

УДК 004.3'144:530.145

КВАНТОВИЙ КОМП'ЮТЕРНИЙ ЧИП: ФІЗИЧНІ ПРИНЦИПИ РОБОТИ ТА СУЧАСНИЙ СТАН ІНЖЕНЕРНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ

Шемаєв-Лагода Д.О.

email: damir.shemaiev-lahoda@nure.ua

Науковий керівник – асистент кафедри фізики Приймачов Ю.Д.
Харківський національний університет радіоелектроніки, каф. Фізики
м. Харків, Україна

The paper considers the development and current state of quantum computer chips as a promising direction in the development of computing technology. The differences between classical bits and qubits are analyzed, and the physical essence of superposition and quantum entanglement is revealed. An overview of the main technological platforms for the implementation of quantum chips is provided: superconducting, spin, ion, and photonic systems. The physical principles of their operation are considered, in particular, the Josephson effect, spin control, and ion confinement in electromagnetic traps. The advantages and disadvantages of using quantum chips are analyzed. Special attention is paid to current achievements in the development and creation of quantum chips, as well as the prospects for the practical application of quantum computers in science, medicine, and cryptography.

У 1980-х роках Річард Фейнман висунув ідею квантових обчислень, припустивши, що квантові комп'ютери зможуть ефективніше моделювати фізичні системи, ніж класичні. У 1990-х Лов Гровер і Пітер Шор створили алгоритми для швидкого пошуку та факторизації чисел, довівши переваги квантових технологій. Згодом команда під керівництвом Ісаак Чуанг продемонструвала роботу квантового алгоритму в Лос-Аламоська національна лабораторія. У 2000 році в Національний інститут стандартів і технологій (NIST) створили один із перших квантових комп'ютерів на основі йонної пастки, що стало важливим кроком до практичного застосування квантових технологій.

Сучасні комп'ютерні чипи функціонують на основі бітів – елементів двійкової системи числення, що набувають значень 0 або 1. Будь-яка цифрова інформація, зокрема електронні повідомлення, аудіофайли чи відеодані, кодується у вигляді послідовностей таких бінарних значень.[1]

Квантові комп'ютери базуються на принципах квантової механіки та використовують кубіти - субатомні частинки, такі як електрони або фотони, та водночас мінімальні елементи зберігання інформації у квантових комп'ютерах, що дає змогу виконувати окремі обчислювальні задачі значно ефективніше порівняно з класичними системами. Кубіт має три детерміновані стани. Вони можуть бути одиницею, нулем або навіть обома одночасно. Така незвичайна властивість кубіту називається суперпозицією.

Такий стан системи описується за допомогою хвильової функції

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle, \quad (1)$$

яка кількісно вказує, що система (кубіт) з певною ймовірністю, визначеною коефіцієнтами α і β , перебуває в стані «0» та в стані «1» відповідно. Також кубіту притаманна заплутаність. Тут мається на увазі можливість двох складових пари кубітів існувати у зв'язному стані, де зміна стану одного миттєво змінить стан іншого передбачуваним чином. Саме ці функції роблять суперкомп'ютери незамінними в певних обчисленнях. Передбачається, що їх застосування сприятиме істотному прискоренню складних наукових і технологічних процесів. Водночас існує ймовірність використання квантових технологій для компрометації сучасних криптографічних алгоритмів, призначених для захисту конфіденційних даних.

Сьогодні існує кілька основних технологічних підходів до створення квантових комп'ютерних чипів. Основні з них:

1) Надпровідні. Це найбільш поширені на сьогодні варіанти кубітів. Вони базуються на надпровідних матеріалах і використовують мікроскопічні електричні схеми для формування та керування кубітами.

Надпровідні кубіти реалізуються на основі ефекту Джозефсона, який полягає в протіканні надпровідного струму через тунельний (джозефсонівський) контакт, що складається з двох надпровідників, просторово розділених тонким шаром діелектрика або ненадпровідникового металу. [2]

Розробкою таких систем займаються, зокрема, Google, IBM, IQM та Rigetti Computing.

2) Спіновий кубіт, тобто кубіт, який можна реалізувати на основі спіну електрона. Спін – це власний момент імпульсу елементарної частинки, і постійне магнітне поле задає дві його поляризації, тобто спрямовує спін по полю чи проти поля. Це і є логічні «0» та «1». Змінне магнітне поле перевертає спін.

3) Іонні пастки – це одна з найточніших платформ квантових чипів, де кубітами є окремі заряджені атоми (іони), що утримуються в електромагнітному полі у вакуумній камері. Існують два основних типи пасток. Це пастка Пауля, в якій використовується змінне електричне поле. Це найпоширеніший варіант для квантових процесорів. Та пастка Пенінга, в якій використовується комбінація статичного електричного та магнітного полів.

4) Фотонні квантові чипи – це спеціальні мікросхеми, у яких інформація передається не електронами, як у звичайному комп'ютері, а частинками світла – фотонами. Кожен фотон може перебувати одразу в кількох станах (наприклад, мати різну поляризацію або рухатися різними шляхами), і саме ці стани використовують як квантові біти – кубіти. Фотони

використовуються як носії квантової інформації завдяки їхній високій швидкості, низьким втратам і стійкості до шуму з навколишнього середовища. Це робить фотонні платформи дуже перспективними для квантових обчислень і квантових комунікацій. [3]

У наш час багато світових лідерів у сфері технологій трудяться над розробкою квантового комп'ютерного чипу. У 2019 році компанія Google розробила квантовий процесор під назвою "Sycamore", який складається з двовимірного масиву з 54 трансмонних кубітів, тобто кубітів із надпровідного матеріалу, який легший в управлінні ніж звичайний. Кожен кубіт з'єднаний із чотирма найближчими сусідами, утворюючи прямокутну решітку. Така структура була обрана з урахуванням можливості застосування корекції помилок за допомогою поверхневого коду.[4]

Через 5 років ця ж компанія представила новий процесор, який, як стверджує Google, за п'ять хвилин може розв'язати задачу, для виконання якої найшвидшим у світі суперкомп'ютерам наразі знадобилося б десять септильйонів або 10^{25} років. Цей чип, який отримав назву "Willow", є останньою розробкою в галузі, відомій як квантові обчислення. Компанія каже, що цей процесор, став ключовим "проривом" та "прокладає шлях до корисного, великомасштабного квантового комп'ютера". Однак експерти кажуть, що Willow на цей момент є переважно експериментальним пристроєм, а для розробки квантового комп'ютера, достатньо потужного для вирішення широкого кола проблем реального світу, знадобиться кілька років і мільярди доларів. [5]

Список використаних джерел:

1. Що таке квантовий комп'ютер та як він працює. Gigacenter. URL: <https://gigacenter.ua/ua/news/sh-o-take-kvantoviy-komp-yuter-ta-yak-voni-pracyuyut> (дата звернення 27.02.2026).
2. Шевченко С.М. Квантовий комп'ютер: стан проблеми у світі та в Україні // Вісник НАН України. 2022. № 2. С. 35-42. <https://doi.org/10.15407/visn2022.02.035>
3. Luo, W., Cao, L., Shi, Y. et al. Recent progress in quantum photonic chips for quantum communication and internet. // Light: Science & Applications. 2023. №12, 175. <https://doi.org/10.1038/s41377-023-01173-8>
4. Arute, F., Arya, K., Babbush, R. et al. Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. // Nature. 2019. 574, P.505–510.
5. Валланс К. "Приголомшливо потужний" квантовий процесор Willow перевертає уявлення про комп'ютери. BBC. URL: <https://www.bbc.com/ukrainian/articles/czjde4pxngpo> (дата звернення 27.02.2026).