

КВАНТОВА ЗАПЛУТАНІСТЬ ТА ЇЇ ЗАСТОСУВАННЯ В КВАНТОВИХ КОМП'ЮТЕРАХ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Розглядаються фізичні принципи квантової запутаності як нелокального квантовомеханічного явища. Проаналізовано математичний апарат опису запутаних станів та нерівності Белла. Описано ключові застосування квантової запутаності в квантових комп'ютерах: квантова телепортація, квантова корекція помилок та протоколи квантового зв'язку. Оцінено перспективи розвитку квантових обчислювальних систем на основі керованої запутаності кубітів.

Ключові слова: квантова запутаність, кубіт, нерівності Белла, квантова телепортація, квантові обчислення, квантова корекція помилок.

Abstract

The physical principles of quantum entanglement as a non-local quantum mechanical phenomenon are considered. The mathematical formalism for describing entangled states and Bell's inequalities is analyzed. Key applications of quantum entanglement in quantum computers are described: quantum teleportation, quantum error correction, and quantum communication protocols. The prospects for the development of quantum computing systems based on controlled qubit entanglement are evaluated.

Keywords: quantum entanglement, qubit, Bell's inequalities, quantum teleportation, quantum computing, quantum error correction.

Вступ

Квантова механіка відкрила принципово нові підходи до обробки інформації. Одним із найважливіших проявів є явище квантової запутаності – феномену, за якого стани двох або більше квантових частинок описуються єдиною нероздільною хвильовою функцією незалежно від відстані між ними [1]. Саме це явище Ейнштейн назвав «моторошною дією на відстані», вважаючи його аномалією теорії. Сьогодні ж воно є наріжним каменем квантових обчислень.

Зростаючий інтерес до квантових комп'ютерів зумовлений їх здатністю вирішувати задачі, недоступні для класичних обчислювальних систем: факторизацію великих чисел, оптимізаційні проблеми та моделювання квантових систем. Однією з ключових переваг квантових алгоритмів є використання суперпозиції та квантової запутаності для ефективнішої обробки інформації [2].

Метою роботи є аналіз фізичних принципів квантової запутаності та дослідження механізмів її застосування у квантових комп'ютерах. Основні етапи дослідження:

1. Вивчення квантовомеханічного формалізму опису запутаних станів.
2. Аналіз нерівностей Белла як критерію квантової запутаності.
3. Дослідження застосувань у квантових протоколах та алгоритмах.
4. Оцінка перспектив масштабування квантових систем.

Результати досліджень

Квантова запутаність виникає, коли стан складеної квантової системи не може бути представлений як добуток станів окремих підсистем. Канонічним прикладом є пара електронів у синглетному стані – стані Белла [3]:

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$$

Де компоненти формули мають таке значення:

- $|\Psi^-\rangle$: позначає сам стан системи, де індекс «мінус» вказує на його антисиметричність (стан змінює знак при перестановці частинок місцями).
- $|\uparrow\downarrow\rangle$ та $|\downarrow\uparrow\rangle$: базисні стани, де перша та друга частинки мають протилежні спіни («вгору» та «вниз» відповідно).

Вимірювання спіну одного електрона призводить до виявлення миттєвої кореляції зі станом іншого електрона незалежно від відстані між ними. На рисунку 1 схематично зображено процес такого вимірювання заплутаних частинок на просторовій відстані.

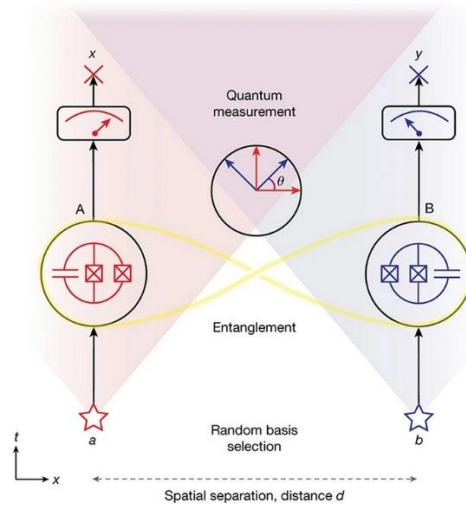


Рисунок 1 – Схема квантової заплутаності та вимірювання корельованих станів

Саме ця кореляція, що порушує класичні нерівності Белла, була підтверджена експериментально Аспе та ін. у 1982 році [3]. У квантових комп'ютерах заплутаність застосовується у кількох ключових напрямках.

Квантова телепортація

Протокол квантової телепортації дозволяє передати квантовий стан кубіта на довільну відстань без фізичного переміщення частинки. Алгоритм використовує заздалегідь підготовлену заплутану пару (пару Белла), класичний канал зв'язку та локальні унітарні перетворення [2]. Попри те, що передача інформації не перевищує швидкість світла, протокол є базою для квантових мереж та розподілених квантових обчислень.

Квантова корекція помилок

Декогеренція є основним обмеженням практичних квантових комп'ютерів: взаємодія кубітів із навколишнім середовищем руйнує квантову суперпозицію. Коди корекції квантових помилок (наприклад, код Шора чи код поверхні) кодують логічний кубіт у заплутаний стан кількох фізичних кубітів [4]. Це дозволяє виявляти та виправляти помилки без прямого вимірювання інформаційного стану, що принципово відрізняється від класичних методів.

Квантове прискорення та алгоритми

Заплутаність є ресурсом, що забезпечує квантове прискорення у відомих алгоритмах. Алгоритм Шора факторизації використовує квантове перетворення Фур'є над заплутаними регістрами для досягнення поліноміальної складності замість експоненціальної для класичних комп'ютерів [1]. Алгоритм Гровера забезпечує квадратичне прискорення пошуку в неупорядкованих базах даних завдяки інтерференції квантових амплітуд та використанню суперпозиції станів.

Перспективи застосування

Актуальні дослідження спрямовані на подолання головного виклику – масштабування кількості когерентних кубітів. Провідні компанії (IBM, Google, IonQ) вже демонструють системи з сотнями фізичних кубітів, проте досягнення квантової переваги в практично важливих задачах вимагає тисяч логічних кубітів із низьким рівнем помилок [4].

Одним із перспективних напрямів розвитку є фотонні квантові комп'ютери, де заплутаність реалізується між фотонами за кімнатної температури, що суттєво спрощує апаратну реалізацію порівняно з надпровідними кубітами, які потребують охолодження до температур, близьких до абсолютного нуля [2].

Висновки

Квантова запутаність є фундаментальним ресурсом квантових обчислень, що не має класичного аналога. Її практичне застосування охоплює квантову телепортацію, корекцію помилок та реалізацію квантових алгоритмів з експоненціальним прискоренням. Подальший прогрес у технологіях стабілізації запутаних станів відкриває шлях до побудови повномасштабних квантових комп'ютерів, здатних вирішувати задачі, принципово недоступні для класичних систем.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Nielsen M. A., Chuang I. L. Quantum Computation and Quantum Information. – Cambridge : Cambridge University Press, 2010. – 676 p.
2. Борисенко В. С., Данилюк О. Л. Наноелектроніка : навч. посіб. – Київ : Вища школа, 2021. – 245 с.
3. Aspect A., Grangier P., Roger G. Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment // Physical Review Letters. – 1982. – Vol. 49. – P. 91–94.
4. Fowler A. G., Martinis J. M. Quantifying the effects of local many-qubit errors and leakage for the surface code // Physical Review A. – 2014. – Vol. 89. – P. 032316.

Семенов Владислав Александрович – студент групи ІПІ-25Б, Факультет Інформаційних Технологій та Комп'ютерної Інженерії, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: vladsemenov2903@gmail.com

Науковий керівник – *Мартинюк Володимир Валерійович*, доцент кафедри загальної фізики

Semenov Vladyslav – student of group 1PI-25B, Faculty of Information Technologies and Computer Engineering, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia.

Scientific advisor – *Martyniuk Volodymyr Valeriyovych*, Associate Professor of the Department of General Physics, VNTU