

ТОПОЛОГІЧНІ КУБІТИ ТА ПРОРИВ MICROSOFT: ШЛЯХ ДО ВІДМОВОСТІЙКИХ КВАНТОВИХ ОБЧИСЛЕНЬ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

У доповіді розглянуто квантові обчислення та труднощі, які стоять на шляху до створення справжнього квантового комп'ютера. Основну увагу зосереджено на топологічних кубітах — особливих квантових елементах, які мають природний захист від помилок. У 2025 році компанія Microsoft представила перший у світі чип з топологічними кубітами під назвою “Majorana 1”. Цей прорив може суттєво пришвидшити розвиток квантових технологій. Також пояснено, як працюють ці кубіти, чим вони відрізняються від традиційних та чому винахід Microsoft має таке велике значення.

Ключові слова: кубіт, квантові обчислення, топологічні кубіти, Майоранові ферміони, стабільність.

Abstract

The report examines quantum computing and the challenges to building a true quantum computer. It focuses on topological qubits, special quantum elements that are inherently error-proof. In 2025, Microsoft unveiled the world's first chip with topological qubits, called “Majorana 1.” This breakthrough could significantly accelerate the development of quantum technologies. It also explains how these qubits work, how they differ from traditional ones, and why Microsoft's invention is so important.

Keywords: qubit, quantum computing, topological qubits, Majorana fermions, stability.

Вступ

Квантові обчислення — це напрямок, який використовує закони квантової фізики для обробки інформації. Квантові обчислення спираються на такі явища, як суперпозиція, запутаність та квантова інтерференція. На відміну від звичайних комп'ютерів, які працюють з бітами (0 або 1), квантові використовують кубіти — одиниці, які можуть бути і 0, і 1 одночасно. Це відкриває можливості для надзвичайно потужних обчислень. Але поки що створити стабільний квантовий комп'ютер складно, бо кубіти дуже чутливі до зовнішнього впливу. Один із нових підходів — використання так званих топологічних кубітів, які мають природний захист від таких впливів. Однак, щоб квантові комп'ютери стали по-справжньому корисними та масштабованими, кубіти мають бути неймовірно стабільними і зберігати свій квантовий стан достатньо довго для складних обчислень. Найбільша проблема тут — це квантова декогеренція, тобто втрата квантової інформації через взаємодію з навколишнім середовищем. Квантові стани дуже чутливі, тому найменші зовнішні впливи — чи то температура, електромагнітне випромінювання, механічні вібрації — можуть призвести до помилок. Це робить масштабування квантових комп'ютерів надскладним, адже підтримувати когерентність кубітів протягом тривалого часу — це технічний виклик.

Результати дослідження

Топологічні кубіти кодують квантову інформацію, використовуючи хитромудре плетіння топологічно захищених квазічастинок, відомих як аніони. Їхня стійкість до локальних збурень пояснюється тим, що інформація закодована не локально, а розподілена по всій квантовій системі, що робить її менш вразливою до шуму. Цей процес плетіння робить топологічні кубіти більш стійкими до помилок, викликаних шумом навколишнього середовища, і, теоретично, менш схильними до декогеренції. Вбудований захист від помилок — це ключова перевага, яка стимулює довгострокові інвестиції в топологічні кубіти, адже він дозволяє кубітам зберігати квантову інформацію значно довше. Microsoft займається квантовою інформатикою з 2000 року, зробивши ставку на топологічні квантові обчислення, тоді як більшість дослідників зосереджувалися на надпровідних кубітах. Компанія щорічно інвестує близько 300 мільйонів доларів у квантові дослідження, що підкреслює її стратегічну відданість цій технології.

Майоранівські нульові моди (МНМ) — це екзотичні квазічастинки, які є основними будівельними блоками для топологічних кубітів Microsoft. Вони зберігають квантову інформацію через “парність” електронів. У топопровідниках — новому класі матеріалів, що є, по суті, “новим станом матерії” —

неспарений електрон розподіляється між парою МНМ, роблячи його “невидимим для навколишнього середовища” і, таким чином, стійким до збурень. Ці топологічні створюються на основі гетероструктур арсеніду індію та алюмінію, які розробляються та виготовляються буквально атом за атомом. Microsoft розробила Протокол топологічного розриву (TGP) для виявлення присутності МНМ та енергетичної щілини в пристроях.

У 2025 році Microsoft представила чип під назвою Majorana 1, який містив 8 топологічних кубітів. Вони були реалізовані у вигляді так званих тетронів — структур, де 4 майоранові моди створюють один кубіт. Основою для цього стали нові матеріали — топокондуктори, які мають властивості і

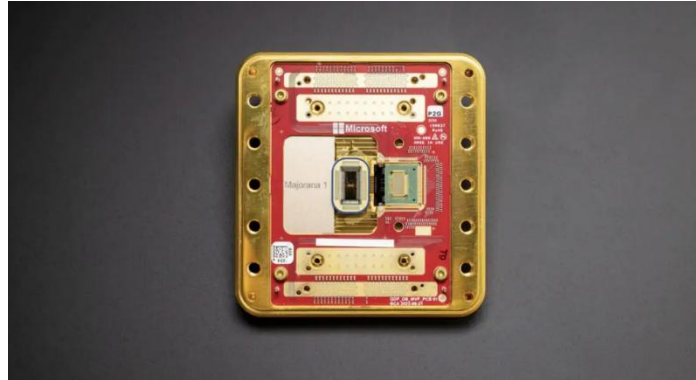


Рис. 1 Чип “Majorana 1”

надпровідників, і топологічних ізоляторів. Це дозволяє зменшити потребу в складній корекції помилок і відкриває шлях до створення чипів з мільйонами кубітів. Дискусії щодо переконливості доказів існування МНМ залишаються активними. Критики, такі як Генрі Легг, стверджують, що протокол топологічного розриву (TGP), який використовує Microsoft, є недосконалим і схильним до “хибних спрацьовувань” або “двійників”, які можуть імітувати сигнали МНМ. Існують також занепокоєння щодо стабільності надпровідної щілини чіпа та невирішених проблем масштабованості. Труднощі полягають у розрізненні справжніх майоранівських станів від “звичайних квантових точок”, які можуть давати схожі експериментальні сигнали. У лютому 2025 року в журналі Nature була опублікована стаття Microsoft “Interferometric single-shot parity measurement in InAs-Al hybrid devices”, що описує техніку вимірювання парності ферміонів. Однак редакційна примітка Nature чітко зазначає, що результати не є прямим доказом існування МНМ. У відповідь Microsoft заявила, що стаття в Nature була подана близько року тому і не відображає їхній останній прогрес, а більше даних буде опубліковано “в найближчі тижні та місяці”.

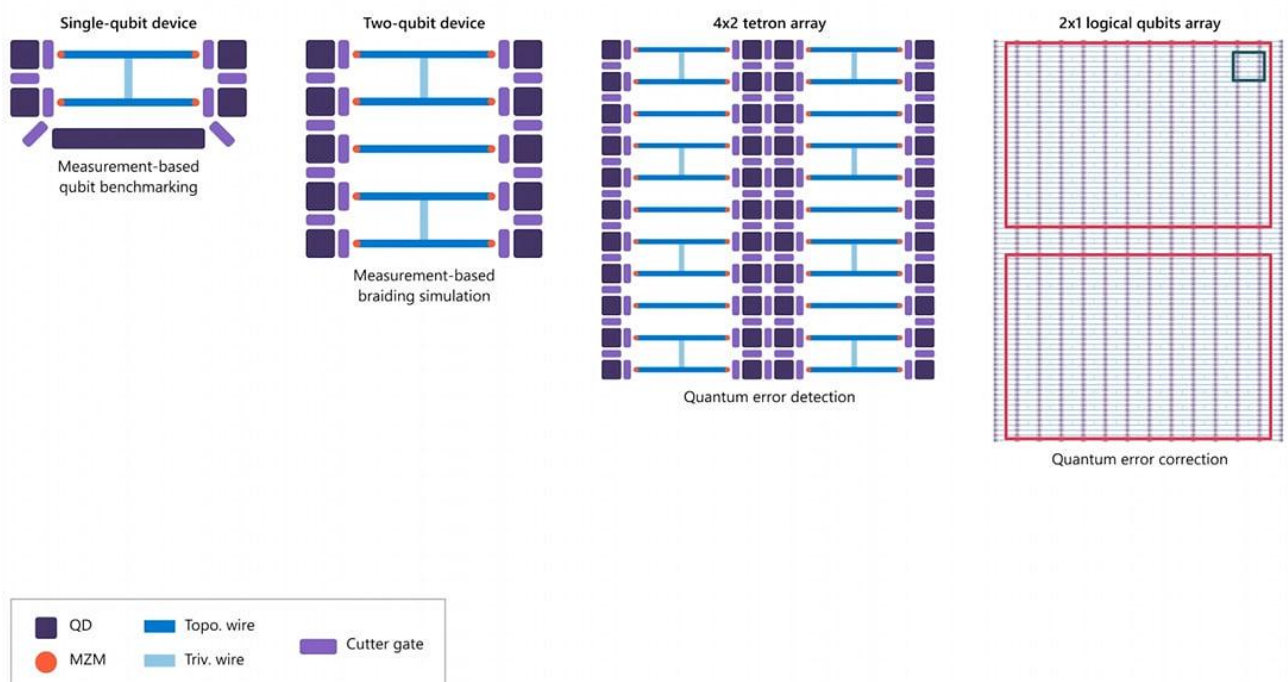


Рис. 2 Масштабування топологічних квантових пристроїв для корекції помилок

Компанія планує створити відмовостійкий прототип (FTR) протягом років, а не десятиліть. Наступний крок передбачає масштабовану архітектуру, побудовану навколо одноквантового пристрою під назвою тетрон, з метою створення масиву 4x2. Кінцева мета — досягти одного мільйона кубітів на

одному чіпі протягом наступних кількох років. “Роки, а не десятиліття” є ключовим відмінним фактором від інших лідерів, які припускають, що корисні квантові комп'ютери з'являться лише через десятиліття (наприклад, генеральний директор Nvidia Дженсен Хуанг, який припускає два десятиліття). У разі успішної реалізації топологічні квантові обчислення мають потенціал для вирішення широкого спектру складних проблем у різних галузях. Це включає вирішення складних хімічних питань, таких як причини корозії або тріщин, що може призвести до розробки самовідновлювальних матеріалів для мостів, деталей літаків, екранів телефонів або подряпаних дверей автомобілів. Квантові комп'ютери також можуть допомогти у розкладанні мікропластику та усуненні вуглецевих забруднювачів. У галузі охорони здоров'я та біоінформатики вони можуть покращити відкриття ліків та моделювання ферментів для точної медицини, а також підвищити точність кліматичних симуляцій. Крім того, квантові обчислення обіцяють покращення алгоритмів шифрування, стійких до квантових атак.

Висновки

Значні інвестиції Microsoft та нещодавні оголошення, такі як чіп Majorana 1, розробка топопровідників та впровадження цифрового керування представляють сміливу спробу подолати найбільші перешкоди квантових обчислень — декогеренцію та складність виправлення помилок. Топологічні кубіти, з їхньою внутрішньою стійкістю до шуму, пропонують привабливий шлях до відмовостійких та масштабованих квантових комп'ютерів. Microsoft зробила значний прогрес у реалізації теоретичних концепцій, таких як майоранівські нульові моди та топопровідники, та розробила унікальну архітектуру та методи керування, які потенційно спрощують масштабування та зменшують накладні витрати на виправлення помилок. Проте, існує сильна наукова дискусія та потреба в подальшій незалежній валідації існування МНМ та реальної масштабованості. Історія відкликаних публікацій та поточний скептицизм підкреслюють важливість наукової суворості та прозорості у цій висококонкурентній галузі. Наукова спільнота очікує на подальші, більш переконливі експериментальні докази та відтворювані результати, які підтвердять заявлені прориви.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Microsoft заявляє про прорив у створенні квантового комп'ютера. – Режим доступу: <https://speka.media/microsoft-zayavlyaje-pro-proriv-u-stvorenni-kvantovogo-kompyutera-9dn7n1> – Назва з екрана.
2. До квантових обчислень — роки, а не десятиліття: Microsoft представила чіп Majorana-1. – Режим доступу: <https://forklog.com.ua/news/do-kvantovyh-obchyslen-roky-a-ne-desyatylittya-microsoft-predstavyla-chyp-majorana-1> – Назва з екрана.
3. Квантова революція: Microsoft розробила перші топологічні кубіти. – Режим доступу: <https://nnews.com.ua/kvantova-revolutsiya-microsoft-rozrobyla-pershi-topologichni-kubity.html> – Назва з екрана.
4. Microsoft показала перший квантовий процесор на топологічних кубітах. – Режим доступу: <https://nauka.ua/news/microsoft-pokazala-pershij-kvantovij-procesor-na-topologichnih-kubitah> – Назва з екрана.
5. Microsoft заявляє: створила новий стан матерії. – Режим доступу: <https://futuro.in.ua/news/5444-microsoft-zayavlyaye-stvoryla-novyy-stand-materiyi.html> – Назва з екрана.
6. Вікіпедія: Majorana. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/Majorana> 1 – Назва з екрана.
7. Форум DOU: Квантовий прорив Microsoft. – Режим доступу: <https://dou.ua/forums/topic/52597/> – Назва з екрана.
8. Що таке квантові обчислення – простими словами // Mind the Graph. – Режим доступу: <https://mindthegraph.com/blog/uk/%D1%89%D0%BE-%D1%82%D0%B0%D0%BA%D0%B5-%D0%BA%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%96-%D0%BE%D0%B1%D1%87%D0%B8%D1%81%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%BD%D1%8F> – Назва з екрана.

9. Квантові обчислення: відкриття майбутнього // SpaceLab. – Режим доступу: <https://spacelab.ua/articles/kvantovi-obchislennya-vidkrittya-majbutnogo/> – Назва з екрана.
10. Вікіпедія: Кубіт. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%83%D0%B1%D1%96%D1%82> – Назва з екрана.
11. Вікіпедія: Квантова декогеренція. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0_%D0%B4%D0%B5%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D1%96%D1%8F – Назва з екрана.
12. Вікіпедія: Ферміон Майорани. – Режим доступу: <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B5%D1%80%D0%BC%D1%96%D0%BE%D0%BD%D0%9C%D0%B0%D0%B9%D0%BE%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8> – Назва з екрана.
13. Ermakov, M., Korobenko, A. Topological Quantum Computation Based on Majorana Fermions // Low Temperature Physics. – 2021. – Vol. 47, No. 5. – P. 435–439. – DOI: http://jnas.nbuv.gov.ua/j-pdf/PhNT_2021_47_5_9.pdf.
14. Microsoft unveils Majorana-1: the world's first quantum processor powered by topological qubits // Azure Quantum Blog. – 2025. – 19 лютого. – Режим доступу: <https://azure.microsoft.com/en-us/blog/quantum/2025/02/19/microsoft-unveils-majorana-1-the-worlds-first-quantum-processor-powered-by-topological-qubits/> – Назва з екрана.
15. Marcus, C. M. et al. Microsoft Quantum: A topological qubit milestone // Nature. – 2024. – Vol. 627. – P. 876–881. – DOI: <https://www.nature.com/articles/s41586-024-08445-2>.

Томков Павло Тарасович — студент групи 4КН-246, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, e-mail: 01-24-379.stud@vntu.edu.ua

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

Tomkov Pavlo T. — Faculty of Intellectual Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: dimawater43@gmail.com

Supervisor: **Martyniuk Volodymyr V.** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of General Physics, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia