

## Можливості реалізації квантових реєстрів на базі надпровідникових елементів для цифрової обчислювальної техніки

Вінницький національний технічний університет

### Анотація

*Розглянуто перспективи побудови квантового реєстра для обчислювальної техніки на базі низькотемпературних надпровідникових елементів.*

**Ключові слова:** реєстр, квантовий елемент, надпровідникова електроніка, мікроелектроніка.

### Abstract

*Prospect for construction of quantum register for computers based on low-temperature superconducting elements are considered. Mathematical modeling is done. An approach to determine the state of the register using the Hadamard transform is proposed.*

**Keywords:** register, quantum element, superconducting electronics, microelectronics.

Класична комп'ютерна техніка на базі напівпровідникових елементів, на даному етапі технічного розвитку, вже подекуди сягає максимально можливих характеристик: компактності, ступеня інтеграції НВІС та швидкодії. В той же час, такі проблеми, як пошук у неструктурованій базі даних, швидке моделювання ядерних реакцій, факторизація великих чисел та інші залишаються невирішеними [1]. Напрямок розвитку квантової обчислювальної техніки у сучасній електроніці має значні перспективи щодо вирішення такого роду задач.

Наприкінці минулого століття була розроблена теоретична база та сформовані критерії квантової системи, зокрема масштабованість. Така система повинна являти собою масив квантових об'єктів, з можливістю додавання нових елементів. Квантовий стан системи має зберігатись протягом деякого часу, достатнього для вимірювання, а саме вимірювання має бути можливим та надійним. Також система повинна підтримувати процедуру ініціалізації, а над окремими парами квантових бітів має бути можливим виконання логічних операцій [2].

Як і в класичній комп'ютерній техніці, в квантових комп'ютерах інформація також зазвичай подається за допомогою двійкових елементів. Такий елемент, що використовується для представлення квантової інформації називають кубітом. Визначальною властивістю кубіта є можливість суперпозиції (накладання) станів. Стан квантового біту не завжди можна описати як  $|0\rangle$  або  $|1\rangle$ , але можна описати деяким вектором стану  $|\Psi\rangle$  у двовимірному комплексному просторі:

$$|\Psi\rangle = c_0|0\rangle + c_1|1\rangle,$$

де  $c_0$  та  $c_1$  — довільні комплексні числа, на які без обмеження загальності накладаються умови нормування:

$$c_0^2 + c_1^2 = 1.$$

Наведені вище варіанти запису квантових станів включають спеціальні позначення, запропоновані Полем Діраком, та називаються бра-кет-нотацією.

Слід відмітити, що кубіт принципово відрізняється від класичного ймовірнісного біта, тобто біта інформації, який випадково набуває значення 0 або 1. З точки зору фізики, стан ймовірнісного біта являє собою некогерентну суміш двох станів у той час як стан квантового біта — когерентну суперпозицію станів [3].

Для фізичної реалізації кубітів, гіпотетично, може бути використана будь-яка дворівнева квантова система, або така багаторівнева система, з якої можна чітко виділити два стани.

За останні кілька десятиліть були запропоновані, та навіть частково реалізовані, різні варіанти елементної бази квантової обчислювальної техніки. Найперспективнішими є елементи, на базі

технології твердотільних квантових точок та низькотемпературних надпровідників. Прикладом використання останніх є джозефсонівські контакти. У цьому випадку, фізичною реалізацією квантового біта є планарний контакт сендвіч-конструкції.

Поява струму на джозефсонівському контакті пов'язане з явищем надпровідності та виникненням куперівських пар [5], отже, дворівнева квантова система на основі такого контакту є гарною основою для кубіта. Вимірявши параметри кубіта квантово-неруйнуючим методом можна визначити стан кубіта  $|\Psi\rangle$ .

Квантовий регістр являє собою систему, що порівнює між собою деяку кількість кубітів, кожен з яких має власний спостережуваний стан у окремий квант часу. Для порівняння стану кубітів застосовується квантовий логічний вентиль – пристрій, що виконує фіксовану унітарну операцію над обраними кубітами. Такі вентиля об'єднують у мережу, для побудови регістрів більшої розрядності. Найпростішим квантовим логічним вентилям є перетворення Адамара, яке виконується над ермітовою матрицею, що і представляє стан кубіта [6]. Перетворення Адамара записується наступним чином:

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$|x\rangle \rightarrow \boxed{H} \rightarrow (-1)^x |x\rangle + |1-x\rangle, \quad (2)$$

де матриця (1) записана у базисі  $\{|0\rangle, |1\rangle\}$ , а діаграма (2) схематично представляє вентиль H, що оперує кубітом зі станом  $|x\rangle$ , при  $x = 0, 1$ .

Об'єднавши декілька кубітів, і синхронізувавши вимірювання їх стану в часі, можна отримати квантовий регістр на  $n$  кубітів. Такий регістр буде відповідати критеріям Девіда Дівінченцо [2], і якщо вирішити проблему надійного вимірювання його стану за параметрами квантованого магнітного потоку — може бути реалізований на практиці.

Таким чином, побудова квантового регістру на базі надпровідникових елементів, а саме низькотемпературних джозефсонівських переходів сендвіч-конструкції, є цілком реальною. Розробка та створення таких елементів є доцільними, так як їх ефективність та швидкодія на порядок перевершують відповідні характеристики класичних напівпровідникових елементів. Однак, існують проблеми безпомилкового вимірювання стану квантового біта та проблема ініціалізації системи, які ще мають бути вирішені.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nikonov, Dmitri E.; Young, Ian A. "Overview of Beyond-CMOS Devices and A Uniform Methodology for Their Benchmarking", Ithaca, USA, 2013. — 91 с.
2. DiVincenzo, David P. (2000-04-13). "The Physical Implementation of Quantum Computation". *Fortschritte der Physik*. 48 (9–11): p. 771–783.
3. Harrow, Aram; Hassidim, Avinatan; Lloyd, Seth (2009). "Quantum algorithm for solving linear systems of equations". *Physical Review Letters*, p. 103
4. Гудков А. Джозефсоновские переходы: электрофизические свойства, области применения и перспективы развития // *ELECTRONICS: Science, Technology, Business*. – 2014. – №00137.
5. Cooper, Leon N. Bound electron pairs in a degenerate Fermi gas // *Physical Review : journal*. — 1956. — Vol. 104, no. 4. — pp. 1189—1190.
6. Artur Ekert, Patrick Hayden and Hitoshi Inamori "Basic concepts in quantum computation", Oxford, United Kingdom, 2008. — 91 с.

**Бугайчук Дмитро Олександрович** — студент групи ІКІ-20м, кафедри комп'ютерної інженерії ВНТУ, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: stealthninja.light@gmail.com

Науковий керівник: **Войцеховська Олена Валеріївна** — кандидат технічних наук, доцент кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: olena.voytsekhovska@gmail.com

**Buhaichuk Dmytro Oleksandrovych** — student of the Computer Techniques Chair, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: stealthninja.light@gmail.com

Research advisor: **Voitsekhovska Olena Valeriivna** - Cand. Sc. (Eng), Associate Professor of Computing Engineering Departmen, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: olena.voytsekhovska@gmail.com