

УДК 37.012.3 : 519.67 : 004

DOI: 10.36550/2415-7988-2021-1-198-181-184

ТКАЧУК Андрій Іванович –

кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теорії і методики технологічної підготовки, охорони праці та безпеки життєдіяльності Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка  
 ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7316-0107>  
 e-mail: atkachuk08@meta.ua

## ОСОБЛИВОСТІ РОЗГЛЯДУ ПИТАННЯ “КВАНТОВІ КОМП'ЮТЕРИ” ПІД ЧАС ВИВЧЕННЯ ОСНОВ ЕЛЕМЕНТНОЇ БАЗИ СУЧАСНОЇ КОМП'ЮТЕРНОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ ТА ЕОМ

**Постановка та обґрунтування актуальності проблеми.** При вивченні студентами основ елементної бази сучасної комп'ютерної електроніки та ЕОМ важливим напрямом є розгляд питань, що пов'язані з перспективами розвитку не тільки існуючої елементної бази, а й створення принципово нових нашвидкодійних обчислювальних систем відносно невеликих розмірів та з помірним споживанням електроенергії при обробці величезних масивів даних та підбору самих оптимальних комбінацій послідовностей дій з майже нескінченного числа можливих варіантів сценаріїв. Фактично, людство, й Україна в тому числі, стоять на порозі «четвертої промислової революції (Індустрії 4.0)» та повноцінного переходу до шостого технологічного укладу, які передбачають не тільки широкомасштабне впровадження у виробництво супернанотехнологій, а й принципово новий підхід до виробництва, що заснований на масовому впровадженні інформаційних технологій в промисловість та повної автоматизації процесів і поширенні штучного інтелекту, домінуванням «Цифрової країни» та «Цифрової економіки» з прямим чи опосередкованим «інформаційним контролем» та «соціальним рейтингом» всіх членів суспільства, поширенням саморегульованого «Інтернету речей» на основі систем зв'язку стандарту 5G та 6G для “загальної машинізації” [6].

В той же час, самі останні досягнення технологій серійного виробництва напівпровідникових електронних компонентів твердотільної інтегральної наноелектроніки вже дозволили виготовляти в 2021 році по нормам 7-нм техпроцесу найбільш та найбільш продуктивніші в світі суперпроцесори Cerebras Wafer Scale Engine 2 (WSE-2) на одному кристалі площею 46225 мм<sup>2</sup> (“квадрату” 215×215 мм з цілої 300-мм пластина), що вміщує 2,6 трильона транзисторів у 850 тис. програмованих ядрах, які працюють на частоті 2,5-3 ГГц та оптимізовані для обчислень у векторному просторі. Суперчип має 40 Гбайт вбудованої пам'яті SRAM з пропускну здатністю до 20 Петабайт/с (у неї завантажується одразу вся необхідна для проведення обчислень з використанням всіх робочих ядер інформація, при цьому навантаження розподіляється рівномірно таким чином, щоб обробка даних була завершена усіма ядрами одночасно), при загальній пропускну здатності до 220 Пбіт/с, але споживає понад 15 кВт електроенергії. В продовж

2022-2030 рр. провідними компаніями світу планується вже перехід на серійне виробництво мікропроцесорів за 5-нм, 3-нм, 2-нм і 1-нм техпроцесами з щільністю транзисторів до 400 млн./мм<sup>2</sup>.

А найбільшу, станом на травень 2021 року, обчислювальну потужність (робоча обчислювальна швидкодія становить 442 петафлопс (10<sup>15</sup> операцій з рухомою комою за секунду), пікова – 2 ексафлопс (10<sup>18</sup> операцій з рухомою комою за секунду)) має японський суперкомп'ютер «Fugaku», що використовує 158976 об'єднаних разом 48-ядерних 64-розрядних мікропроцесорів Fujitsu A64FX (7-нм техпроцес EUVL з майже 9 млрд. транзисторів, плюс допоміжні ядра для керування) на архітектурі ARM (сумарна кількість ядер 7630848) з масштабованими векторними розширеннями. При вартості в понад 1,3 млрд. дол. та споживанні електричної потужності в майже 30 МВт, його основний машинний зал площею 3000 м<sup>2</sup> містить 432 шафи з 384 розрахунковими вузлами кожен, тепло від яких відводиться холодною проточною водою.

Подальше збільшення обчислювальних потужностей суперкомп'ютеру за існуючими технологіями потребуватиме ще більших енергетичних затрат, об'ємів та масштабів устаткування, але все рівно не дозволить досягнути рівня так званої “квантової переваги” 50-ти і більше кубітних універсальних квантових комп'ютерів, які за допомогою різних квантових алгоритмів зможуть проводити обчислення на сотні млн. років швидше.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В науковій літературі приділено багато уваги проблемам вивчення квантових обрахунків та квантових алгоритмів, що реалізують заплутаність, генерацію випадкових чисел, лінійний пошук, факторизацію цілих чисел та ін. [1; 2; 3; 4; 5]. Проте, саме аспект вивчення студентами особливостей будови та принципів роботи універсальних квантових обчислювальних пристроїв залишається недостатньо висвітленим.

**Метою статті** є обговорення та висвітлення нових підходів при вивченні особливостей будови та принципів функціонування квантових комп'ютерів, як однієї з складових тем з основ елементної бази сучасної комп'ютерної електроніки та ЕОМ.

**Методи дослідження:** вивчення, порівняльний аналіз, узагальнення, систематизація науково-методичної та науково-практичної літератури з теми

дослідження; системний і проблемно-пошуковий методи для обґрунтування шляхів удосконалення процесу вивчення особливостей будови та принципів функціонування квантових комп'ютерів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

При опрацюванні даного матеріалу, студентам слід наголосити, що можливості пристроїв, які мають в своїй основі класичні принципи обчислювальних машин, в останні роки досягли рівня, при якому більшість завдань може бути вирішено відносно швидко і досить точно. Стандартні операції індивідуального користувача навіть портативними пристроями виконуються блискавично. Однак в різних областях знань залишаються проблеми, вирішити які, в тому числі з використанням кращих суперкомп'ютерів світу, не є можливим досі. При цьому процес вдосконалення існуючих комп'ютерів кінцевий та описаний законом Мура: кількість транзисторів, що розміщуються на кристалі інтегральної схеми, подвоюється кожні 24 місяці [7]. Але сучасні транзистори вже досягли розміру в кілька нанометрів, і в майбутньому електронні напівпровідникові компоненти неможливо буде зменшувати нескінченно, тому що їх елементи будуть складатися з одного атома. Розвиток класичних комп'ютерів у вигляді хмарних обчислювальних потужностей також обмежений по площі та споживаній енергії. Крім того, не кожен алгоритм піддається розпаралелюванню. Ефективна обробка великих обсягів даних вимагає високопродуктивних обчислень в області штучного інтелекту, наукомістких виробничих напрямків, моделювання хімічних і фізичних явищ і процесів, тобто там, де перестав вистачати можливостей сучасних суперкомп'ютерів. Вирішення цієї проблеми можливе в застосуванні новітніх технологій квантових комп'ютерів.

Власне, квантовий комп'ютер – це обчислювальний пристрій, що використовує явища квантової суперпозиції (паралелізму) та квантової запутаності для передачі й обробки даних, тобто в основу роботи його центрального процесора закладена логіка квантової механіки з використанням особливих квантових алгоритмів. Такий комп'ютер принципово відрізняється від традиційного комп'ютера, що має архітектуру фон Неймана та сприймає будь-яку інформацію у вигляді бінарного коду – біту, що може бути в одному з двох можливих станів: 0 або 1. Будь-який класичний процесор представляє ці два стани рівнями низької або високої напруги всередині напівпровідникового транзистора. Його завдання вибрати нуль або одиницю. Квантові процесори виготовлені за таким же принципом, але радикально відрізняються в тому, що замість транзистора в них використовуються кубіти (Qubit) – квантові біти. Це квантові системи з двома станами, проте на відміну від звичайного біта вони можуть зберігати набагато більше інформації ніж просто один або нуль, бо можуть існувати в будь-якій суперпозиції цих станів – одночасно представляти обидва стани. Двом значенням кубіта можуть відповідати,

наприклад, основний та збуджений стан атома, напрямки вгору і вниз спина електрона, атомного ядра (наприклад, спин квантової частинки розташований у напрямку зовнішнього поля – 0 або проти – 1), напрямок струму в надпровідному кільці. Кубіти можуть бути засновані на реальних об'єктах мікросвіту (нейтральних атомах в оптичних пастках, іонах в електромагнітних пастках, електронних спінах в квантових точках, фотонах), так і на штучних атомах – надпровідникові кубіти.

У кубіта можливе існування не тільки двох станів, а й їх суперпозиції, що обумовлено квантовою природою явищ мікросвіту.

На сучасному етапі створення квантових комп'ютерів іде у двох напрямках: 1) спеціалізовані квантові комп'ютери, які спрямовані на вирішення одного конкретного специфічного завдання, наприклад, завдання оптимізації (квантові комп'ютери D-Wave); 2) універсальні квантові комп'ютери, які здатні реалізувати довільні квантові алгоритми (Шора, Саймона, Гровера і т.д.) – в реалізації від IBM, Google та ін. Також йдуть роботи над квантовими сенсорами та квантовими мережами, як основами для квантової криптографії. В поточному різноманітті фізичних реалізацій кубіта найбільш відомі і поширені: надпровідникові кубіти, зарядові кубіти, йонні пастки, квантові точки і безліч інших екзотичних ідей (аніонів, майоранівських ферміонів, бозонного семплінгу фотонів та ін.) З усього цього різноманіття найбільш опрацьованим є перший метод отримання кубітів, заснований на надпровідниках. Google, IBM, Intel та інші провідні гравці використовують саме його для побудови своїх систем.

Так, ще у 2007 році компанія D-Wave Orion збирала свій перший 16-кубітовий квантовий комп'ютер, в якому квантовий процесор являв собою сукупність ніобієвих надпровідних спіральних доріжок, розділених ізолятором, на кремнієвій підкладці, що охолоджувалася до робочої температури 10 мК. Створені на чипі переходи Джозефсона, що склалися з двох сегментів надпровідного ніобію, пов'язаних слабким ізолюючим бар'єром, для Куперівських пар електронів в їх області ставали еквівалентом електроноподібних квазічастинок, що могли тунелювати через ізолятор в переході, ефективно проводячи через нього струм. В ніобієвих спіралях струм міг протікати за годинниковою стрілкою, проти неї або змішано (в обох напрямках), що відповідало “0” і “1” або суперпозиції двох значень в кубіті. Таким чином, перший квантовий чіп став повністю металевим магнітним пристроєм, в якому вся інформація зберігалася у вигляді напрямків течії струму по металевих петлях і переходах. А в 2019 році квантовий комп'ютер Google з 53-кубітовим надпровідним квантовим процесором “Sycamore”, робоча температура якого -273,11 °С, досяг квантової переваги – зміг за 200 с виконати розрахунок, на який найпотужнішому тоді в світі суперкомп'ютеру Summit IBM (робоча обчислювальна швидкість становить 122 петафлопс,

складається з 4608 обчислювальних серверів IBM Power Systems AC922, на кожному з яких встановлено два 22-ядерні процесори IBM Power9, що споживають 15 МВт електроенергії, а вбудована пам'ять сягає 10 петабайт) знадобилося б приблизно 10 тис. років. Фактично, це квантова інтегральна система, що включає в себе крім кріостату з кубітами ще й класичну електроніку, яка відповідає за віддалений доступ фахівців до системи для програмних досліджень і аналізу отриманих даних. При цьому всі елементи системи надійно захищені від взаємних і зовнішніх перешкод.

Для виконання таких квантових обчислень на квантовому комп'ютері потрібна реалізація наступних макрооперацій: задання вихідних даних → створення квантової суперпозиції → виконання обчислень у суперпозиції та перетворень кубітів → зменшення шуму вимірювання і зчитування даних → аналіз вихідних даних. У всіх квантових алгоритмах присутні наступні етапи: 1) підготовка суперпозиції вхідних даних для обчислення функції; 2) застосування самої функції (алгоритму або квантового оракула); 3) перетворення отриманих станів таким чином, щоб ймовірність потрібного для нас результату була близька до одиниці (калібрування обладнання, зменшення шуму, багатократні запуски процесу розв'язування задачі). В той же час, ефективність роботи квантових комп'ютерів з різною структурою та фізичними принципами роботи залежить не тільки від кількості в них кубітів, а й кількості зв'язків між ними, оскільки кубіти не підключають до спільної шини передачі даних, як в ЕОМ. В той же час, якщо напівпровідниковий процесор може працювати практично в будь-яких умовах, то квантовому заважає майже все, що нас оточує в реальному житті: найменший шум, мінімальна зміна температури, магнітного поля, мізерний сторонній електричний сигнал або вібрація – це все призводить до колапсу кубіта і повної втрати даних. Навіть охолодження до екстремально низьких температур в десятки мК, не усувають ситуації, коли “шуми” перевищують корисний сигнал. Однією з головних труднощів при побудові квантових комп'ютерів є збереження квантових станів якомога довше, що найчастіше досягається низькими температурами та контролюванням часу виконання обчислень. Найменше порушення фізичного стану системи може зруйнувати квантові стани, і тоді квантові обчислення матимуть помилки, які потрібно буде виправляти.

В умовах дистанційного навчання під час відео-конференцій з використанням сервісу Zoom при поясненні на лекційному занятті студентам принципів функціонування квантових комп'ютерів найбільш ефективними показали себе розроблені мультимедійні презентації, в яких розглянуто фундаментальні принципи квантової теорії інформації та ключові моменти теорії квантових обчислень, що лежать в основі створюваних квантових обчислювальних машин.

По-перше, квантовий комп'ютер (на відміну від звичайного) в якості носіїв інформації використовує

квантові об'єкти, а для проведення обчислень квантові об'єкти повинні бути з'єднані в квантову систему. Квантовий об'єкт – об'єкт мікросвіту (квантового світу), який проявляє квантові властивості: має певний стан з двома граничними рівнями; знаходиться в суперпозиції свого стану до моменту вимірювання; заплутується з іншими об'єктами для створення квантових систем; виконує теорему про заборону клонування (не можна скопіювати стан об'єкта). Квантова система – система заплутаних квантових об'єктів, що володіє наступними властивостями: квантова система знаходиться в суперпозиції всіх можливих станів об'єктів, з яких вона складається; не можна дізнатися стан системи до моменту вимірювання; у момент вимірювання система реалізує один з можливих варіантів своїх граничних станів.

Перша властивість квантової системи полягає в тому, що якщо вона не спостерігається, то вона знаходиться в суперпозиції всіх можливих станів, тобто, у випадку квантової системи з  $N$  кубітів, вона знаходиться в стані, що є суперпозицією усіх базових станів, тому зміна системи стосується всіх  $2^N$  базових станів одночасно – квантовий реєстр (“ланцюжок”) з 20 заплутаних кубітів здатен зберігати в собі  $2^{20}$  значень квантових станів одночасно, а з 50 заплутаних кубітів – уже  $2^{50}$  значень. Завдяки суперпозиції кубіт може приймати значення, отримані шляхом їх комбінування, і перебувати у всіх цих станах одночасно – квантова система одночасно рухається по всім можливим шляхам. У цьому полягає паралельність квантових обчислень, тобто відсутність необхідності послідовно перебирати всі можливі варіанти станів системи. Крім того, для опису точного стану системи квантовому комп'ютеру не потрібна величезна обчислювальна потужності і обсяги оперативної пам'яті, так як для розрахунку системи з 100 частинок досить лише 100 кубітів, а не трильйон трильйонів біт. Фактично, робота звичайного і квантового комп'ютерів може бути проілюстрована пошуком виходу з лабіринту: звичайний комп'ютер послідовно перебирає всі можливі варіанти, впираючись в глухі та повертаючись, а квантовий комп'ютер може перевірити всі можливі ходи за один раз.

Друга властивість квантової системи – властивість квантової заплутаності (зв'язку один з одним незалежно від відстані), що описує сильні кореляції квантових частинок, навіть в разі якщо ці частинки досить сильно просторово віддалені. Робочий реєстр квантового комп'ютера являє собою набір деяким чином пов'язаних (заплутаних) кубітів, і цей взаємозв'язок забезпечує можливість виконання операцій одночасно над усіма станами кубітів, внаслідок чого при кожній зміні стану одного з декількох кубітів інші змінюються узгоджено з ним. Фактично, у стані квантової заплутаності і суперпозиції в квантовому реєстрі відбувається вибудовування амплітуд кубітів таким чином, що позитивні значення амплітуди одних кубітів

нейтралізують негативні амплітуди інших кубітів, і відбувається скасування невірних обчислень (позитивні амплітуди кубітів, навпаки, підсилюють один одного). Так формуються сценарії отримання вірної відповіді.

Ще одна властивість описує декогеренцію – вразливість, крихкість квантових станів, що обумовлена взаємодією квантово-механічної системи з навколишнім середовищем. Щоб подолати цю істотну технічну перешкоду на шляху створення квантових комп'ютерів, розробляються спеціальні методи ізоляції квантової системи від навколишнього середовища (використання вкрай низьких температур, вакууму тощо), які дозволяють утримувати кубіти в стані суперпозиції. Однак, чим більше система, тим вище її схильність до зовнішніх впливів.

Заключна властивість, яка демонструє принципову відмінність класичної теорії інформації від квантової – це теорема про заборону клонування. Якщо в квантовому світі є довільний квантовий стан, задалегідь невідомий, то його не можна скопіювати. Якщо спробувати виміряти поточний стан і послати таку ж інформацію, то це можна буде зробити тільки з помилкою, що відразу буде помітно (криптографія).

Інтеграція описаних вище принципів в роботі комп'ютера відкриває можливість для вирішення завдань, які до теперішнього часу не могли бути реалізовані навіть в рамках найпотужніших комп'ютерів світу. Наприклад, рішення класу задач по оптимізації комерційної діяльності.

**Висновки з дослідження і перспективи подальших розробок.** Таким чином, вивчення особливостей будови та принципів функціонування квантових комп'ютерів, як однієї з складових тем з основ елементної бази сучасної комп'ютерної електроніки та ЕОМ, є невід'ємною частиною процесу модернізації сучасної системи вищої освіти для підготовки фахових майбутніх спеціалістів. Знання проривних технологій та обладнання Індустрії 4.0 дозволить їм в подальшому використовувати можливості перспективних універсальних квантових комп'ютерів для самих різноманітних завдань від задач оптимізації, пошуків в базах даних, робіт з квантовими криптографічними кодами, до розрахунку нових матеріалів та штучного інтелекту. **Перспективи подальших розробок** пов'язані з аналізом наукових досліджень у напрямку молекулярної електроніки, тривимірних технологій побудови інтегральних елементів, інтегрованих нейроеклетронних систем й імплантованих нейрокомп'ютерних інтерфейсів, та розробкою методики їх вивчення в закладах вищої освіти.

#### СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Карлаш Г.Ю. Квантові інформаційні системи. Навчальний посібник. Київ: факультет радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем Київського національного університету ім. Тараса Шевченка, 2018. 77 с.
2. Коробченко Е.В. Квантовый компьютер: основные понятия, класс решаемых задач, перспективы развития. *Экономическая безопасность и качество*. 2018.

№ 3 (32). С. 48-51.

3. Крохмальський Т. Квантові комп'ютери: основи й алгоритми (короткий огляд). *Журнал фізичних досліджень*. 2004, Т. 8, № 1. С. 1-15.
4. Силва В. Разработка с использованием квантовых компьютеров. Программирование квантовых машин в облаке: Python, Qiskit, Quantum Assembly language и IBM QExperience. СПб.: Питер, 2020. 352 с.
5. Химено-Сеговиа М., Хэриган Н., Джонстон Э. Программирование квантовых компьютеров. Базовые алгоритмы и примеры кода. СПб.: Питер, 2021. 336 с.
6. Шваб К. Четверта промислова революція. Формуючи четверту промислову революцію / пер. з англ. Н. Климчук. Київ, 2019. 416 с.
7. Denning P.J., Lewis T.G. Exponential Laws of Computing Growth. *Communications of the ACM*. 2017, Vol. 60. № 1. P. 54-65.

#### REFERENCES

1. Karlash, G.Yu. (2018) *Kvantovi informatsiini systemy. Navchalnyi posibnyk* [Quantum information systems. A manual]. Kyiv.
2. Korobchenko, E.V. (2018) *Kvantovyy komp'yuter: osnovnye ponjatija, klass reshaemykh zadach, perspektivy razvitiya* [Quantum computer: basic concepts, class of tasks, development prospects].
3. Krokhmalskii, T. (2004) *Kvantovi kompiutery: osnovy y alhorytmy (korotkyi ohliad)* [Quantum computers: basis and algorithms (a short review)].
4. Silva, V. (2020) *Razrabotka s ispol'zovaniem kvantovykh komp'yutero. Programirovanie kvantovykh mashyn v oblake: Python, Qiskit, Quantum Assembly language i IBM QExperience* [Practical Quantum Computing for Developers Programming Quantum Rigs in the Cloud using Python, Qiskit, Quantum Assembly Language and IBM QExperience]. Saint Petersburg.
5. Gimeno-Segovia, M., Harrigan, N., Johnston, E. (2021) *Programirovanie kvantovykh komp'yutero. Bazovye algoritmy i primery koda* [Programming Quantum Computers: Essential Algorithms and Code Samples]. Saint Petersburg.
6. Shvab, K. (2019) *Chetverta promyslova revoliutsiia. Formuiuchy chetvertu promyslovu revoliutsiiu* [The Fourth Industrial Revolution. Shaping the Fourth Industrial Revolution]. Kyiv.
7. Denning P.J., Lewis T.G. (2017) *Exponential Laws of Computing Growth*.

#### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**ТКАЧУК Андрій Іванович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теорії і методики технологічної підготовки, охорони праці та безпеки життєдіяльності Центральноукраїнського державного педагогічного університету імені Володимира Винниченка.

**Наукові інтереси:** теорія та методика викладання основ елементної бази сучасної комп'ютерної електроніки та ЕОМ.

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

**TKACHUK Andriy Ivanovych** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Theory and Methods of Technological Preparation, Labor Protection and Safety Life, Volodymyr Vynnychenko Central Ukrainian State Pedagogical University.

**Circle of scientific interests:** the theory and methodology of teaching the foundations of the elemental base of modern computer electronics.

Стаття надійшла до редакції 07.04.2021 р.