використання кріогенних установок у сучасних квантових процесорах.

Максимальна ефективність виконання квантових операцій досягається за умови мінімізації впливу декогеренції та помилок гейтових операцій. Ймовірність помилки Pg повинна задовольняти умову

$$Pg < 10^{-2}, \quad (5)$$

що є необхідною вимогою для реалізації квантової корекції помилок.

Висновки

Квантові комп'ютери спираються на принципи суперпозиції та заплутаності для обчислень, використовуючи абсолютно новий підхід до логіки. Незважаючи на технологічні перешкоди, дослідження в цій галузі показують значний потенціал для розвитку науки та інформаційних технологій. Потенційні випадки використання цих алгоритмів поширюються на криптографію, моделювання складних систем та оптимізаційні завдання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Нільсен М. А., Чуанг І. Л. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge University Press, 2010. – 676 p.
2. Лобачев А. В. Квантові комп’ютери: основи теорії та практики. – Київ: Наукова думка, 2018. – 312 с.
3. Shor P. W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring. In Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. – IEEE, 1994. – P. 124–134.
4. Воронцов С. В. Квантові обчислювальні системи та їх моделювання. – Харків: ХНУ ім. В. Н. Каразіна, 2020. – 198 с.
5. Preskill J. Quantum computing in the NISQ era and beyond. Quantum 2, 79 (2018).
6. Бойко О. М., Кузнєцова І. В. Методи корекції квантових помилок у надпровідних кубітах. Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія “Інформаційні технології”, 2021, № 21, С. 45–53.
7. Anton S. R., Sodano H. A. Quantum circuits and qubit interactions: a review. Journal of Quantum Engineering, 2019, Vol. 5, No. 2, P. 101–120.

Тасьмук Анастасія Ігорівна – студентка групи 4КН-25б, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, email: anastasiatasmuk@gmail.com

Науковий керівник**: Мартинюк Володимир Валерійович** — канд. техн. наук, доцент кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, Вінниця.

Tasmuk Anastasia Igorivna – student of group 4KN-25b, Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, email: anastasiatasmuk@gmail.com

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr Valeriiovych** — Candidate of Philology tech. Sciences, Associate Professor of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.