

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
(повна назва)

Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

КУБІТНО-ВЕКТОРНІ МОДЕЛІ ДЛЯ СИНТЕЗУ ТА АНАЛІЗУ ЦИФРОВИХ
ПРИСТРОЇВ ТА СОС-КОМПОНЕНТІВ

(тема)

Виконав: студент II курсу, групи СКСм-22-1

Клейменов Н. М.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність
123 – Комп'ютерна інженерія
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми
освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)

Освітня програма
Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Хаханов В.І.

Допускається до захисту

Зав. каф. АПОТ



(підпис)
2023 р.

Чумаченко С.В.
(прізвище, ініціали)

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Комп'ютерної інженерії та управління
Кафедра Автоматизації проектування обчислювальної техніки
Рівень вищої освіти другий (магістерський)
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(шифр і назва)
Тип програми Освітньо-професійна
(освітньо-професійна або освітньо-наукова)
Освітня програма Спеціалізовані комп'ютерні системи
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри АПОТ



Чумаченко С.В.
(підпис)

03.11.2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФАКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові Клейменову Нікіті Михайловичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Кубітно-векторні моделі для синтезу та аналізу цифрових пристроїв та SoC-компонентів

затверджена наказом по університету від 03 листопада 2023 р. № 1282 Ст

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 19 січня 2024 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

Моделі, методи, архітектури квантового комп'ютингу

Структури даних

Елементи булевої логіки

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати у роботі _____

Аналіз предметної області

Архітектури квантового комп'ютингу

Приклад реалізації симулятора справної поведінки на основі кубітно-векторних моделей

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) _____
слайди презентації – 14 _____


6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)


Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів	Примітка
1	Отримання завдання	01.09.2023-05.09.2023	
2	Аналіз предметної області, напрямки сучасного та квантового комп'ютингу	07.09.2023-21.09.2023	
3	Кубітні, табличні та векторні структури даних	22.09.2023-15.10.2023	
4	Архітектури квантового комп'ютингу	16.10.2023-06.11.2023	
5	Приклад реалізації симулятора справної поведінки на основі кубітно-векторних моделей	07.11.2023-07.12.2023	
6	Оформлення пояснювальної записки	08.12.2023-30.12.2023	
7	Оформлення графічного матеріалу	02.01.2024-05.01.2024	
8	Перевірка виконаного проекту керівником	06.01.2024-12.01.2024	

Дата видачі завдання 01 вересня 2023 р.

Студент  Клейменов Н.М.
(підпис)

Керівник роботи  проф. Хаханов В.І.
(підпис) (посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 55 с., 18 рис., 33 джерел.

МОДЕЛЬ, МЕТОД, АРХІТЕКТУРА, КІБЕРФІЗИЧНИЙ КОМП'ЮТИНГ, КІБЕРФІЗИЧНИЙ ПРОСТІР, КВАНТОВИЙ ЦИФРО-АНАЛОГОВИЙ КОМП'ЮТИНГ, MEMORY-ADDRESS-TRANSACTION, КУБІТНІ ВЕКТОРИ, МАТРИЧНІ СТРУКТУРИ ДАНИХ, ЦИФРОВІ СИСТЕМИ НА КРИСТАЛАХ.

У магістерській роботі розглядаються питання, пов'язані зі створенням структур даних, методів, архітектур на основі кубітно-векторних моделей для синтезу та аналізу цифрових пристроїв та SoC-компонентів.

Мета дослідження – підвищення продуктивності обчислювальних процесів шляхом розробки кубітно-векторних моделей опису функціональностей, архітектур та алгоритмів квантового комп'ютингу на основі кубітних структур даних.

Задачі дослідження: проаналізувати сучасні технологічні тенденції; виконати огляд метрик та структур даних для діагностичного експерименту; проаналізувати архітектури квантового комп'ютингу; виконати імплементацію кубітно-векторних моделей для симулятора справної поведінки.

Об'єкт дослідження – кубітно-векторні моделі опису функціональностей, архітектур та алгоритмів квантового комп'ютингу на основі кубітних структур даних.

Предмет дослідження – квантовий цифро-аналоговий комп'ютинг, цифрові системи на кристалах.

ABSTRACT

The explanatory note contains: 55 pages, 18 figures, 33 sources according to the list of links.

MODEL, METHOD, ARCHITECTURE, CYBERPHYSICAL COMPUTING, CYBERPHYSICAL SPACE, MEMORY-ADDRESS-TRANSACTION, QUBIT VECTORS, MATRIX DATA STRUCTURES, DIGITAL SYSTEMS ON CRYSTALS.

The master's thesis examines issues related to the creation of data structures, methods, architectures based on qubit-vector models for the synthesis and analysis of digital devices and SoC components.

The purpose of the research is to increase the productivity of computing processes by developing qubit-vector models for describing functionalities, architectures and algorithms of quantum computing based on qubit data structures.

Research tasks: to analyze modern technological trends; perform a review of metrics and data structures for the diagnostic experiment; analyze quantum computing architectures; implement the qubit-vector models for the simulator of healthy behavior.

The object of investigation is qubit-vector models describing the functionality, architectures and algorithms of quantum computing based on qubit data structures.

The subject of further research is quantum digital-analog computing, digital systems on chips.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ, СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ.....	8
ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ.....	11
1.1 Розвиток квантового комп'ютингу з класичного.....	11
1.2 Напрямки розвитку технологій від компанії Gartner	12
1.3 Огляд літератури.....	13
1.4 Розробка квантового комп'ютера	16
1.5 Висновки до розділу 1	20
2 МЕТРИКИ ТА СТРУКТУРИ ДАНИХ ДЛЯ ДІАГНОСТИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ У КІБЕРФІЗИЧНОМУ ПРОСТОРИ.....	22
2.1 Універсальна метрика процесів та явищ	22
2.2 Метрика процесів та явищ	23
2.3 Метрика діагностування цифрової структури	24
2.4 Структури даних для організації діагностичного експерименту	24
2.5 Проектування та метрика комп'ютингу	28
2.6 Висновки до розділу 2	32
3 МОДЕЛІ, МЕТОДИ, АРХІТЕКТУРИ КВАНТОВОГО КОМП'ЮТИНГУ .	33
3.1 Аналоговий шлях у квантовий комп'ютинг	33
3.2 Квантові архітектурні рішення.....	39
3.3 Аналогово-цифровий комп'ютинг.....	43
3.4 Комп'ютинг як процес обміну даними	46
3.5 Структури комп'ютингу	47
3.6 Висновки до розділу 3	48
4 СИМУЛЯТОР СПРАВНОЇ ПОВЕДІНКИ НА ОСНОВІ КУБІТНО- ВЕКТОРНИХ МОДЕЛЕЙ.....	49
4.1 Кубітно-векторні моделі справного моделювання схем.....	49
4.2 Симулятор справної поведінки	49

4.3 Верифікація програмного додатку	51
4.4 Висновки до розділу 4	53
ВИСНОВКИ	54
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	56
ДОДАТОК А Графічний матеріал до кваліфікаційної роботи	60
ДОДАТОК Б Тези доповіді, сертифікат	67
Відомості кваліфікаційної роботи.....	68

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ,
СКОРОЧЕНЬ І ТЕРМІНІВ

AI – Artificial Intelligence (штучний інтелект);

ASIC – Application-Specific Integrated Circuit (інтегральна схема спеціального призначення);

DT – Data-Transaction

EAQ – Electron-Address-Quantaction;

FSM – Finite State Machin;

HW – Hardware;

MAT – Memory-Address-Transaction;

ML – Machine Learning;

QC – Quantum Computer (квантовий комп'ютер);

QPU – блок квантової обробки;

RF – Radio Friquency;

SoC – System-on-Chip;

SW – Software;

VLCI – Very-large-scale integration (надвелика інтегральна схема).

ВСТУП

Комп'ютинг розглядається як транзакції відношень між даними на основі механізмів управління та виконання. Квантові відношення становлять суперпозицію між частинками та їх станами. Суперпозиція та заплутаність – еквівалентні поняття. Заплутаність – нелокальна суперпозиція детермінованих станів. Квантовий комп'ютинг може розглядатися як транзакції відношень між кубітними даними у той час, як квантовий комп'ютер – аналоговий пристрій для паралельного розв'язання комбінаторних задач.

Практично орієнтовані визначення понять квантового комп'ютингу є шлях до розробки масштабованих паралельних алгоритмів для вирішення задач комбінаторики. Довільний алгоритм може бути приведений до безумовного, тобто послідовності операцій, оскільки таблиця істинності становить сукупність повної системи умов-станів. Довільна послідовність дій може бути зведена до єдиної паралельної операції. Умови та послідовності виникають лише тоді, коли розробники хочуть використовувати раніше створені примітивні структури, що створюють неоптимальний обчислювач. Детермінована парадигма застосування фотонних транзакцій на електронах атомів для створення квантових комп'ютерів може виключати використання квантової логіки. Квантовий комп'ютинг еволюціонував з класичного: Memory-Address-Transaction (MAT) → Electron-Address-Transaction → Electron-Address-Quantaction (EAQ) → State-Superposition-Logic. Обчислення на квантовому комп'ютері, можна паралельно виконати на класичному за рахунок надмірності пам'яті. MAT-комп'ютер реалізує будь-які алгоритми за рахунок транзакцій (read-write) на пам'яті. Точка зустрічі класичного та квантового комп'ютера – фотонні транзакції на структурі електронів.

У магістерській роботі розглядаються питання, пов'язані зі створенням структур даних, методів, архітектур на основі кубітно-векторних моделей для синтезу та аналізу цифрових пристроїв та SoC-компонентів.

Мета дослідження – підвищення продуктивності обчислювальних процесів шляхом розробки кубітно-векторних моделей опису функціональностей, архітектур та алгоритмів квантового комп'ютингу на основі кубітних структур даних.

Задачі дослідження: проаналізувати сучасні технологічні тенденції; виконати огляд метрик та структур даних для діагностичного експерименту; проаналізувати архітектури квантового комп'ютингу; виконати імплементацію кубітно-векторних моделей для симулятора справної поведінки.

Об'єкт дослідження – кубітно-векторні моделі опису функціональностей, архітектур та алгоритмів квантового комп'ютингу на основі кубітних структур даних.

Предмет дослідження – квантовий цифро-аналоговий комп'ютинг, цифрові системи на кристалах.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

Наводиться стан сучасного комп'ютингу на основі огляду літературних джерел та технологічних тенденцій Gartner Research Group. Аналізується розвиток квантового комп'ютингу з класичного.

1.1 Розвиток квантового комп'ютингу з класичного

Шлях крізь століття до сучасних квантових комп'ютерів розпочався як комп'ютинг 40 000 років тому з першого малюнка мамонта на стіні печери. Вчені, які розробляють квантові комп'ютери, йдуть по стопах Емілія Леона Поста (1897-1954), основний практичний постулат якого полягає в тому, що без функціонально повної сукупності базових логічних функцій, наприклад, і-ні, або-ні, і-або-ні, 1-xor-and [1-3], було б неможливо створити обчислювач. Це дійсно так, якщо починати з таблиці істинності примітивних елементів як основного будівельного блоку для композиції складних схем. Однак ця аксіома вірна, доки не буде знайдено більш просту операційну транзакцію. Завдяки цьому можна написати або синтезувати базову постлогіку, створивши основу для функціонально завершених і мінімальних логічних функцій і всіх інших комбінаторних структур довільної складності.

Такими примітивами є лише дві функції-транзакції: записи та зчитування, через які можна аналізувати-синтезувати абсолютно будь-який, скільки завгодно складний, обчислювальний процес. Крім цього, можна казати лише про єдину операцію-транзакцію «запис-зчитування», оскільки закладене в них бінарне відношення не існує одне без одного. Інакше, щоб записати кудись, треба рахувати звідкись. Це означає – існує більш технологічна і примітивніша read-write-transaction (рис. 1.1), як базова альтернатива логіці Поста та класичному квантовому комп'ютингу, який також йде шляхом

квантово-механічного синтезу контрольованих таблиць істинності фундаментальних елементів [3, 4].

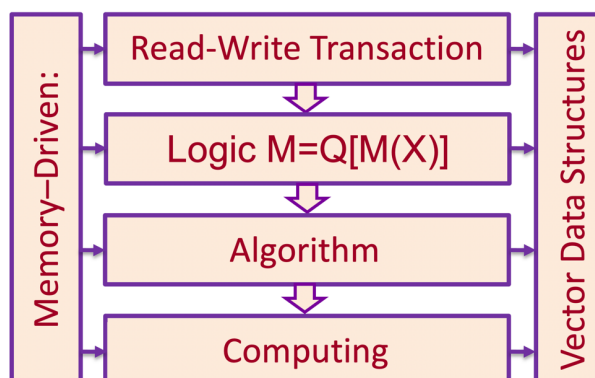


Рисунок 1.1 – Memory-driven Transactions

Вчені вважають, що створення квантового комп'ютингу є неможливим, уникаючи таких математичних таблиць-матриць, для яких потрібен технологічно складний криогенний механізм охолодження сіліконового кристала до рівня, близького до абсолютного нуля.

1.2 Напрямки розвитку технологій від компанії Gartner

Найзатребуванішими напрямками на ринку електронних технологій сьогодні є [5]: 1) квантовий комп'ютинг; 2) кіберсоціальний комп'ютинг; 3) штучний інтелект.

Перша тенденція має вирішити всі найскладніші комбінаторні проблеми людства. Друга – усунути небезпеку ліквідації народів дедалі аморальнішою політичною елітою. Третя – це побудувати підхід до стійкого саморозвитку кіберфізичних механізмів та інфраструктури. У той же час, комп'ютинг передбачає онлайн-цифрове прийняття рішень відповідно до моніторингу точних і комплексних показників процесів і явищ.

Згадані тренди корелюються з напрямками розвитку технологій, опублікованими компанією Гартнер. Йдеться про комбінаторні інновації, які

створюють нові властивості кіберфізичних систем з метою покращення якості життя громадян та захисту екосистем планети.

Перша тенденція – глибока орієнтація на потреби людей. Це й розвиток Інтернету етичної поведінки, узагальнення досвіду в різних галузях, впровадження його в людське лідерство, підвищення конфіденційності даних під час обробки.

Друга тенденція представлена глобально розподіленими хмарними сервісами, оперативними діями, незалежними від цільової геолокації (незалежність від розташування), і масштабованими мережами кібербезпеки процесів і явищ.

Третя тенденція, стабільна поставка в умовах глобальної нестабільності, обумовлена інтелектуально зібраним, гнучким бізнесом, надійними засобами технології ШІ та гіперавтоматизацією всього, що може бути автоматизовано всередині організації. Управління, операції, моніторинг, виконувани нелокально в режимі реального часу, – сьогодні є важливими принципами виживання людства.

1.3 Огляд літератури

Аналітична публікація [13] цікава своїм системно-метричним підходом до доступного розуміння квантового комп'ютера, яке втиснуто у кілька сторінок тексту. Виконано порівняння класичного та квантового механізмів управління та виконання, структур даних та алгоритмів. Тут продемонстровано вагомість аналогових сигналів для паралельного управління та моніторингу масивів кубітних даних без адрес. Наведено шляхи розвитку квантового комп'ютингу на основі об'єднання спільних зусиль фахівців різного профілю, технологічних компаній та розвинених країн. Далі представлені основні моменти публікації та інші підходи до побудови (квантового) комп'ютингу, які, з одного боку, суттєво відрізняються за ідеологією від класичного підходу до створення обчислювачів, а з другого –

мають вражаючу схожість. Управління квантовим комп'ютером подібно до безумовної установки кубика Рубіка наосліп по одному із заданих початкових станів (43,252,003,274,489,856,000) шляхом застосування кінцевого числа правил (<20). Інакше розглядається транзакція вектора квантового стану на сукупності базових елементів-кубітів. Звичайно, неможливо проконтролювати процес, що призведе до його руйнування. Можна спостерігати лише кінцевий стан кубіта. Аналог – це безумовний алгоритм налаштування кінцевого автомата (початкового заданого стану). Різниця між класичними комп'ютерами та квантовими комп'ютерами полягає в тому, що вони використовують незвичайні та важкозрозумілі (але інтуїтивно сприйнятливі) квантово-механічні ефекти для обробки даних. У той час як традиційні класичні комп'ютери працюють з бітами, які приймають значення 0 або 1, квантові комп'ютери працюють з квантовими бітами або кубітами

Кубіти використовують квантово-механічний ефект – суперпозицію, що дає можливість кожному кубіту перебувати в стані, що визначається метрикою-ступенем «близькості» до нуля та одиниці. Коефіцієнти, які описують одиничність і нульовість кубіта, є комплексними числами з дійсною та уявною частинами ($V=a+ib$). QC із кінцевою кількістю кубітів дозволяє створювати структури даних, у яких стан одного кубіта пов'язаний зі станами одного або кількох інших кубітів. Це називається «заплутаність». Два класичні біти можна встановити лише на 00, 01, 10, 11. Кожен з двох переплутаних кубітів може генерувати суперпозицію цих чотирьох станів із постійною ймовірністю: 00, 01, 10 (тут різниця між заплутаністю та суперпозицією нівельовано):

0	0	0,2
0	1	0,3
1	0	0,3
1	1	0,2

Чим більше взаємодіючих кубітів у структурах даних, тим більше вписувалося станів (векторів) і менше ймовірність кожного їх. Теоретико-множинне зображення абсолютно детермінованого стану або суперпозиція в дискретній математиці відоме більше століття. Алгебра множин Кантора оперує чотирма символами (рис. 1.2): $A = \{0, 1, X, \emptyset\}$, де стійкий стан $X = \{0, 1\}$ може бути унітарно закодований як 11, за умови, що інші коди рівні: $C(A) = \{0=10, 1=01, X=11, \emptyset=00\}$. Чотири стани $Y = \{Q, E, H, J\}$, що перебувають у суперпозиції, можна закодувати літерами, двійковими кодами $Y = \{00, 01, 10, 11\}$ або унітарними кодами $Q=1000, E=0100, H=0010, J=0001$. У цьому унітарне кодування забезпечує паралельне виконання регістрових логічних операцій на класичному комп'ютері [7].

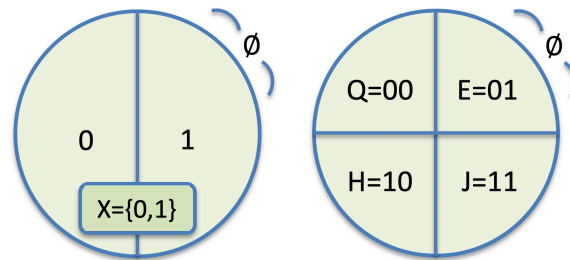


Рисунок 1.2 – Символи алгебри Кантора

Три заплутані кубіти можуть перебувати в суперпозиції восьми фундаментальних (тут і далі елементарних) станів, що створюють сукупність подій. Природно, кубітів n можуть створювати суперпозицію з 2^n станів. Тому виконання операції із n заплутаними кубітами означає одночасну обробку 2^n бітів інформації. У разі класичного комп'ютера метрика унітарного кодування станів кожного з 2^n двійково-десяткових адресних кодів з n розрядів розширюється до 2^n координат. Інакше паралельність та стійкість виконання логічних операцій вимагає суттєвої апаратної надмірності, при цьому інші недоліки відсутні. Проекція однією з осей є зняття даних після обчислення. Інша інтерпретація: є в кошику n куль, один з яких можна витягнути, щоб визначити стан системи в даний момент, а також інтегральний стан куль, що залишилися за принципом доповнення. Якщо таких станів два (один кубит), їх

нелокальна зв'язаність (квантова нелокальність), завжди через інверсію, використовується передачі конфіденційних даних квантовими каналами. Втім, деякими дослідниками висловлюється думка, що для квантових комп'ютерів заплутаність, навпаки, є небажаним побічним фактором [14]. З позиції теореми Поста це не зовсім так, оскільки обидві операції: суперпозиція (or) і переплутування (not) створюють функціонально повний базис для логічного комп'ютера, коли усунення однієї з них унеможлиблює створення універсального обчислювача. Операції квантових обертань, які виконуються із кубітом, не бувають ідеальними. Обмеження на якість сигналів, що управляють, і чутливість кубітів впливають на операцію повороту кубіту. Наприклад, обертання на 90 градусів може закінчитися результатом, рівним 90,1 або 89,9 градусів. Такі помилки накопичуються, що призводить до неправильного результату. Інше джерело помилок – декогеренція: кубіти поступово втрачають інформацію, яку вони містять, а також зчепленість. Кубіти певною мірою взаємодіють із середовищем незважаючи на те, що фізичний субстрат, який використовується для їх зберігання, був спроектований так, щоб тримати їх ізольованими. Можна компенсувати ефекти неточності керування та декогеренції шляхом квантового виправлення помилок. Такий підхід вимагає великої кількості надлишкових фізичних кубітів та додаткового часу їхньої обробки. Декогеренція властива не тільки квантовим бітам, а й будь-яким даним, інформації, знань, історії, культури, науки, освіти. Когерентність завжди екстра-витратна властивість для будь-якої кіберфізичної чи кіберсоціальної системи. Так само як і декогеренція не завжди є погано для функціонування системи.

1.4 Розробка квантового комп'ютера

Функції-модулі (IBM, Google, Intel), необхідні для квантового комп'ютера, можна розділити на п'ять компонентів, концептуально представлених п'ятьма рівнями керування. Прикладний рівень не є частиною

самого квантового комп'ютера, але він є ключовою частиною всієї системи при створенні відповідних алгоритмів: середовище програмування, операційна система для квантового комп'ютера, інтерфейс користувача. Алгоритми можуть бути повністю квантовими або включати класичну частину. Рівень класичної обробки виконує три основні функції: 1) оптимізує квантовий алгоритм та компілює його в мікрокоманди; 2) обробляє вимірювання квантового стану, що повертаються обладнанням на нижніх рівнях, що передаються назад у класичний алгоритм для отримання остаточних результатів; 3) калібрує і налаштовує блоки нижченаведених шарів. Рівні цифрової, аналогової та квантової обробки, які складають блок квантової обробки (QPU). Між трьома рівнями QPU існує функціональний зв'язок. Тому конструкція кожного з них залежить від двох інших. Рівень цифрової обробки перетворює мікрокоманди у відповідні аналогові імпульсні сигнали, необхідні управління кубітами, як квантовими логічними вентилями. Самі імпульси генеруються лише на рівні аналогової обробки QPU. Цифровий рівень також передає результати вимірювань квантового обчислення рівень класичної обробки даних, де квантове рішення може бути поєднане з класичними обчисленнями. Додавання функції виправлення помилок значно ускладнює рівень цифрової обробки. Рівень аналогової обробки створює різні види сигналів актуації кубітів на наступному шарі. Сигнали представлені рівнями напруги, тимчасовими періодами, пачками мікрохвильових імпульсів, які модулюються по фазі та амплітуді для ініціювання операцій з кубітами, з'єднаними до груп, для формування квантових логічних вентилів, що формують схему для виконання конкретного квантового алгоритму. Генерування множини сигналів для одночасної (послідовної) актуації різних кубітів має бути синхронізовано у пікосекундних масштабах часу. Для невеликих систем із кількох десятків кубітів кожен із них налаштований, як радіоприймач, на власну частоту, прив'язану до одного каналу. Тому сигнал доступу до кубіту передається загальною сигнальною лінією на спеціальній частоті. Така стратегія управління кубітами не масштабується, оскільки

сигнали, що надсилаються на кубит, повинні мати суттєву смугу пропускання, наприклад, 10 мегагерц. Тому для комп'ютера з мільйона кубітів буде потрібно смуга пропускання 10 терагерц, що практично неможливо. Неможливо також побудувати мільйон окремих ліній для сигналів керування, приєднаних до кожного кубіту. Раціональним рішенням з управління кубітами є комбінація просторового та частотного мультиплексування. Кубіти поєднуються в групи, де кожна з них прикріплена до загальної сигнальної лінії. Кожен кубит у групі налаштований сигнал лише однієї частоти. Комп'ютер керує підмножиною кубітів шляхом генерування імпульсів однієї частоти, що передаються через аналогову мережу комутації для подачі імпульсів певній групі кубітів. Інше рішення з урахуванням комбінації частотного і просторового мультиплексування пов'язані з тим, кожен кубит групи налаштовується власну частоту. У цьому випадку актюаторний аналоговий сигнал може маніпулювати цільовим кубітом в одному підмножині або набором кубітів одночастотних в різних групах. За таке мультиплексування доводиться платити неточністю у керуванні кубітами. У сучасних системах шари цифрової та аналогової обробки працюють за кімнатної температури. Шар, що містить кубіти, повинен мати температуру, близьку до абсолютного нуля. Загальне рішення у майбутньому – інтегрування всіх трьох верств в криогенний чіп. Існуючі QC на надпровідних матеріалах містять кілька десятків кубітів і здатні виконувати від десятків до сотень квантових когерентних операцій (Google, IBM, Intel). Розширення архітектури до кількох сотень кубітів потребує збільшення кількості ліній управління. Слід також мати на увазі, що доступний обчислювальний час, протягом якого кубіти залишаються когерентними – 50 мікросекунд. Цей факт обмежує кількість квантових інструкцій до виконання алгоритму. Потім обчислення будуть поглинені помилками.

Таким чином, QC з кількома сотнями кубітів буде використовуватися як прискорювач для класичних суперкомп'ютерів. Комбінаторні завдання, для яких квантовий комп'ютер орієнтований, вирушають із суперкомп'ютера на

квантовий, а результати потім повертаються на перший для подальшої обробки. Квантовий комп'ютер діятиме як графічний процесор, вирішуючи паралельно конкретні завдання матричних транзакцій та цифрової обробки сигналів. Сучасні технології виготовлення QC що неспроможні виробляти повністю однорідні кубіти. Отже, різні кубіти мають трохи різні властивості. Неоднорідність властивостей кубітів потребує адаптації аналогового рівня QPU до конкретних реалізацій, що також ускладнює масштабування процесу побудови QC. Мультиплексування для великої кількості кубітів буде запроваджено через 5-10 років, що дозволить запровадити механізми виправлення помилок шляхом ведення кубітної надмірності. Квантова корекція помилок допоможе вирішити фундаментальну проблему декогеренції шляхом введення надмірності від 100 до 10 000 фізичних кубітів на один логічний. Для реалізації корекції помилок буде потрібний також контур зворотного зв'язку, що охоплює всі три рівні QPU з малою затримкою та високою пропускнуою здатністю. Фізична основа експериментальних кубітів сьогодні представлена надпровідними ланцюгами, спіновими кубітами, фотонними системами, іонними пастками. Успішним стане той матеріал, який забезпечить структури даних та управління мільйонів кубітів аналоговими сигналами у схемі мультиплексування. Такі QPU вимагатимуть не мільйони цифрових з'єднань, а кілька сотень чи тисяч, які можна створювати шляхом використання технологій проектування та виготовлення ІВ. Проблемою є спостереження станів мільйонів кубітів із частотою, що дорівнює тисячам вимірювань за секунду без порушення квантової інформації, яка залишається невідомою до кінця обчислень. Одночасно слід виявляти та виправляти помилки, що виникають у процесі виконання алгоритму. Вимірювання кубітів вимагає також демодуляції та оцифрування аналогового сигналу з частотою в кілька кілогерців. Для мільйонів кубітів загальна цифрова пропускна здатність дорівнює кількох петабайтів на секунду, що практично поки що недосяжно для сучасних технологій, що інтегрують чіпи кімнатної температури зі структурами кубітів при температурі абсолютного нуля. Тому

аналоговий та цифровий рівні QPU повинні бути інтегровані з шаром квантової обробки на одному чіпі, де розміщені схеми попередньої обробки та мультиплексування вимірювань та виправлення помилок. При цьому слід зазначити, що не всі вимірювання кубітів необхідно передавати на цифровий рівень. Це необхідно, коли локальний канал фіксує помилку, що різко знижує потрібну цифрову смугу пропускання. Нестабільність сучасних кубітів у квантовому шарі потребує надмірності для виправлення помилок. Поліпшення якості кубітів може призводити до витрат при розробці QC, які швидко окупляться. На поточному етапі створення квантових обчислювачів управління окремими кубітами, як і раніше, актуальне, оскільки потрібно отримати максимальну віддачу від кількох кубітів. Коли кількість доступних кубітів збільшиться, виникне проблема розробки систем мультиплексування керуючих сигналів і вимірювання кубітів. Наступним важливим кроком стане розробка та використання квантових обчислювачів зі схемами виправлення помилок. Тут необхідне об'єднання зусиль розробників та інженерів-технологів з виробництва мікросхем, фахівців з кріогенного контролю, експертів з обробки великих даних та створення квантових алгоритмів у рамках нової галузі – квантової інженерії. Потрібні об'єднані зусилля академічних та дослідницьких інститутів, комерційних компаній та державних організацій для створення ринкових квантових комп'ютерів, що виробляють величезні обчислювальні потужності для майбутнього.

1.5 Висновки до розділу 1

Проналізовано стан сучасного квантового комп'ютингу на основі огляду літературних джерел та прогнозів американської дослідницької та консалтингової компанії Gartner Research Group, розробок компаній (Google, IBM, Intel).

Мета дослідження – підвищення продуктивності обчислювальних процесів шляхом розробки кубітно-векторних моделей опису

функціональностей, архітектур та алгоритмів квантового комп'ютингу на основі кубітних структур даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати сучасні технологічні тенденції;
- виконати огляд метрик та структур даних для діагностичного експерименту;
- проаналізувати архітектури квантового комп'ютингу;
- виконати імплементацію кубітно-векторних моделей для симулятора справної поведінки.

2 МЕТРИКИ ТА СТРУКТУРИ ДАНИХ ДЛЯ ДІАГНОСТИЧНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ У КІБЕРФІЗИЧНОМУ ПРОСТОРИ

Розглядаються метрики та структури даних для організації діагностичного експерименту ідентифікації несправного стану, пов'язані з вимірами в кіберфізичному просторі.

2.1 Універсальна метрика процесів та явищ

Метрика – сукупність специфікованих параметрів для виміру відстані між процесами та явищами. Результат виміру формує дві взаємно-доповнюючі оцінки: подібність S і відмінність D , які взаємодіють за правилами виконання векторних логічних операцій між собою та з (X, Y) -об'єктами [6]:

$$S \oplus D = X \vee Y = \overline{X \wedge Y}. \quad (2.1)$$

Рівняння (2.1) визначає спосіб вимірювання відношень у математичному, фізичному, соціальному чи віртуальному просторі як подібність/відмінність між процесами та явищами.

Розглядаються вектори двійкових параметрів, що кодують процес чи явище. Тут подібність двох об'єктів визначається за допомогою and-логіки, застосованої до кількох векторів, розмірністю n :

$$S = \sum_{i=1}^n (X_i \wedge Y_i). \quad (2.2)$$

Відмінність можна сформулювати на основі функції xor, що створює відстань по Хеммінгу

$$D = \sum_{i=1}^n (X_i \oplus Y_i). \quad (2.3)$$

Нормовані відношення між двійковими або числовими $S(X_i, Y_j)$ векторами визначається наступними виразами:

$$D^n = \frac{D}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i \oplus Y_i)}{\sum_{i=1}^n (X_i \vee Y_i)}; \quad (2.4)$$

$$S^n = \frac{S}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i \wedge Y_i)}{\sum_{i=1}^n (X_i \vee Y_i)} \approx S(X_i, Y_j) = \frac{\sum_{i=1}^n [\min(X_j, Y_i)]}{\sum_{i=1}^n [\max(X_j, Y_i)]}. \quad (2.5)$$

У (2.4) та (2.5) знаменник визначається нормою та обчислюється як сума всіх значущих ненульових розрядів у двох векторах:

$$N = \sum_{i=1}^n (X_i \vee Y_i) \text{ або } \sum_{i=1}^n [\max(X_j, Y_i)].$$

Оцінка подібності, що дорівнює одиниці, формує множину еквівалентних між собою об'єктів у запропонованій метриці. Еквівалентність у технічній діагностиці означає наявність невиязних на тесті несправностей, що призводить до необхідності збільшувати потужність тесту чи кількість ліній спостереження.

2.2 Метрика процесів та явищ

Метрика будь-якого процесу чи явища визначається наступними парами відношень: простір-час, матерія-енергія. Матерія та енергія визначаються залежністю $E = m \times c^2$. Аналогічне відношення має виконуватися і для простору-часу $S = t \times c^2$. Рівняння адидивності $S + T = 1$ формує універсальну одиницю простору-часу. Воно означає неконстантність часу, тобто його зміну у фазовому циклі розвитку Всесвіту. Як і простір, час є функцією від фази гармонійної зміни (розширення-стиснення) Всесвіту. Щодо сталості матерії та енергії Всесвіту також має діяти закон $m + e = 1$ у всіх точках фази [7].

2.3 Метрика діагностування цифрової структури

Метрика діагностування розглядається як сукупність властивостей для попарного розрізнення всіх технічних станів об'єкта. Діагностування розглядається як метричне визначення технічного стану об'єкта. Контроль визначає метричне розрізнення між справним станом та сукупністю несправних станів. Пошук дефекту – визначення його місця, причини та виду.

Розглядається двовимірна просторово-часова метрика діагностування цифрової структури. Діагностування можна розглядати як процес визначення місця, причини та виду дефекту, тобто процес ідентифікації несправного стану, який у цифровому світі є двійково-десятковими кодами, де є правило: для розпізнавання-ідентифікації N станів необхідно мати розрядність коду $n = \log_2 N$. Число несправних станів N та розмірність коду n пов'язані формулою $N = 2^n$. При цьому число n можна отримати, виходячи з адитивності цієї оцінки, яка залежить від довжини тесту t і числа ліній спостереження a , які можна розглядати як точки контролю, що в сукупності створює потужність двійкового вектора для ідентифікації несправних станів $n = t + m$.

Приклад 2.1. Нехай довжина тесту $t=2$ та кожен набір спостерігається за трьома точками контролю $m=3$. Він формує координату стовпця матриці діагностування розмірності $t+m$ та може розрізняти 32 дефекти. При $n=8$ розмірність добутку $n=t \times a$. Ідентифікувати несправний стан можна чотирма варіантами табличних координат (рис. 2.1).

1	10	1010	10101010
0	10	1010	
1	10		
0	10		
1			
0			
1			
0			
8×1	4×2	2×4	1×8

Рисунок 2.1 – Формування варіантів двовимірної метрики test-assertion

2.4 Структури даних для організації діагностичного експерименту

Таким чином, структури даних для організації діагностичних експериментів ідеально визначається двовимірною таблицею або матрицею, сформованою метрикою тесту асерцій (контрольними точками). Вони утворюють вектор-стовпець для кожного стану несправності. Для виявлення N несправних об'єктів сумарна потужність їх розрядів повинна бути не менше n . Під час спостереження (асерції) таблиця помилок працює з двійковими координатами та створює просту векторну послідовність із n координатами (що відповідає кількості тестових наборів) для виявлення умов помилки N . Розмірність тесту може бути зменшена до одного набору, тоді таблицю може бути повністю перетворено на один рядок.

Оскільки асерції або зовнішні лінії (контакти) спостереження досить коштовне у сучасних SoC, VLCI or ASIC, то компромісним рішенням може бути зменшення довжини тесту до мінімального і розумна кількість ліній спостереження. Це можна досягти лише за умови подання обчислювального пристрою сукупністю функціональних модулів, що оточені вхідними та вихідними лініями, які доступні для тестування, спостереження та діагностування. У цьому полягає суть орієнтованих на кристали, цифрові плати та системи стандартів IEEE 1500, 1532, 1149, 1687, метою яких є формування тестопридатної інфраструктури цифрового виробу для підвищення якості, надійності, ремонтпридатності, керованості, спостережуваності, стійкості до відмов, а також зменшення довжини тестів за рахунок підвищення потужності асерційних (просторово-часових) механізмів, за умови, що глибина діагностування буде дорівнювати одному несправному стану (модулю).

Найзручнішими для людини та машини структурами даних є таблиці (матриці) несправностей, з яких можна отримати дерева пошуку дефектів. Проте дерева спричиняють суттєві часові витрати, що пов'язано з великою кількістю елементарних перевірок в алгоритмах умовного діагностування. У той самий час, весь світ йде шляхом зведення діагностичного експерименту до

одного автоматного такту виконання безумовного діагностування навіть за рахунок додаткових ліній спостереження. Квантові алгоритми націлені на безумовне розрізнення несправних станів в одному автоматному такті, навіть за наявності кількох тестових впливів (алгоритм Дойча).

З метою аналізу таблиць несправностей застосовуються алгоритм аналізу стовпців або метод наближення, алгоритм аналізу рядків або метод виключення. Метод виключення зводиться до одного рядка коду, що визначає несправний стан за рахунок реалізації двох паралельних логічних операцій І–АБО над одиничними та нульовими рядками таблиці (рис. 2.2).

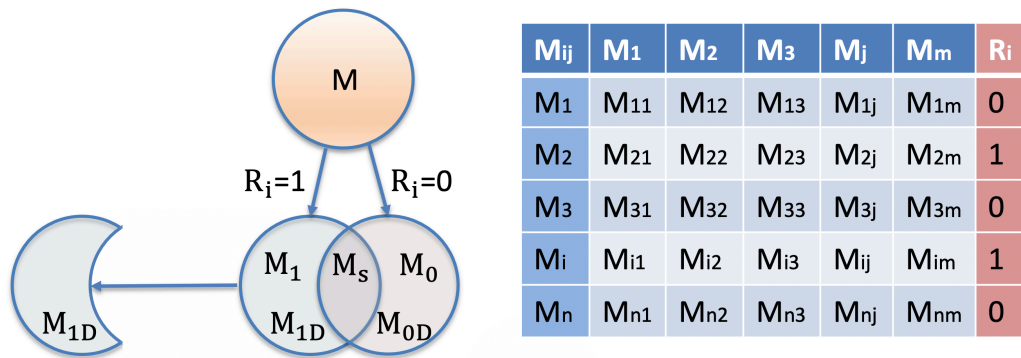


Рисунок 2.2 – Схема виявлення дефектів у стовпцях за R-вектором тестування

Виявлення дефектних станів за таблицею несправностей шляхом комбінаторного аналізу рядків визначається за формулами:

$$L_s = \bigwedge_{R_i=1} M_i \wedge \overline{\bigvee_{R_i=0} M_i}; \quad L_m = \bigvee_{R_i=1} M_i \wedge \overline{\bigvee_{R_i=0} M_i}. \quad (2.6)$$

Нижче представлена таблиця 2.1, за якою знайдені можливі кратні дефекти, зазначені у рядку L_m, на основі наведених вище формул:

Таблиця 2.1 – Кратні дефекти

T	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈	R
T ₁	0	1	0	0	1	0	1	1	1
T ₂	1	0	1	0	0	1	0	0	0
T ₃	1	1	1	0	1	0	1	1	1
T ₄	1	1	0	1	1	1	0	0	0
T ₅	0	0	0	1	0	0	0	1	1
T ₆	0	1	1	1	0	1	0	0	0
T ₇	0	1	0	1	0	1	1	0	1
T ₈	0	0	1	0	1	0	0	0	0
R=0	1	1	1	1	1	1	1	1	
R=1	1	1	1	1	1	1	0	0	
L _m	0	0	0	0	0	0	1	1	
Sim	1/6	3/6	1/7	2/6	2/6	1/7	3/4	3/4	

Процедура паралельного пошуку множини кратних дефектів за відповідною формулою дає результат $L_m = \{S_7, S_8\}$, ідентифікований двома одиницями в рядку L_m . Оцінки подібності між стовпцями 1-8 і стовпцем R сформовані в табличному рядку Sim, згідно з формулою визначення подібності:

$$\text{Sim} = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i \wedge R)}{\sum_{i=1}^n (S_i \vee R)}. \quad (2.7)$$

Максимальна схожість із вектором експериментальної перевірки $R = 10101010$ для стовпців має значення $\text{Sim} = 3/4 = 0,75$. Ця обставина дає можливість зробити висновок про наявність в об'єкті дефектів $L = \{S_7, S_8\}$. Таким чином, два наведених методи аналізу рядків та стовпців матриць концентрації даних мають універсальний характер. Технології можна використовувати для комп'ютерного розпізнавання станів та прийняття рішень у різних сферах людської діяльності: Design and Test, AI, ML, критичні системи, авіоніка, атомна енергетика, транспорт, фінанси, банківська справа, соціальна інженерія та управління.

Від таблиць несправностей можна перейти до таблиць істинності ML і використовувати методи машинного навчання, щоб вирішити проблему виявлення несправних станів. Це становить інтерес особливо для складних цифрових структур. Таблиця несправностей як матрична форма представляє технологічну структуру даних з метою еквівалентування дефектів при синтезі дерев їх пошуку. Якщо класи еквівалентностей мають різну потужність, то розумне додавання асерційних точок (додаткових тестів) у вузькі місця цифрової структури може привести дерево до зваженого вигляду.

Отже, на основі аксіоми збереження добутку $n=t \times a$ у діагностованій дискретній структурі у вимірі тест-асерцій можна формувати матрицю, орієнтовану на асерції та мінімальний тест, навіть, одиничний, або виконати альтернативне діагностування з одиничним числом асерцій.

2.5 Проектування та метрика комп'ютингу

Таблиця істинності є ідеальною формою структури даних для спеціалізованих комп'ютерних обчислювачів (ASIC). Вона може розглядатися як цифровий автомат з одним станом, у той час як тригер – базовий автомат (пам'ять) з двома станами. Таблиця переходів формально нічим не відрізняється від таблиці істинності. Обидва реалізують набір умов (якщо – тоді), щоб знайти або прийняти рішення. Насправді таблиця переходів – це усічена або неповністю визначена таблиця істинності. Поєднання умов «якщо-то» створює метрику важливих параметрів для форматування всіх рядків умов у таблиці істинності. Процес синтезу таблиці істинності можна легко автоматизувати. Якщо в метриці відсутній параметр умови введення, його буде додано до вектора змінних. У той же час всі інші рядки таблиці істинності, в яких цей параметр відсутній, містять символи невизначеності або інваріантності за своїми координатами. Такі методи ефективно працюють під час створення структур даних машинного навчання (ML) на основі однієї

таблиці істинності. Передумовою перевірки правильності таблиці є те, що перетин усіх пар рядків дорівнює порожній множині.

Приклад 2.2. Розглянемо синтез умов. Нехай дано: якщо a , то 1; якщо b , то 0; якщо ab , то 2; якщо c , то 3; якщо bcd , то 4; якщо ae , то 1. Тодт таблиця істинності виглядає як (табл. 2.2):

Таблиця 2.2 – Таблиця істинності для синтезу умов

1	2	3	4	5	y
a					1
	b				0
a	b				2
		c			3
	b	c	d		4
a				e	1

Розв'язок за таблицею істинності визначається як комбінація виходів рядків із непорожніми результатами розрізу для вхідних умов, записаних у параметричній метричній формі.

Комп'ютинг будь-якої складності можна розглядати як таблицю істинності з примітивним керуючим автоматом з одним станом, який реалізує синхронізацію. Метрика комп'ютингу задана просторово-часовим добутком $n=S \times T$, який відповідає один-до-одному реалізації цих параметрів для подібних пар логіка-пам'ять $n=L \times M$. Відхід від паралелізму (комбінаторних схем) у квантово-аналогових обчисленнях створює трудомісткий послідовний механізм отримання результатів, перетворюючи фрагменти простору в послідовні часові рамки елементарних обчислень. Замість однієї великої таблиці істинності можна отримати багато менших таблиць, обробка яких синхронізована в часі. Це стало можливим завдяки введенню вже нетривіальних керуючих автоматів (алгоритмів), які координують роботу малих таблиць істинності та мікрооперацій. Алгоритм завжди є

перетворювачем, який трансформує простір таблиці істинності в обчислювальний інтервал часу, необхідний для отримання результату ($S \rightarrow A \rightarrow T$). Чим складніший алгоритм, тим довший час обробки. Простір і час виробляють добуток $n = S \times T$. Професіонали повинні враховувати це при проектуванні обчислювальних пристроїв. Зі зменшенням простору зменшується швидкість і навпаки.

Приклад 2.3. Три точки на кривій (рис. 2.3) формують однаковий добуток, що дорівнює $n = S \times T = 8 \times 2 = 4 \times 4 = 2 \times 8 = 16$.

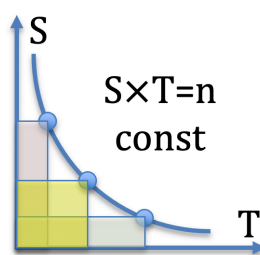


Рисунок 2.3 – Просторово-часова залежність комп'ютингу

Тут з'являється пам'ять для зберігання проміжних результатів обчислень і станів алгоритму. Метрикою складності обчислювального пристрою або платою за зменшення простору таблиці істинності є алгоритм (структура), пам'ять та час. Фактично ускладнення структур даних не полегшує обчислення. Чим простіші структури даних, тим швидше логіка їх обробки, тим вища продуктивність комп'ютера. Таблиця істинності виступає найбільш технологічною формою опису комбінаторних структур даних для людини та машини. Технології машинного навчання та нейромереж також розвивалися по табличному шляху. Підключення пам'яті та часу спричиняло ускладнення структур, як і в детермінованому комп'ютингу. Отже, повернення до таблиці у квантовому комп'ютингу створює нову ланку його розвитку. Комбінаційна цифрова схема, як сукупність безадресних логічних елементів, є аналогом квантового комп'ютингу. Його сутність тривіальна – як паралельно обробити таблицю істинності щоб одержати результат під час вирішення комбінаторних

завдань. Звичайно, вона вирішена в рамках дворівневої комбінаційної схеми класичного комп'ютера шляхом паралельного поширення аналогових сигналів від входів до виходів. Але амбітність квантового комп'ютингу полягає у наближенні його продуктивності до світлової швидкості транзакцій між даними.

Заміна структури множиною (рис. 2.4) означає усунення несуттєвих, задля досягнення мети, деталей моделі процесу чи явища. При вирішенні великої кількості завдань комп'ютингу структурні особливості створюють обчислювальну складність алгоритму без явних і видимих переваг у формуванні кінцевого результату.

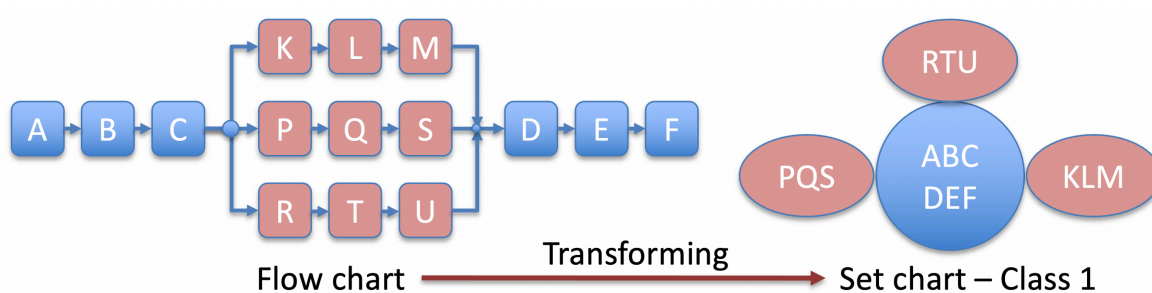


Рисунок 2.4 – Трансформування структури у множину

Іншими словами, якщо є можливість вирішити задачу примітивною безадресною (безструктурною) логікою квантового обчислювача (теорії множин), то алгоритми перетворюються на кілька рядків коду, суть яких – поєднання непустих результатів перетину вхідного набору з рядками регулярної (унітарної) таблиці істинності, що в логіки звучить як диз'юнкція несуперечливих кон'юнкцій. Це є шлях до спрощення структурно складних алгоритмів, що мають багато умов та паралельних шляхів для отримання результату.

Таким чином, якщо проблему можна розв'язати за допомогою примітивної безадресної (безструктурної) логіки квантового комп'ютингу (теорії множин), алгоритм перекладається на кілька рядків коду. Результат

перетину вхідного набору з рядками регулярної (уніфікованої) таблиці істинності є порожнім. Це звучить як диз'юнкція несуперечливих кон'юнкцій. Це спосіб спростити структурно складні алгоритми, які мають багато умов і паралельних проходів для отримання результату.

2.6 Висновки до розділу 2

Проаналізовано метрики та структури даних для організації діагностичного експерименту при ідентифікації несправного стану, пов'язані з вимірами в кіберфізичному просторі.

Таким чином, зростання складності структур даних, від таблиць істинності до їх розбиття, парадоксальним чином призводить до появи складних алгоритмів, які використовують пам'ять, що спричиняє значне збільшення часу обчислювального процесу для отримання результату. Враховуючи те, що сьогоденної пам'яті достатньо для реалізації великих таблиць істинності, слід повернути архітектуру комп'ютера до найпростіших структур даних: таблиць і алгоритмів керування, заснованих на примітивній логіці. При цьому достатньо зберігати лише вектор його початкового стану, а не всю таблицю. Це додатково полегшує спеціалізований комп'ютинг для векторних структур даних і примітивних логічних алгоритмів для їх обробки.

3 МОДЕЛІ, МЕТОДИ, АРХІТЕКТУРИ КВАНТОВОГО КОМП'ЮТИНГУ

Аналізуються моделі, архітектури, структури квантового комп'ютингу. Проаналізовано задачу пошуку оптимального покриття, орієнтована на квантове рішення. Розглядається комбінаційна схема, в основу якої покладено структуру Хасе з метою апаратної реалізації квазіпаралельного пошуку покриття на класичному комп'ютері. Розглянуто квантовий комп'ютинг як аналогові структури даних та алгоритми.

3.1 Аналоговий шлях у квантовий комп'ютинг

Квантова комп'ютерна інженерія як нова галузь знань займається теорією та практикою проектування, тестування виробництва та експлуатації захищених програмно-апаратних масштабованих обчислювачів для паралельного вирішення комбінаторних задач на основі суперпозиції 2^n когерентних станів, що породжуються n кубітами. Інтерфейс між квантовою теорією та програмістом забезпечує саме інженерія. Він призван розроблювати ефективні паралельні алгоритми та програми на основі практично корисних властивостей квантових структур даних для розв'язку комбінаторних задач.

Квантовий комп'ютер розглядається як пристрій з метою паралельного розв'язання комбінаторних задач на основі суперпозиції (переплутування) 2^n когерентних станів, що породжуються n кубітами.

Метрика квантового комп'ютингу визначається такими твердженнями:

- 1) первинними є відношення між квантовими явищами, самі явища – вторинні;
- 2) кубіт є суперпозицією нуля та одиниці в квантових частках різної природи або – система з двовимірним простором станів (спін електрона чи поляризація фотона – кванта електромагнітного поля). Нуль і одиниця,

утворюючи відношення, що неспроможні існувати окремо друг від друга. Це – головна властивість та відмінність від класичного біта, де 0 та 1 існують незалежно один від одного;

3) операції суперпозиції та переплутування формують взаємопов'язані відношення між станами на сукупності з n знеособлених кубітів. Суперпозиція – когерентна взаємодія станів у локальному просторі, утвореному n кубітами. Переплутування – когерентна взаємодія нелокальних станів на n кубітах;

4) відношення – перетворення між станами (системи частинок) у просторі та часі, а не самі стани, є основою обчислень;

5) існує детермінізм замкнутості квантової системи обчислень (незмінності хвильової функції, що описується рівнянням Шредінгера), якщо немає вимірів;

6) імовірнісні відношення системи з вимірювальним пристроєм створюють ймовірності у станах системи та вимірювання. Вимір незворотно змінює хвильову функцію (амплітуду ймовірності) або стан системи в комплексному векторному просторі. Квантовий біт, крім базисних станів $|0\rangle$ і $|1\rangle$ може приймати множину лінійних комбінацій $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. Будь-яку кількість класичних бітів можна витягти з одного квантового біта, за наявності клонуючого пристрою. Насправді з одного кубіту можна витягти лише один біт;

7) квантовий комп'ютер як пристрій, що надає можливість структурі з n квантових бітів здійснювати, як завгодно близьке до бажаного унітарного, перетворення простору $H_n = C^{2^n}$;

8) для квантових бітів 2^n станів є базисом лінійного простору, де допустимі будь-які їх суперпозиції. Набір із n класичних бітів може породжувати 2^n незалежних станів;

9) квантовий паралелізм є одночасним виконанням оборотних (унітарних) обчислень над різними станами квантової суперпозиції.

Таким чином, можна одночасно обробляти схеми на одному вхідному впливі (вхідних даних на одній схемі), але при цьому формується всього n біт

даних в кінці обчислень, що є істотним обмеженням паралелізму. Логічні класичні вентиля необоротні. Для оборотних класичних обчислень вхід і вихід елемента завжди містять однакову кількість бітів n де будь-яке обчислення є взаємно-однозначна відповідність множин входів і виходів. Таку відповідність можна представити унітарною оборотною матрицею $2^n \times 2^n$, де в кожному рядку і стовпці є рівно одна одиниця. Матриця може розглядатися як оператор еволюції деякої квантової системи з простором станів $H_n = \mathbb{C}^{2^n}$. Будь-яке класичне обчислення (логічний елемент) може бути оборотним. Наприклад, таблиця істинності оборотного controlled not має такий вигляд:

c	x	c	\bar{x}
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

У таких оборотних елементах взаємно-однозначної відповідності ніяк не проявляються властивості квантової суперпозиції та заплутаності.

Нелокальна суперпозиція двох когерентних фотонів (електронів) називається квантовою заплутаністю, що проявляється при вимірі одного з них. Квантова заплутаність є властивістю квантової суперпозиції фотонів (електронів). Такі явища як: квантова суперпозиція фотонів; квантова заплутаність електронів; метрика подібності-відмінності для суперпозиції та заплутаності, не визначені строго в джерелах. Заплутаність дає можливість визначати стан усієї системи при її вимірі. Використання квантової суперпозиції станів на вирішення практичних комбінаторних завдань досить повно представлено у публікаціях. Багато алгоритмів, такі як Deutsch-алгоритм для розпізнавання станів, можна паралельно реалізувати на класичних обчислювачах. Квантова заплутаність – це взаємодія двох альтернативних когерентних нелокальних станів, що не перетинаються, які мають між собою максимальну похідну, яка дорівнює їх суперпозиції або

об'єднанню. Суперпозиція означає, що квантова система одночасно перебуває у двох станах. Заплутаність є кореляція двох або більше нелокальних частинок, коли вимір однієї призводить до визначення стану іншої. Суперпозиція та заплутаність – не одне й те саме. Проте суперпозиція (визначена через когерентність) необхідна для створення заплутаності [8,9].

Квантова заплутаність включає суперпозицію станів двох заплутаних корелейованих нелокальних частинок, коли вимір однієї миттєво і завжди в протифазі впливає стан іншої. Когерентність та заплутаність кількісно та функціонально еквівалентні, що відіграє важливу роль у квантових технологіях телепортації, криптографії та кодування. Квантова заплутаність – суперпозиція двох нелокальних протифазових станів однієї частки. Кубіт представлений одним електроном (не системою) (фотоном, атомом), де два стани частки одночасно перебувають у суперпозиції. Але суперпозиції не можна виміряти, лише базові стани, тому потрібні алгоритми приведення результату до n бітам. Існує неможливість виміру квантового стану без порушення суперпозиції. Кількість класичної інформації, що одночасно міститься в n кубітах, дорівнює 2^n .

Суперпозиція станів у кубіті є фізично та математично пов'язані динамічні процеси в квантовій частинці (фотон, електрон, атом), які проявляються в статистиці, після їх вимірювання, подібно до підкинутої монети, яка, обертаючись, має суперпозицію орла і решки, але падаючи на поверхню, завжди набуває одного із зазначених статичних станів. Суперпозиція n кубітів є фізичним і математичним механізмом зв'язування 2^n динамічних станів, що подібно до обертання підкинутої гральної кістки, яка при падінні на поверхню завжди проявляється статичним станом, що визначається n двійковими розрядами. Саме поки дуже короткий період когерентної динаміки станів кубітів, що взаємодіють, цікавий і використовується для практики обчислювального процесу обробки даних при вирішенні комбінаторних завдань.

Квантова заплутаність є нелокальна суперпозиція двох розділених фотонів, що когерентно зберігають протилежні спини на відстані. При вимірі стає очевидним факт протилежності спинів для кількох взаємодіючих фотонів. Заплутані фотони – пара нелокальних частинок з корельованими квантовими станами, що уможливорює квантовий зв'язок, телепортацію, комп'ютинг та квантовий інтернет, квантову метрологію, моніторинг та управління. Генеруються пари заплутаних фотонів за допомогою квантової точки в арсеніді галію розміром близько 10 мікрометрів. Квантова точка із золотим дзеркалом і лінзою, що збирає, освітлена лазером, випускає пару заплутаних фотонів за рахунок розпаду збудженого стану. Пара фотонів, заплутана, не в одному (спин), а в n вимірах (поляризація, енергія, поздовжнє обертання), здатна переносити по оптоволокну в 2^n раз більше інформації, ніж звичайна заплутана пара, що є аналогом технології частотного мультиплексування, але вже на квантовому рівні. Виникає знову ж таки суперпозиція станів, але вже пари заплутаних фотонів у кількох квантових вимірах, які суттєво підвищують продуктивність передачі даних. Заплутані фотони ділять між собою один загальний квантовий стан. Тому зміна квантового стану одного з них тягне за собою синхронну зміну стану іншого (інших), незалежно від відстані, що розділяє їх у фізичному просторі. Розроблено технологію отримання десятків, сотень і тисяч заплутаних фотонів, які ділять між собою до мільйона квантових станів, що поки що важко використовувати для практики передачі інформації. Інший шлях пов'язаний із заплутуванням двох фотонів, але вже у 1–100 квантових вимірах, що означає також корисну багатозначність передачі даних [10].

Заплутаність (станів) фотонів та суперпозиція (кубітних станів) електронів (атомів) – два ізоморфні аналоги квантового комп'ютера для передачі даних та організації обчислень відповідно. Квантова заплутаність є ключем до пояснення миттєвих ментальних зв'язків між окремими людьми, розділеними великими відстанями. Якщо розділені заплутані фотони опромінюють пару найближчих родичів, які мають ідентичні геноми, зміни в

одному з них викликають когерентний відгук у іншій людині. Існує гіпотеза, що два заплутані фотони нелокально реагують один на одного зі швидкістю в 100 тисяч разів, що перевищує швидкість світла. Інше тривіальне пояснення квантової заплутаності пов'язане з тим фактом, що один фотон у момент його заплутування шляхом поділу на два породжує дійсно випадковим чином одиничну та нульову визначеність. Тому, коли один із них вимірюється десь у просторі як одиниця, то інший, природно, «миттєво-когерентно» стає банкрутом. Можна тут емоційно вигукнути – та він і був банкрутом із самого початку заплутаності, коли один фотон був розділений на два.

Відомі сотні «заплутаних» визначень для розуміння базових та структурних компонентів квантового комп'ютера та телекомунікацій, які оперують навіть протилежними поняттями. Настав час створити стандарт квантової інженерії, який повинен мати практичну спрямованість на широке коло читачів (студентів та фахівців), зацікавлених у нових технологіях, які правильно використовують специфіковані терміни. Стандарт не лише пояснює теорію та практику фізичних та математичних явищ, а й поєднує зусилля вчених для креативного вирішення складних проблем. Метрика підпорядкованості окремих компонентів квантового комп'ютерингу через відносини тривіально представлена на рис. 3.1.

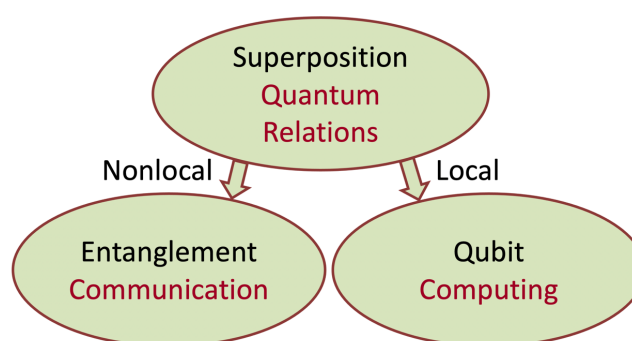


Рисунок 3.1 – Відношення між QC-компонентами

Суперпозиція – лінійне поєднання станів, процесів чи явищ. Тут відношення квантових частинок є суперпозицією. Квантові частинки не

заважають одна одній. Відношення кінцевої множини квантових частинок в одній точці простору є суперпозиція. Відношення кінцевої множини частинок у різних точках простору є переплутування. Суперпозиція та переплутування є еквівалентними поняттями.

Відношення – структура взаємних зв'язків на сукупності компонентів, що визначає властивості процесу чи явища. Квантове відношення є когерентною структурою корельованих станів. Не існує суперечливих чи взаємовиключних відносин між станами у квантовому світі. Квантовий стан – сукупність параметрів, що характеризують когерентну структуру корельованих станів у заданий час. Суперпозиція – когерентне відношення між двома та більш корельованими станами квантової частки (фотона, електрона, атома). Переплутування – нелокальна суперпозиція когерентних станів розділених корелейованих фотонів. Кубіт – локалізована суперпозиція когерентних корельованих станів 0 та 1 субатомної частинки (електрона, атома). Квантова структура – локалізована суперпозиція n кубітів для паралельного виконання логічних операцій над 2^n станами. Множина станів квантової структури, що когерентно фігурує в локальному просторі кубітів, є той чарівний механізм, який за визначенням орієнтований на миттєве паралельне вирішення комбінаторних задач експоненційної складності.

3.2 Квантові архітектурні рішення

Математики і фізики мають повноту знання мікросвіту. Комп'ютерні інженери мають технології синтезу обчислювальних пристроїв в макросвіті. Потрібні треті особи, здатні поєднати спрощену теорію паралельних квантових механізмів із практикою класичних комп'ютерів, яких можна назвати фахівцями з квантової інженерії. Поляризація світла чи фотонів реалізує операції and, or. Немає простої операції в квантовому світі. Що можна зробити за допомогою двох інструкцій для створення квантових алгоритмів? Лише специфічні неуніверсальні алгоритми. Цього достатньо для підрахунку,

наприклад, подібності-відмінності. Логіки and-or достатньо для вирішення комбінаторних задач розпізнавання та прийняття рішень. Паралелізм квантових обчислень з урахуванням застосування послідовності квантових вентилів до структури пов'язаних кубітів визначається одночасним обчисленням станів виходів, як реакцію обробки всіх станів входів [11, 34]. Квантовий алгоритм виконується паралельно за тій самий приблизно константний час над усіма входними впливами, незалежно від значення $n = \{2, 10\}$ у функції $Y=2^n$, формує 4 або 1024 стану, з видачею функції ймовірнісного розподілу відповідей. Квантовий комп'ютер аналоговими сигналами запускає 2^n паралельні процеси рішення, кожен з яких обробляє один з можливих варіантів, після чого формується ймовірнісна суперпозиція відповідей, з яких вибирається одна. Для отримання стійкого результату роботи квантового комп'ютера необхідно багаторазово запуснути квантовий алгоритм на тому самому входному наборі даних, а потім усереднити результат. Імовірність не є сильною властивістю квантового комп'ютера, яке мало бути строго детермінованим, як у класичному, коли на ту саму послідовність або паралельність входних впливів алгоритм дає стійко стабільний результат. Властивість паралелізму, але детермінованого цілком можна реалізувати за допомогою надлишкового кодування і додаткової пам'яті в класичному комп'ютері.

Найбільш відомі сьогодні спеціальні алгоритми: факторизації Шора для розкладання чисел на прості множники, швидкий пошук у базі даних на основі повного перебору Гровера, мінімізації тестових перевірок для розпізнавання груп станів Дойча. На відміну від класичних, квантові комп'ютери, як і алгоритми, є універсальними. У цьому сучасні QC створюють такі проблеми, яким поки що немає ефективних рішень: 1) чутливість до QC-оточенню – декогеренція (150 мкс). Для корекції помилок потрібно створювати логічні кубіти; 2) нагромадження помилок при обчисленнях. Більше операцій – більше помилок – менший час когерентності кубітів. Потрібно прагнути до кількох операцій над структурами даних; 3) ініціалізація станів кубітів; 4)

створення багатобітних структур даних великої розмірності. Важливе значення має сусідство шости частинок для 1 кубіту; 5) ініціалізація, обчислення на гейтах, корекція, зчитування – все потрібно укласти під час (період) декогеренції.

Задача пошуку оптимального покриття є комбінаторною і тому може бути орієнтована на квантове рішення. Далі розглядається комбінаційна схема, яка є апаратною реалізацією квазіпаралельного пошуку покриття на класичному комп'ютері (рис. 3.2).

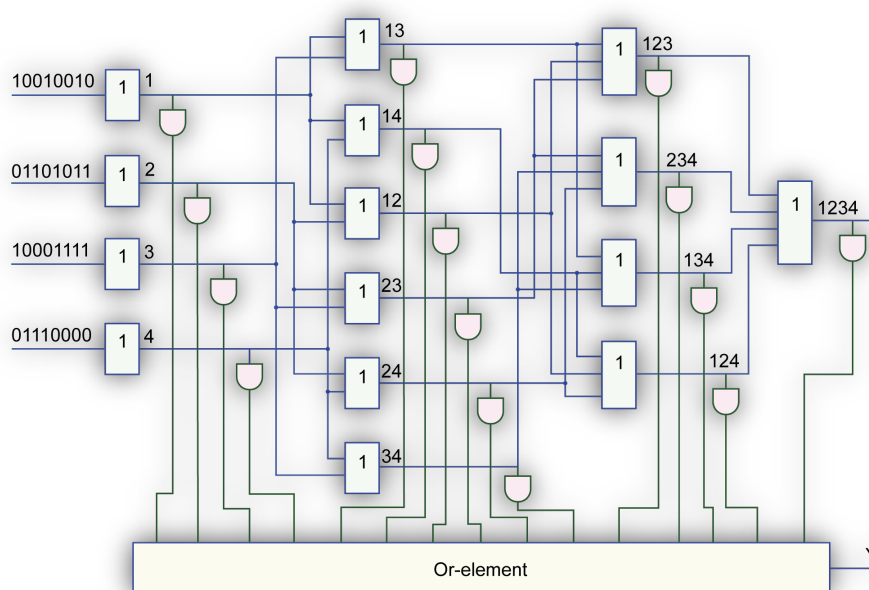


Рисунок 3.2 – Логіка для квазіпаралельного вирішення задачі покриття

Для цього використовується структура Хасе, яка дивним чином оптимізує структури даних для вирішення комбінаторних завдань. Тут вона формує кінцеву множину вертикальних рівнів, що йдуть ліворуч-право і задають поєднання входних векторів для отримання можливого рішення, в даному випадку: $C_n^m = (C_4^1, C_4^2, C_4^3, C_4^4)$. Рішення знайдено, якщо хоча б одне із зазначених п'ятнадцяти or-елементів формує одиничне покриття із поєднання входних векторів. Тоді and-gate при or-елементі, що реалізує поєднання, створює значення 1 вектор реєстри, показаному в нижній частині структури, що звертає в одиницю стан виходу Y. Часова вартість квазіпаралельного

рішення дорівню $\frac{1}{n} 2^n$ автоматним тактам. На квантовому комп'ютері всі рівні об'єднуються в один вертикальний, що означає створення паралельного алгоритму пошуку рішення на когерентних схемах, але вже в одному автоматному такті. Найпоспідовніше рішення – з'єднання всіх схем у ланцюжок, коли рішення виходить на тимчасовому інтервалі рівному $2^n - 1$ автоматних тактів. Тим не менш, Хасе структура створює оптимальний по апаратурі та часу алгоритм пошуку покриття на класичному комп'ютері.

Таким чином, квантовий паралелізм є функцією від квантової суперпозиції 2^n станів, які породжуються n когерентними кубітами. Природно, що на продуктивність QC впливає швидкість світла, яку можна вважати граничною продуктивністю обміну даними між компонентами квантових структур даних.

Квантовий комп'ютинг [12, 34] в даний час є не що інше, як аналогові структури даних та алгоритми (рис. 3.3).

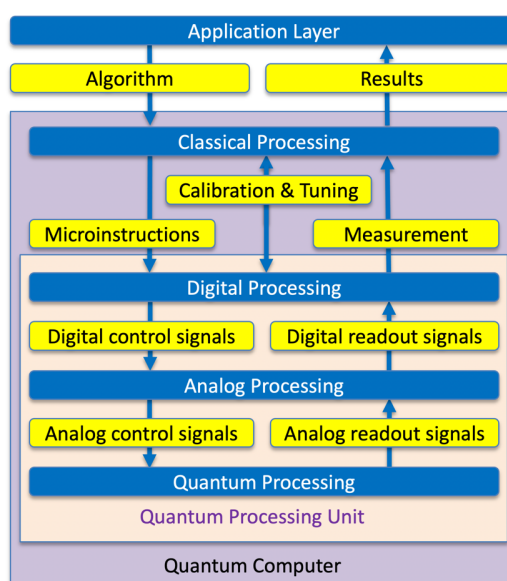


Рисунок 3.3 – Аналоговий квантовий комп'ютинг

Спектр частот, які можуть одночасно подаватися на групи кубітів, дають можливість паралельно обробляти дані, що не адресуються, за допомогою процедур суперпозиції (or) і зв'язаності (not). Створюється найтехнологічніша і найбажаніша address-free комп'ютерна пара Data – Transaction, паралелізм

якої визначається лише смугою пропускання актюаторних частот та розмірністю кубитної пам'яті. Такий DT-комп'ютинг орієнтований на обробку великих даних за місцем їх локації в паралельному режимі частотно-аналогової актюації обчислювальних процедур та алгоритмів.

Для порівняння: комбінаційні логічні схеми є прикладом паралельного виконання класичних обчислювальних процесів на входних впливах шляхом електропровідних з'єднань і одночасного поширення сигналів через функціональні елементи. Квантовий комп'ютер створює 1000 таких схем для 1000 входних впливів, в яких обчислювальні процеси виконуються одночасно, а структури даних одночасно контролюються спектром різних частот (фотонів). Скільки схем, стільки й даних. Це можливо, якщо технічно легко створити стільки схем, скільки є входів.

При цьому існує лише «хмара» кубітів в обмеженому просторі, керована фотонним світлом без будь-яких провідних з'єднань. Виникає computing everywhere, коли великі дані за місцем їхньої локації висвітлюються фотонами для миттєвого отримання результату квантових обчислень. Створюється кількість неймовірно простих схем, що дорівнює кількості даних для їхньої паралельної обробки.

3.3 Аналогово-цифровий комп'ютинг

Метрика класичного "Data-Address-Logic" комп'ютингу оперує адресно-цифровими структурами даних і послідовною логікою їх обробки. Адреса створює цифровізацію світобудови і водночас накладає заборону його паралелізм. Заборона усувається аналоговізацією сигналів у цифрових пристроях, що реалізується на основі провідних (гальванічних) з'єднань у регістрах, комбінаційних схемах, байтових структурах пам'яті. Проте в природі немає адрес. Матерія та енергія, простір і час розвивається за відкритими і ще не відкритими законами (космологічними, фізичними, математичними, хімічними). Природа суворо та глибоко аналогова та

паралельна. Адреса або цифра – штучний винахід людини, яке форматує весь світ детермінованими послідовними моделями процесів та явищ для їх зручного моніторингу та актуації людиною. Як наслідок, вчені створюють суворо послідовні за процесами комп'ютер та штучний інтелект, подібний до власного аналога непаралельного сприйняття світу та мислення (рис. 3.4).

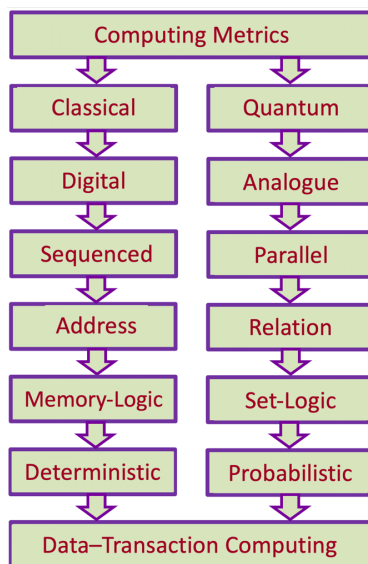


Рисунок 3.4 – Метрика відношень комп'ютингу

На технологічному рівні комп'ютингу працюють аналогові сигнали, які досить складно інтерпретуються як цифрові. Адресна ідентифікація означає послідовність обробки компонентів. Якщо немає адрес, а лише відносини, це призводить до паралельності обробки даних. У природі, як відомо, немає адрес. Цифровізація – прогрес людства, який, можливо, веде його хибним шляхом розвитку. Тут основою виступає пара Memory-Logic, як логіка послідовної обробки даних, що адресуються в пам'яті. Інший шлях комп'ютингу - множина, створювана відношенням Set-Logic, що є найкраще подання неадресованих даних для логіки їх паралельної обробки. На жаль, сучасний комп'ютер не вирішує завдань ефективного аналізу множини неадресованих елементів. На це і тільки на це (рішення комбінаторних задач) орієнтований квантовий комп'ютер, що має примітивами структур даних кубіти, як сукупність безадресних сигналів-носіїв, що суперпозиціонують. Локальна та алокальна суперпозиція є сутністю квантового світу, яка

переверне уявлення людства про Всесвіт. У мікросвіті ніхто і ніщо не заважає один одному, все існує одночасно у будь-якій точці простору. Природною платою за всі переваги квантового комп'ютера є імовірнісний характер результатів, що формуються, який, у міру його розвитку, прагнучемо до класичного детермінізму. Але складність технологічної реалізації квантових структур даних, а особливо логічних операцій, поки що ставить бар'єр на шляху його ринкового практичного використання. Людство витратило близько 100 років на технологічну сингулярність «дискретного» діода і транзистора, що лежить в основі всіх, по суті, аналогових, але формою цифрових, елементарних процесів у сучасному комп'ютері. Ринок отримав суворо послідовний механізм обчислення, що стає паралельним з допомогою технічних винаходів: розширення простору логічних змінних чи спеціалізованих елементів пам'яті. Важко відмовитися від адресованості даних та перейти до обробки множин на принципово нових матеріалах та підходах зберігання та обчислення. "Дані-Логіка" квантового комп'ютера істотно кращий варіант обробки інформації, де відсутні адреси. Там, де дані, має бути і логіка їхньої обробки (рис. 3.5).

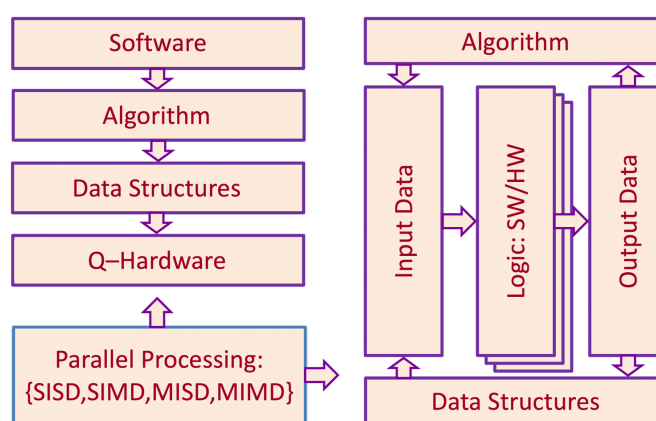


Рисунок 3.5 – Рівні та макроархітектура квантового комп'ютерингу

Інакше, дані повинні містити спосіб їхньої алгоритмічної обробки. Це – аксіома, зважаючи на те, що найпростіший і універсальний спосіб комп'ютерингу даних є звичайна транзакція (запис-зчитування). Відношення між структурами даних та алгоритмом є суть комп'ютерингу, який прагне у своїй

досконалості до простоти таблиць та and-or-логіки. Чим простіше ця пара, тим ефективніша і технологічніша HW/SW реалізація в метриці Performance, Yield & Time-to-Market. Практично важко також переконати людство в маленьких недоліках мікро-нано-електронної реалізації сучасних комбінаційних схем, що завдають маси проблем при виготовленні, тестуванні та експлуатації. Створити комп'ютер, який має лише пам'ять та єдину операцію транзакції (запис-зчитування) на ній, вже сьогодні стає можливим. Тоді слід говорити про найпростіший ефективний і паралельний DT-комп'ютер «Data-Transaction». Сьогодні вже можливо та дуже необхідно застосувати DT-комп'ютер для big data analytics.

3.4 Комп'ютинг як процес обміну даними

Комп'ютинг – транзакція (read-write операція) даних між об'єктами, суб'єктами або явищами. Детерміноване управління виникає, коли в соціальні процеси втручається людина, яка створила цифру. Поява цифри (адреси) як найпростішої моделі природи в мозку людини створила основу для послідовного детермінізму human-комп'ютера (рис. 3.6).

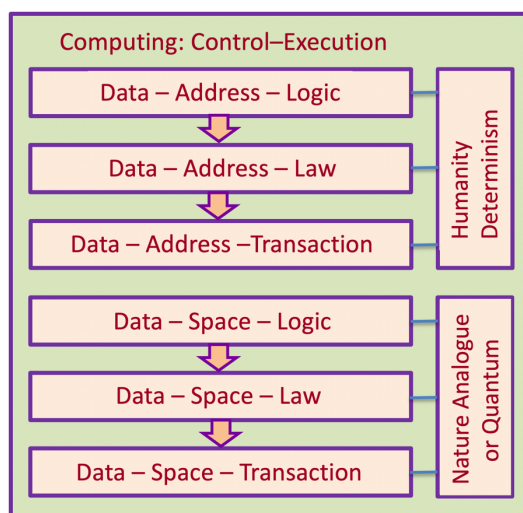


Рисунок 3.6 – Комп'ютинг – процес обміну даними

3.5 Структури комп'ютингу

Модель універсального комп'ютингу є вісьмома компонентами формують шаблон створення довільної замкнутої системи моніторингу-управління (рис. 3.7).

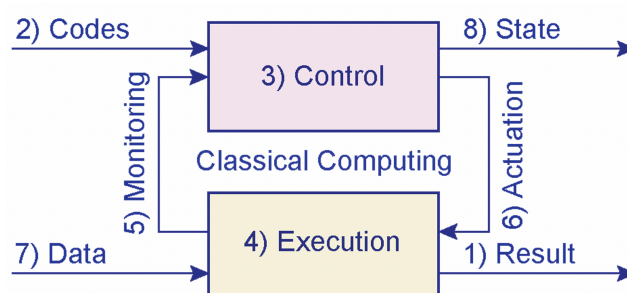


Рисунок 3.7 – Класична структура комп'ютингу

Використовуючи представлену структуру, нескладно створити модель квантового комп'ютингу, яка має відмінності у кількох компонентах (рис. 3.8). Тут з'являються аналогові актюаторні RF-сигнали, кбіти and Q-логіка для виконавчого механізму, де результат визначається кінцевим станом Q-states кубітів, а дані формуються за допомогою радіочастотного кодування кубітів.

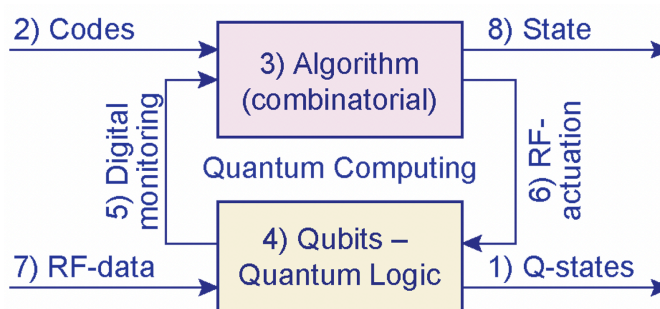


Рисунок 3.8 – Структура квантового комп'ютингу

Далі можна уявити радіо-комп'ютинг, який також не так суттєво відрізняється від квантового за умови, що кубіти є маленькі ведені радіоприймачі (рис. 3.9).

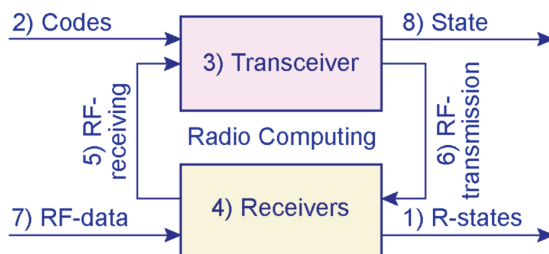


Рисунок 3.9 – Структура радіо-комп'ютингу

3.6 Висновки до розділу 3

Проаналізовано моделі, архітектури, структури квантового комп'ютингу. Проаналізовано задачу пошуку оптимального покриття, орієнтовану на квантове рішення. Розглянуто комбінаційна схема на основі структури Хасе для апаратної реалізації квазіпаралельного пошуку покриття на класичному комп'ютері. Розглянуто квантовий комп'ютинг як аналогові структури даних та алгоритми.

4 СИМУЛЯТОР СПРАВНОЇ ПОВЕДІНКИ НА ОСНОВІ КУБІТНО-ВЕКТОРНИХ МОДЕЛЕЙ

Розглядається приклад керованого пам'яттю (memory-driven) алгоритму для моделювання цифрових виробів на основі кубітно-векторної форми функціонального опису для значного вдосконалення продуктивності обчислювальних процесів шляхом паралельного виконання логічних операцій. Виконуються порівняльні оцінки використання кубітних моделей та методів.

4.1 Кубітно-векторні моделі справного моделювання схем

Вектор-кубіта – це компактна форма записів таблиці істинності у формі кортежів вихідних станів комбінаційного автомата, де кожен біт має адресу, визначену двійковим кодом або вхідною умовою. Основні логічні елементи (і, або, ні, хор) представлені векторами стану кубіта: 0001, 0111, 10, 0110.

З метою паралельного виконання логічних операцій над вектор-кубітами інтерес становить кодування примітивних символів алфавіту Кантора $\{0, 1\}$ унітарним двійковим і 01. Символ $X=\{0,1\}$, що залишився, виходить суперпозицією кодів примітивів $10 \cup 01=11$.

4.2 Симулятор справної поведінки

Поведінковий симулятор забезпечує простий і ефективний графічний інтерфейс для логічних елементів, порти для введення тестового набору та виведення результатів моделювання, а також сервіс для виправлення помилок і зберігання структури даних. Цікаво, що елементи тут оперують кубіт-векторами, які мають десятковий еквівалент, та не є прив'язаними до класичної логіки. Наприклад: $0001 = 1$, $0111 = 7$, $0110 = 6$, $1110 = 14$.

Приклад 4.1. Структура логічної ISCAS-схеми подана на рис. 4.1.

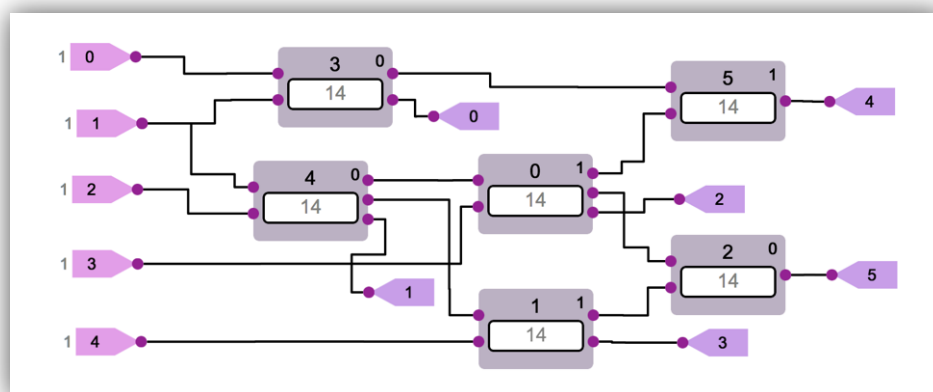


Рисунок 4.1 – Інтерфейс квантового симулятора

Зображення елемента містить інформацію про порядковий номер примітиву та тип функціональних можливостей, виражений десятковим числом, яке є згорткою векторної оболонки кубіта логічного елемента. Симулятор працює в покроковому режимі і моделює єдиний вектор, який вручну подаються на зовнішні входи схеми. Також є режим автоматичного комплексного тестування для отримання таблиці істинності всього цифрового пристрою, включаючи значення для всіх ліній схеми (вхідних, внутрішніх, вихідних).

На рис. 4.2 наведена структурна організація кубітних даних з метою моделювання справної поведінки цифрової логічної схеми на тестовому наборі 11010. Тут на вектор справного моделювання цифрового пристрою 11010010111 нанизуються кубітні вектори, що представляють елементарні функції комбінаційної схеми. Можна побачити, що вертикальне зміщення вектора кубіта відносно вектора горизонтального моделювання формує вихідний стан цифрової схеми. Така процедура зсуву регулюється єдиним універсальним рівнянням моделювання властивостей $M_i = Q_i[M(X_i)]$, в якому беруть участь горизонтальний вектор моделювання M , кубітні Q -вектори логіки та змінні зв'язки X , що формують адреси комірок кубітних векторів.

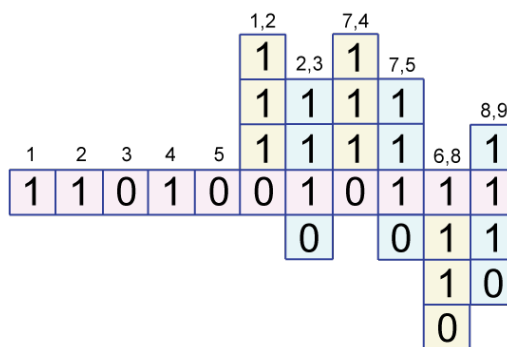


Рисунок 4.2 – Структури кубітних даних для логічної схеми

4.3 Верифікація програмного додатку

Для отримання статистичної інформації та верифікації програмного додатку Quantum Modeling наведено результати моделювання на 10 логічних схемах з бібліотеки ISCAS. Статистика порівняння часів Modeling and Simulation Time представлена на рис. 4.3.

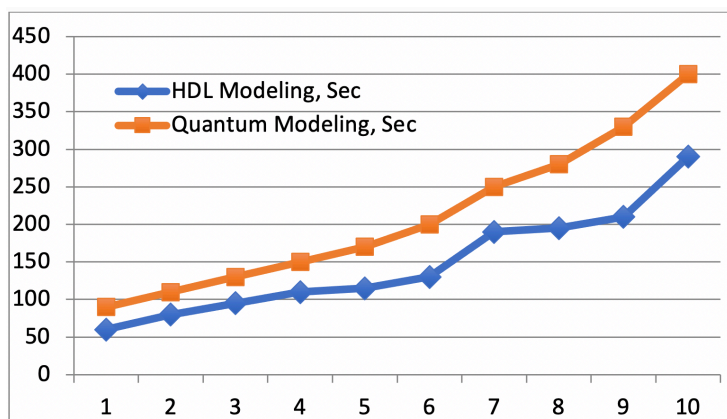


Рисунок 4.3 – Аналіз часу на синтез моделі та моделювання схеми:

1 – Adder SP; 2 – схема Шнайдера; 3 – схема C5; 4 – схема C17; 5 – схема RFO; 6 – схема MUX16; 7 – схема DFA; 8 – процесор Hasse; 9 – ланцюг DC4-16; 10 – ланцюг C432

Виконувалось порівняння часу синтезу схемної структури – Modeling Time – і час моделювання – Simulation Time. Порівняння відбувалося з Active HDL від компанії Aldec Inc., де інформація про модель схеми реалізується мовою опису апаратури VHDL.

Графік показує час моделювання та синтезу моделей логічних схем невеликої розмірності порівняно з аналізом та проектуванням схем на основі HDL-опису. Особливо це прийнятно та ергономічно у процесі навчання студентів технологіям проектування та верифікації цифрових систем та компонентів. Однак для великих промислових проектів доцільно використовувати мови опису апаратури.

Кубітні моделі, квантові методи та комбінаторні алгоритми інтегрально реалізовані для технічної діагностики цифрових пристроїв [15-34]. Це дозволяє значно скоротити час (до 25%) на синтез тестів, дедуктивне моделювання несправностей і коректної поведінки, виявляти дефектні стани шляхом впровадження інноваційної векторної структури даних кубіта для опису логічних компонентів (рис. 4.4).

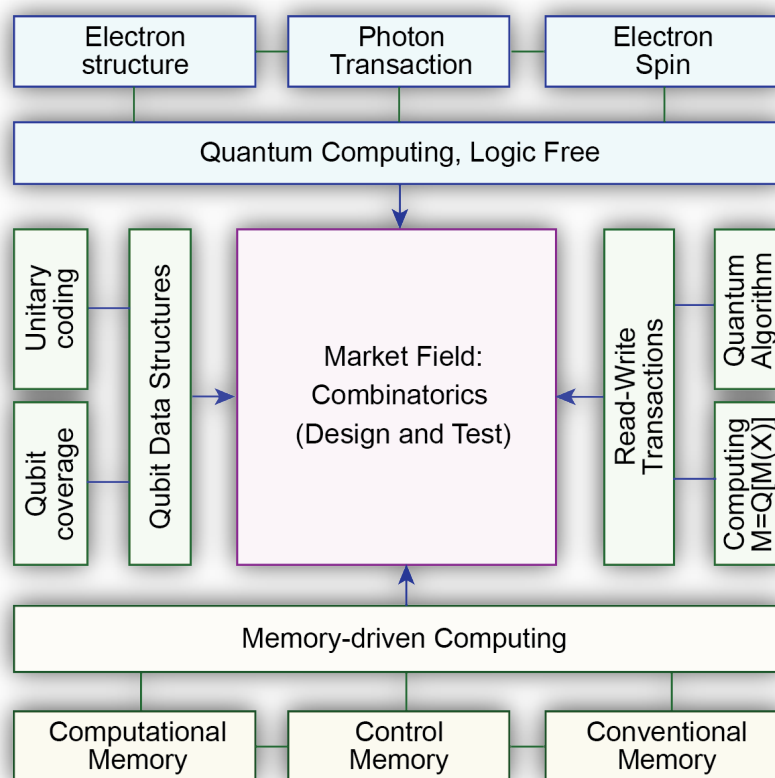


Рисунок 4.4 – Quantum-driven Design and Test Services

4.4 Висновки до розділу 4

Застосовано кубітно-векторні моделі опису функціональностей, що відрізняються від відомих таблиць істинності компактністю опису та технологічністю, для реалізації паралельних алгоритмів синтезу та аналізу цифрових пристроїв та SoC-компонентів. Наведено приклад алгоритму керованого пам'яттю (memory-driven) для моделювання цифрових виробів на основі кубітно-векторної форми опису функціональності. Це значно підвищує продуктивність обчислювального процесу за рахунок паралельного виконання логічних операцій. Порівняльна оцінка використання кубітних моделей і методів показує підвищення ефективності алгоритмів моделювання цифрових пристроїв відносно табличних.

ВИСНОВКИ

У магістерській роботі розглядаються питання, пов'язані зі створенням структур даних, методів, архітектур на основі кубітно-векторних моделей для синтезу та аналізу цифрових пристроїв та SoC-компонентів.

Мета дослідження – підвищення продуктивності обчислювальних процесів шляхом розробки кубітно-векторних моделі опису функціональностей, архітектур та алгоритмів квантового комп'ютингу на основі кубітних структур даних – досягається шляхом вирішення задач: проаналізовано сучасні технологічні тенденції; проаналізовано еволюційний шлях квантового комп'ютера: Memory–Address–Transaction→Electron–Address–Transaction→ Electron–Address–Quantaction (EAQ); виконано огляд метрик та структур даних для діагностичного експерименту; проаналізовано архітектури квантового комп'ютингу; виконано імплементацію кубітно-векторних моделей для симулятора справної поведінки.

В рамках тестування цифрових пристроїв реалізовано: 1) графічний інтерфейс проектування кубітних моделей цифрових пристроїв та компонентів, який дає змогу в режимі online коригувати помилки; 2) програмні модулі для qubit-driven моделювання, синтезу тестів та діагностування цифрових пристроїв та компонентів у режимах ручного та автоматичного введення вхідних тестових послідовностей, що можуть бути використані у навчальному процесі.

Таким чином, квантовий комп'ютер без технологічно складної логіки є перспективним для ринку за метрикою апаратної реалізації. Розглянуто детерміновану парадигму створення квантового комп'ютера шляхом використання фотонних транзакцій на електронах атома, що виключає використання квантової логіки.

Переваги практично спрямованого квантового комп'ютингу знаходять застосування в областях, пов'язаних з паралельними обчисленнями

паралельними обчисленнями, керованими пам'яттю (memory-driven), під час вирішення комбінаторних задач у тестуванні та діагностиці. Кубітно-векторні моделі для опису функцій відрізняються від відомих таблиць істинності своєю компактністю та технологічністю опису реалізацій алгоритмів для синтезу та аналізу цифрових пристроїв і компонентів SoC.

Результати відображено у тезах доповіді на науковій конференції [35] (додаток Б).

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Emil Leon Post. Introduction to a General Theory of Elementary Propositions. Published by: The Johns Hopkins University Press. American Journal of Mathematics, Vol. 43, No. 3 (Jul. 1921). P. 163-185.
2. Rosenbloom P.C. Post algebras. I. Postulates and general theory. Amer J. Math. 64 (1942). P. 167-188.
3. Z. Iftikhar, A. Anthore, A. K. Mitchell, F. D. Parmentier, U. Gennser, A. Ouerghi, A. Cavanna, C. Mora, P. Simon and F. Pierre. Tunable quantum criticality and super-ballistic transport in a "charge" Kondo circuit. 2018. Science 360 (6395), P. 1315-1320.
4. Shuo Sun, Hyochul Kim, Zhouchen Luo, Glenn S. Solomon, Edo Waks. A single-photon switch and transistor enabled by a solid-state quantum memory. Science, 06 Jul 2018: Vol. 361, Issue 6397. P. 57-60.
5. Distributed cloud, AI engineering, cybersecurity mesh and composable business drive some of the top trends for 2021. Режим доступу: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-strategic-technology-trends-for-2021/>
6. V. Hahanov et al., "Similarity–Difference Analysis and Matrix Fault Diagnosis of SoC-components," 2020 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2020, pp. 1-5, doi:10.1109/EWDTS50664.2020.9224740.
7. Hahanov, V. (2018), Cyber Physical Computing for IoT-driven Services, Springer International Publishing AG, New York, USA, Springer, Cham. 279 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-54825-8>
8. Physicists find quantum coherence and quantum entanglement are two sides of the same coin (2015, June 25). Режим доступу: <http://phys.org/news/2015-06-physicists-quantum-coherence-entanglement-sides.html>
9. Hamza Jnane, Brennan Undseth, Zhenyu Cai, Simon C. Benjamin, and Bálint Koczor. Multicore Quantum Computing. Phys. Rev. Applied 18, 044064 –

Published 26 October 2022. Режим доступу:
<https://doi.org/10.1103/PhysRevApplied.18.044064>

10. Mario Krenn, Marcus Huber, Robert Fickler, Radek Lapkiewicz, Sven Ramelow, Anton Zeilinger. (2013) Generation and Confirmation of a (100x100)-Dimensional Entangled Quantum System. Режим доступу:
<https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1306/1306.0096.pdf>

11. Як працюють квантові комп'ютери. Збираємо пазл (2019). Режим доступу: <https://habr.com/ru/post/480480/>

12. R. Versluis and C. Hagen, "Quantum computers scale up: Constructing a universal quantum computer with a large number of qubits will be hard but not impossible," in IEEE Spectrum, vol. 57, no. 4. P. 24-29, April 2020, doi: 10.1109/MSPEC.2020.9055969.

13. D. Ferrari, A. S. Cacciapuoti, M. Amoretti and M. Caleffi, "Compiler Design for Distributed Quantum Computing," in IEEE Transactions on Quantum Engineering, vol. 2, pp. 1-20, 2021, Art no. 4100720, doi: 10.1109/TQE.2021.3053921.

14. Gross D., Flammia S. N., Eisert J. Most Quantum States Are Too Entangled to Be Useful As Computational Resources // Physical Review Letters. 2009. T. 102, Issue 19. doi:10.1103/PhysRevLett.102.190501

15. A. Drozd, S. Antoshchuk, "New on-line testing methods for approximate data processing in the computing circuits," 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Prague, Czech Republic, 2011, pp. 291–294. DOI:10.1109/IDAACS.2011.6072759

16. V. I. Hahanov, S. V. Chumachenko, W. Gharibi and E. Litvinova, "Algebra-logical method for SOC embedded memory repair," 2008 15th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 2008, pp. 481-486.

17. H. Guo et al., "FPGA Implementation of VLC Communication Technology," 2017 31st International Conference on Advanced Information

Networking and Applications Workshops (WAINA), 2017, pp. 586-590, doi: 10.1109/WAINA.2017.54.

18. V. Hahanov et al., "Cyber physical system - smart cloud traffic control," Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS 2014), 2014, pp. 1-18, doi: 10.1109/EWDTS.2014.7027107.

19. Hahanov V., Litvinova E., Chumachenko S. (2017) Green Cyber-Physical Computing as Sustainable Development Model. In: Kharchenko V., Kondratenko Y., Kacprzyk J. (eds) Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation. Studies in Systems, Decision and Control, vol 105. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-55595-9_4

20. V.I. Hahanov, T. Bani Amer, S.V. Chumachenko, E.I. Litvinova, "Qubit technology for analysis and diagnosis of digital devices", In Electronic modeling, J 37 (3): 17-40, 2015.

21. V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova, M. Liubarskyi, A. Hahanova, "Quantum memory-driven computing for test synthesis", In IEEE East-West Design and Test Symposium, Novi Sad, Serbia. P. 123-128, 2017.

22. T. Zhong, J. M. Kindem, J. G. Bartholomew et al, "Nanophotonic rare-earth quantum memory with optically controlled retrieval", In Science, 29 Sep 2017, vol. 357, iss. 6358. P. 1392-1395.

23. J. Kim, H.-Ch. Lee, K.-H. Kim et al, "Photon-triggered nanowire transistors", In Nature Nanotechnology, no 12. P. 963–968, 2017.

24. A. Cho, "Vibrations used to talk to quantum circuits", In Science, vol. 359, iss. 6381. P. 1202-1203, 2018.

25. A. J. Daley, "Quantum computing and quantum simulation with group-II atoms", In Quantum Information Processing Journal, Dec. 10: 865, Springer US, 2011.

26. V. Hahanov et al., "Quantum Mem-Computing for Design and Test," In 2018 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-7, doi: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644256.

27. V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova and S. Chumachenko, "Qubit-driven Fault Simulation," In 2019 IEEE Latin American Test Symposium (LATS), Santiago, Chile, 2019. P. 1-7, doi: 10.1109/LATW.2019.8704583.
28. V. Hahanov, S. Chumachenko, E. Litvinova and H. Khakhanova, "Architectures of Quantum Memory-driven Computing," In 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2018. P. 1-7.
29. V. Hahanov, M. Liubarskyi, W. Gharibi, S. Chumachenko, E. Litvinova and I. Hahanov, "Test Synthesis for Logical X-functions," In 2018 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 2018. P. 1-9, doi: 10.1109/EWDTS.2018.8524863.
30. V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova, M. Liubarskyi and A. Hahanova, "Quantum memory-driven computing for test synthesis," In 2017 IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Novi Sad, 2017. P. 1-6.
31. Mohseni, M., Read, P., Neven, H. et al. Commercialize quantum technologies in five years. *Nature* 543, 171–174 (2017). <https://doi.org/10.1038/543171a>.
32. D. Pan, K. Li, D. Ruan, S. X. Ng and L. Hanzo, "Single-photon-memory two-step quantum secure direct communication relying on Einstein-Podolsky-Rosen pairs," in *IEEE Access*, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3006136.
33. Hiroyuki Sagawa, Nobuaki Yoshida. *Fundamentals of Quantum Information. Extended Edition.* World Scientific. October 2020. 312 p. <https://doi.org/10.1142/12016>
34. Хаханова, Г. В., Чумаченко С. В., Рахліс Д. Ю., Хаханов І. В., & В. І. Хаханов (2022). КВАНТОВІ ЦИФРО-АНАЛОГОВІ ОБЧИСЛЕННЯ. *Радіoeлектроніка, інформатика, управління*, (4), 40-60. Режим доступу: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-4-4>
35. Клейменов Н.М., Хаханов В.І. Кубітно-векторні моделі для синтезу та аналізу цифрових пристроїв та SoC-компонентів // II Міжнародна наукова конференція «Період трансформаційних процесів в світовій науці: задачі та виклики». 19.01.2024. м. Кривий Ріг, Україна. 2 с.