

КВАНТОВІ ЦИФРО-АНАЛОГОВІ ОБЧИСЛЕННЯ

Хаханова Г. В. – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Чумаченко С. В. – д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Рахліс Д. Ю. – канд. техн. наук, доцент кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Хаханов І. В. – аспірант кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

Хаханов В. І. – д-р техн. наук, професор кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки, Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна.

АНОТАЦІЯ

Актуальність. Природа є відношення між процесами та явищами. Ніщо не існує у Всесвіті без відношень. Комп'ютер – транзакції відношень між даними за допомогою механізмів управління та виконання. Квантові відношення є суперпозиція частинок та їх станів. Суперпозиція та сплутаність – еквівалентні поняття. Сплутаність – нелокальна суперпозиція детермінованих станів. Квантовий комп'ютер – безумовні транзакції відношень між кубітними даними. Квантовий комп'ютер – аналоговий пристрій для паралельного вирішення комбінаторних задач. Практично орієнтовані визначення понять квантового комп'ютера є шлях до розробки масштабованих квантових паралельних алгоритмів для розв'язання комбінаторних задач. Будь-який алгоритм можна звести до послідовності операцій без умов, бо будь-яка таблиця істинності є сукупність повної системи умов-станів. Будь-яку послідовність дій завжди можна звести до однієї паралельної операції. Умови та послідовності виникають лише у випадку, коли розробник бажає скористатися раніше створеними примітивами-конструкціями для побудови завжди неоптимального обчислювача. Детермінована парадигма створення квантового комп'ютера шляхом використання фотонних транзакцій на електронах атома може виключати використання квантової логіки. Еволюційний шлях квантового комп'ютерингу з класичного: «пам'ять-адреса-транзакція» (memory-address-transaction, MAT) → «електрон-адреса-транзакція» (electron-address-transaction) → «електрон-адреса-квантація» (electron-address-quantaction, EAQ) → стан-суперпозиція-логіка (state-superposition-logic). Точка зустрічі класичного та квантового комп'ютерингу – фотонні транзакції на структурі електронів. Все, що обчислюється на квантовому комп'ютері, можна паралельно прораховувати на класичному за рахунок надмірності пам'яті. Наводиться приклад – алгоритм на основі пам'яті (memory-driven) для моделювання цифрових виробів на основі кубітно-векторних форм опису функціональностей для суттєвого підвищення продуктивності обчислювальних процесів шляхом паралельного виконання логічних операцій.

Мета. Моделювання ісправної поведінки SoC компонентів на основі векторного подання логіки, формування тригерного розвитку комп'ютерингу на основі суперпозиції класичного, квантового та аналогового обчислювального процесу, який у своєму розвитку має спиратися на технологічні кубітні, табличні та векторні структури даних для паралельного вирішення комбінаторних задач.

Метод. МАТ-комп'ютеринг реалізує будь-які алгоритми за рахунок транзакцій (читання-запис) на пам'яті. Кубітно-векторні моделі опису функціональностей, які відрізняються від відомих таблиць істинності компактністю опису та технологічністю для реалізації паралельних алгоритмів синтезу та аналізу цифрових пристроїв та SoC-компонентів.

Результати. 1) Вперше запропоновано метрику технологічних структур даних, орієнтована на паралельний пошук несправностей у цифрових системах на основі використання двох логічних векторних операцій. 2) Дістала подальшого розвитку метрика відношень між окремими компонентами QC (relations), що дозволяє організувати квантовий детермінований комп'ютеринг. 3) Вперше запропоновано квантові архітектурні рішення, що дозволяють розв'язувати задачі покриття у квазіпаралельному режимі. 4) Отримали подальший розвиток архітектурні рішення на основі аналого-цифрового комп'ютерингу, що можуть бути використані для паралельного розв'язання задач аналізу цифрових систем. 5) Запропоновано векторно-кубітні структури даних логіки, що дозволяють квазіпаралельно моделювати цифрові схеми.

Висновки. Реалізовано кубітні моделі, квантові методи та комбінаторні алгоритми технічного діагностування цифрових пристроїв, які дають можливість суттєво (до 25 %) зменшити час синтезу тестів, дедуктивного моделювання несправностей та справної поведінки, пошуку дефектних станів за рахунок впровадження інноваційної ідеї використання кубітно-векторних структур даних для опису логічних компонентів. Порівняльні оцінки використання кубітних моделей та методів показують підвищення ефективності алгоритмів моделювання цифрових пристроїв порівняно з табличними. Інтегрально представлена суперпозиція класичного, квантового та аналогового комп'ютерингу, що дає можливість знаходити найкращі розв'язки для розпізнавання та прийняття рішень.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: квантовий цифро-аналоговий комп'ютеринг, квантовий детермінізм, суперпозиція, сплутаність, пам'ять-адреса-транзакція, електрон-адреса-квантація, квантові транзакції на структурі електронів, кубітні вектори, матричні структури даних, цифрові системи на кристалах.

АБРЕВІАТУРИ

AI – artificial intelligence (штучний інтелект);

ASIC – інтегральна схема спеціального призначення;

DT – Data-Transaction (дані-транзакція);

FPGA – програмована користувачем вентильна матриця;

FSM – finite state machine (кінцевий автомат);

HW/SW реалізація – апаратно-програмна реалізація;

MAC – контроль доступу до медіа;
MAT – Memory-Address-Transaction (Пам'ять-Адреса-Транзакція);
ML – machine learning (машинне навчання);
SOC – system on chip (система на кристалі);
QC – quantum computing (квантовий комп'ютинг);
QPU – quantum processing unit (блок квантової обробки);
VLCI – схеми надвеликого рівня інтеграції;
UWB technology – бездротова технологія зв'язку на базі надширококутних сигналів;
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
РЧ сигнали – радіочастотні сигнали;
ЦАП – цифрово-аналоговий перетворювач.

НОМЕНКЛАТУРА

a – асерція;
c – швидкість;
D – різниця;
e – енергія;
L – логіка;
m – маса;
M – пам'ять;
n – розрядність;
N – число станів;
R – вектор тестування;
S – простір;
T – година.

ВСТУП

Вчені, що створюють квантовий комп'ютер, йдуть шляхом, закладеним Емілем Леоном Постом (1897-1954) рівно 100 років тому. Основний практичний постулат Посту полягає в тому, що неможливо створити обчислювач без функціонально повного базису примітивних логічних функцій, наприклад, без *and-not*, *or-not*, *and-or-not*, *1-xor-and* [1–3]. Це дійсно так, якщо виходити з таблиць істинності примітивних елементів, як базових цеглинок при синтезі складних схем. Проте ця аксіома є коректною доти, доки не знайдені простіші операції-транзакції, завдяки яким можна описати або синтезувати елементарну логіку Поста, що створює функціонально повні та мінімальні базиси логічних функцій, а також будь-які інші комбінаційні структури довільної складності. Такими примітивами є лише дві функції-транзакції: запису та зчитування, через які можна записувати/синтезувати абсолютно будь-який, скільки завгодно складний, обчислювальний процес. Більш того, насправді слід говорити лише про одну операцію-транзакцію «запис-зчитування». Інакше, щоб записати кудись, треба зчитати звідкись. Це означає – існує більш технологічна та примітивніша альтернатива логіці Поста та класичному квантовому комп'ютингу, де останній поки що йде шляхом *quantum-mechanic-driven* синтезу керованих таблиць істинності, як базових елементів [3, 4]. При цьому вчені вважають, що неможливо створити квантовий обчислювач без таких математичних таблиць-матриць, для яких потрібен технологіч-

но складний кріогенний механізм охолодження силіконового кристала до рівня, близького абсолютному нулю. Сьогодні найзатребуванішими темами на ринку технологій для практики, науки та освіти є [5]:

- 1) квантовий комп'ютинг (QC);
- 2) кіберсоціальні обчислення (cyber social computing);
- 3) обчислення штучного інтелекту (AI computing).

Перший має вирішити всі найскладніші комбінаторні проблеми людства. Другий – усунути небезпеку ліквідації людства дедалі аморальнішою політичною елітою. Третій – створити “вільні від людини” (human-free) підходи сталого саморозвитку кіберфізичних механізмів та інфраструктур. При цьому комп'ютинг означає онлайн прийняття цифрових рішень у відповідь на точний вичерпний метричний моніторинг процесу або явища.

Згадані тренди корелюються з напрямками розвитку технологій компанії Gartner, а саме про комбінаторні інновації, які створюють нові властивості кіберфізичних систем, спрямовані на підвищення якості життя громадян та збереження екології планети. Першим трендом є глибока орієнтованість на потреби людей (people centricity), що включає розвиток інтернету етичної поведінки (internet of behaviors), узагальнення досвіду у різних сферах (total experience strategy) та впровадження в управління людиною, підвищення конфіденційності даних при обробці (privacy-enhancing computing). Другий тренд – незалежність від місця розташування (location indendence) – представлений розподіленими хмарними сервісами (distributed cloud), операційними діями, інваріантними до геолокації суб'єктів (anywhere operation), масштабованими мережами кібербезпеки процесів та явищ (cybersecurity mesh). Третій – стійкі поставки (resilient delivery) в умовах світової нестабільності – формується інтелектуальним композитним та гнучким бізнесом (intelligent composable business), надійними засобами AI, гіперавтоматизацією всього, що можна автоматизувати в організації. Управління, операції, моніторинг, що нелокально виконуються в онлайн режимі, сьогодні є життєво важливими принципами виживання людства.

Об'єкт дослідження – класичний, квантовий та аналоговий комп'ютинг.

Предмет дослідження – кубітні структури даних для опису цифрових пристроїв та компонентів, що відрізняються компактністю та високим паралелізмом їх обробки.

Мета дослідження – моделювання ісправної поведінки SoC компонентів на основі векторного подання логіки, формування тригерного розвитку комп'ютингу на основі суперпозиції класичного, квантового та аналогового обчислювального процесів, які у своєму розвитку мають спиратися на технологічні кубітні, табличні та векторні структури даних для паралельного розв'язання комбінаторних задач.

1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Нехай задано універсальне характеристичне рівняння моделювання $M_i = Q_i[M(X_i)]$, в якому беруть участь горизонтальний вектор моделювання M , кубітні Q -вектори логіки, а також змінні зв'язки X , що створюють адреси осередків кубітних векторів.

Тоді задачі полягають у:

1) формуванні метрики технологічних структур даних для кожного несправного стану L на основі вектор-стовпців для розпізнавання N дефектних об'єктів;

2) розробці метрики відношень між окремими компонентами QC (relations);

3) пошуку квантових архітектурних рішень для квазіпаралельного розв'язання задачі покриття;

4) пошук архітектурних рішень на основі аналого-цифрового комп'ютерингу;

5) векторно-кубітні структури даних та моделювання цифрових схем.

2 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Унітарне кодування забезпечує паралельне виконання регістрових логічних операцій на класичному комп'ютері [6]. Квантовий комп'ютеринг [7] в даний час є не що інше, як аналогові структури даних та алгоритми (рис. 1).



Рисунок 1 – Аналоговий квантовий комп'ютеринг

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 DT, паралелізм якої визначається лише смугою пропускання актуаторних частот та розмірністю кубітної пам'яті. Такий DT-комп'ютеринг орієнтований на обробку великих даних за місцем їхньої локації в паралельному режимі частотно-аналогової актуації обчислювальних процедур та алгоритмів. Для порівняння комбінаційна логічна схема є прикла-

дом паралельного виконання класичного обчислювального процесу на одному вхідному впливі шляхом одночасного поширення сигналів по гальванічним провідним з'єднанням і функціональним елементам. Квантовий комп'ютеринг створює тисячу таких схем для тисячі вхідних впливів, де одночасно виконуються обчислювальні процеси, в яких структури даних паралельно актуються спектром різних частот (фотонів). Скільки даних – стільки й схем. Це можливо, коли технологічно просто створити кількість схем, що дорівнює кількості вхідних даних. При цьому існує тільки «хмара» кубітів в обмеженому просторі, кероване фотонним світлом без провідних з'єднань. Виникає «computing everywhere», коли великі дані за місцем їх локації висвітлюються фотонами для миттєвого отримання результату квантових обчислень. Створюється кількість неймовірно простих схем, що дорівнює кількості даних для їх паралельної обробки.

Аналітична публікація [8] цікава своїм системно-метричним підходом до доступного розуміння квантового комп'ютерингу, що втиснуте у кілька сторінок тексту. Виконано порівняння класичного та квантового механізмів управління та виконання, структур даних та алгоритмів. Показано значення аналогових сигналів для паралельного управління та моніторингу масивів кубітних даних, що не мають адресу. Представлені шляхи розвитку квантового комп'ютерингу на основі об'єднання спільних зусиль спеціалістів різного профілю, технологічних компаній та розвинених країн.

Деякі дослідники висловлюють думку, що для квантових комп'ютерів сплутаність є, навпаки, небажаним побічним фактором [9].

У роботах [10–28] інтегрально реалізовані кубітні моделі, квантові методи та комбінаторні алгоритми технічного діагностування цифрових пристроїв. Робота [10] присвячена проблемам оперативного тестування обчислювальних схем, що оперують наближеними даними. Розробка оперативного тестування проходила під дією моделі точних даних, що визначило призначення та надійність її методу лише для випадку точних даних. Особливості наближених обчислень роблять похибку здебільшого несуттєвою. В [12] пропонується фундаментальний дизайн і реалізація передачі даних VLC на рівні MAC на основі FPGA, що включає базовий дослідницький контекст, дизайн і реалізацію рівня MAC UWB, а також результати моделювання та перевірки цієї системи. У [17] демонструється високоточна нанофотонна квантова пам'ять на основі мезоскопічного ансамблю неодиму, сполученого з фотонним кристалом. Нанорезонатор забезпечує спінову поляризацію > 95% для ефективної ініціалізації пам'яті гребінки атомних частот та вибіркового зчитування часових інтервалів за рахунок покращеного оптичного штарковського зсуву частот гребінки. Запропонована твердотільна пам'ять інтегрується з іншими джерелами та детекторами фотонів розміром із чіп для мультиплексної квантової та класичної обробки інформації в мережевих вузлах. Фо-

тонно-керовані транзистори відкривають нові можливості для багатофункціональних пристроїв, таких як програмовані логічні елементи та надчутливі фотодетектори. У [18] автори показують керовані фотонами транзистори з нанодотом (NW), керовані фотонами логічні вентиля NW і одиночну систему фотодетектування NW. Ниткоподібний нанокристал (ННК) синтезуються із довгими сегментами кристалічного кремнію (CSi), з'єднаними короткими сегментами пористого кремнію (PSi). Використовуючи локалізовані лазери накачування, автори демонструють логічні вентиля, що управляються фотонами, включаючи вентиля I, АБО та I-НЕ. У [19] підкреслюються переваги дисципліни квантової акустики, що зароджується, яка може струсити розвиток квантових комп'ютерів. Як обгрунтовано в [26], спільнота фахівців з квантових обчислень спрямовує більшу частину своїх зусиль на створення досконалої машини: цифрового квантового комп'ютера, який не боїться шуму та помилок і який, в принципі, може бути застосований до будь-якої проблеми. Теоретично така машина, для якої будуть потрібні великі процесори, що містять множини квантових бітів або кубітів, повинна бути здатна виконувати обчислення швидше, ніж звичайний комп'ютер.

Розробка квантового комп'ютера. Функції-модулі (IBM, Google, Intel), необхідні для квантового комп'ютера, можна розділити на п'ять компонентів, представлених концептуально п'ятьма рівнями управління. 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 наведених нижче шарів. Рівні цифрової, аналогової та квантової обробки, які складають блок квантової обробки (QPU).

Між трьома рівнями QPU існує багатофункціональний зв'язок. Тому конструкція кожного з них залежить від двох інших. Рівень цифрової обробки перетворює мікрокоманди у відповідні аналогові імпульсні сигнали для управління кубітами, як квантовими логічними вентилями. Самі імпульси генеруються лише на рівні аналогової обробки QPU. Цифровий рівень також передає результати вимірювань квантового обчислення на 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 сигна-

лів для актуації кубітів на наступному шарі. Сигнали представлені рівнями напруги, часовими 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 сукупності сигналів для одночасної (послідовної) актуації різних кубітів має бути синхронізовано в 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 кубіт, 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 побудувати мільйон окремих ліній для сигналів управління, приєднаних до кожного кубіту. Раціональним розв'язком з управління кубітами є комбінація просторового та частотного мультиплексування. Кубіти об'єднуються у групи, де кожна з них прикріплена до загальної сигнальної лінії. Кожен кубіт у групі налаштований на 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 на основі комбінації частотного та просторового мультиплексування пов'язане з тим, що кожен кубіт у групі налаштовується на власну частоту. У цьому випадку актуаторний аналоговий сигнал може маніпулювати цільовим кубітом в одній підмножині або набором одночастотних кубітів у різних групах. За таке мультиплексування доводиться платити неточністю у керуванні кубітами. У сучасних системах шари цифрової та аналогової обробки працюють за кімнатною температурою. Шар, що містить кубіти, повинен мати близьку температуру до абсолютного нуля. Загальний розв'язок у майбутньому – інтегрування всіх трьох шарів у криогенний чіп. Існуючі QC на надпровідних матеріалах містять кілька десятків кубітів і здатні виконувати від десятків до сотень когерентних квантових 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 для виконання алгоритму. Потім обчислення будуть поглинені помилками. Таким чином, QC з кількома сотнями кубітів буде використовуватися як прискорювач для класичних суперкомп'ютерів. Комбінаторні задачі, для яких квантовий комп'ютер орієнтований, вирушають із суперкомп'ютера на квантовий, а результати потім повертаються на перший для пода-

льшої обробки. Квантовий комп'ютер діятиме як графічний процесор, вирішуючи паралельно конкретні задачі матричних транзакцій та цифрової обробки сигналів. Сучасні технології виготовлення QC не спроможні виробляти повністю однорідні кубіти. Отже, різні кубіти мають трохи різні властивості. Неоднорідність властивостей кубітів вимагає адаптації аналогового рівня QPU до конкретних реалізацій, що ускладнює масштабування процесу побудови QC. Мультиплексування для великої кількості кубітів буде запроваджено через 5–10 років, що дозволить ввести механізми виправлення помилок шляхом додавання 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 пропускну здатністю. Фізична основа експериментальних кубітів сьогодні представлена надпровідними ланцюгами, спіновими кубітами, фотонними системами, іонними пастками, центрами вакансій азоту. 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 вимірів 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 кілька кілогерц. Для мільйонів кубітів загальна цифрова пропускна здатність стає рівною кілька 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 має бути схема попередньої обробки та мультиплексування вимірювань та виправлення помилок. При цьому слід зазначити, що не всі виміри 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 вимагають 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 наступних 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 необхідно об'єднання зусиль розробників та інженерів-технологів з виробництва мікросхем, фахівців з криогенного контролю, експертів з обробки великих даних та створення квантових алгоритмів у межах нової галузі – квантової інженерії. Потрібні об'єднані зусилля академічних та дослідницьких інститутів, комерційних підприємств та державних організацій, для створення ринкових квантових комп'ютерів, що надаватимуть великі обчислювальні потужності для майбутнього.

Отже, що первинне із двох комп'ютингів? Цифровий комп'ютинг з'явився 40 тисяч років тому з першим малюнком мамонта на стіні в печері. Квантовий комп'ютинг існує з моменту народження Всесвіту або завжди.

3 МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

1. Розглянемо універсальну метрику процесів та явищ. Метрика – сукупність специфікованих параметрів для вимірювання відстані між процесами та явищами. Результат виміру формує дві взаємодоповнюючі оцінки: подібність S (similarity) та відмінність D (difference), які взаємодіють між собою та з (X, Y) -об'єктами за правилом виконання векторних логічних операцій: $S \oplus D = X \vee Y = \overline{X \wedge Y}$ [29]. Дане рівняння визначає спосіб вимірювання відношень (подібність-відмінність) між процесами та явищами в математичному, фізичному, соціальному чи віртуальному просторі. Далі розглядаються вектори двійкових параметрів, що кодують процес або явище. Тут подібність двох об'єктів визначається за допомогою андлогіки, застосованої до пари векторів розмірністю n :

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

Відмінність формується завдяки хог-функції, що створює відстань по Хемінгу:

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

Нормовані відношення між двійковими чи числовими $S(X_i, Y_i)$ векторами визначаються такими виразами:

$$D^n = \frac{D}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i \oplus Y_i)}{\sum_{i=1}^n (X_i \vee Y_i)};$$
$$S^n = \frac{S}{N} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i \wedge Y_i)}{\sum_{i=1}^n (X_i \vee Y_i)} \approx S(X_i, Y_i) =$$
$$= \frac{\sum_{i=1}^n [\min_{i=1, n} (X_i, Y_i)]}{\sum_{i=1}^n [\max_{i=1, n} (X_i, Y_i)]}.$$

Тут знаменник визначення норми обчислюється як сума всіх значущих ненульових розрядів у двох векторах:

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

Оцінка подібності, що дорівнює одиниці, формує сукупність еквівалентних між собою об'єктів у запропонованій метриці. Для технічного діагностування еквівалентність означає наявність невиразних на тесті несправностей, що призводить до необхідності збільшувати потужність тесту чи кількість ліній спостереження.

Всесвіт. Метрика будь-якого процесу чи явища у Всесвіті визначається двома парами відношень взаємодіючих компонентів: простір-час, матерія-енергія. По матерії-енергії відома взаємодія $E = m \times c^2$. Аналогічне відношення має виконуватися і для простору-часу $S = t \times c^2$. Простіше рівняння $S + T = 1$ формує універсальну одиницю простору-часу в адитивному вигляді. Це означає, що час не є константою, він змінюється у фазовому циклі розвитку Всесвіту і є, як і простір, 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 [6].

Діагностування. Метрика діагностування – сукупність специфікованих властивостей для попарного розрізнення всіх технічних станів об'єкта. Діагностування – метричне визначення технічного стану об'єкта. Контроль – метричне розрізнення справного та множини несправних станів. Пошук дефекту – визначення його місця, причини та виду. Далі розглядається двовимірний просторово-часова метрика діагностування цифрової структури. Можна сказати, що діагностування є процес визначення місця, причини та виду дефекту. Якщо коротше, це процес ідентифікації несправного стану, для якого у цифровому світі є двійково-десяткові коди, де діє правило: для розпізнавання-ідентифікації N станів необхідно мати розрядність коду $n = \log_2 N$. Відношення між числом несправних станів N та розмірністю коду n можна виразити також за допомогою відомої формули: $N = 2^n$. При цьому число n можна отримати, виходячи з адитивності даної оцінки, яка залежить від довжини тесту t і числа ліній спостереження a , які є своєрідними точками контролю, що у сукупності створює потужність двійкового вектора для ідентифікації несправних станів $n = t + m$. Наприклад, тест довжиною $t=2$, де кожен набір спостерігається за трьома точками контролю $m=3$, що формують координату стовпця матриці діагностування розмірністю $t+m$ може розрізнити 32 дефекти. З іншого боку, розмірність добутку $n = t \times a$, при $n=8$, ідентифікації несправного стану можна сформулювати чотирима варіантами табличних координат, як показано на рис. 2.

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 – Приклад двовимірної метрики тест-асерції

Таким чином, структури даних для організації діагностичного експерименту в ідеальному випадку визначаються двовимірною таблицею або матрицею, що задається в метриці тест-асерції (test-assertion або точки контролю). Така метрика формує для кожного несправного стану вектор-стовпець, сумарна потужність розрядів якого не повинна бути меншою за n для розпізнавання N дефектних об'єктів. При цьому слід мати на увазі, що за наявності однієї асерції (лінії спостереження) таблиця несправностей оперує однією двійковою координатою, що створює прості вектор-стовпці з n координат (за кількістю тестових наборів) для розпізнавання N дефектних станів. Природно, що розмірність тесту може бути зменшена в межах до одного набору (не до 0 наборів). Тоді таблиця ідеально перетворюється на рядок. Платою за це, відповідно до рівності $n = t \times a$, де $t=1$, є збільшення потужності асерції за правилом: $a = \frac{n}{t}$, у цьому випадку

$$a = \frac{n}{1} = n.$$

Оскільки асерції або зовнішні лінії (контакти) спостереження – достатньо дороге задоволення, особливо у сучасних SoC, VLSI or ASIC, то компромісним рішенням може бути мінімальна довжина тесту і розумна кількість ліній спостереження, що можливе лише в тому випадку, коли обчислювальний пристрій може бути представлений сукупністю функціональних модулів, оточених доступними для тестування, спостереження та діагностування вхідними та вихідними лініями. У цьому полягає суть стандартів IEEE 1500, 1532, 1149, 1687, орієнтованих на кристали, цифрові плати та системи. Одна з цілей IEEE стандартів – формування тестопридатної інфраструктури цифрового виробу для підвищення якості, надійності, ремонтпридатності, керованості, спостережуваності, відмовостійкості.

Методологічно, найзручнішими для людини та машини структурами даних є таблиці (матриці) несправностей. З них можна отримати дерева пошуку дефектів. Але дерева, як структури даних, спрямовані на суттєві часові витрати, пов'язані з великою кількістю елементарних перевірок в алгоритмах умовного діагностування. У той час, як весь світ йде шляхом зведення діагностичного експерименту до одного автоматного такту

виконання безумовного діагностування, нехай 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). Для аналізу таблиць несправностей існують алгоритм аналізу стовпців (метод наближення), а також алгоритм аналізу рядків (метод виключення). Останній зводиться до виконання одного рядка коду, який визначає несправний стан шляхом виконання двох паралельних логічних операцій and-or над одиничними та нульовими рядками таблиці (рис. 3).

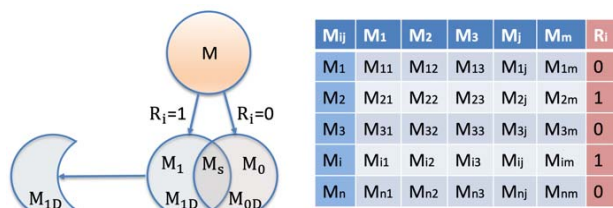


Рисунок 3 – Пошук дефектних станів стовпців за R-вектором тестування

Формули визначення дефектних станів по таблиці несправностей мають такий вигляд:

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

Далі представлена таблиця, за якою знайдені кратні дефекти, зазначені в останньому рядку, на основі наведених вище формул (рис. 4).

$\backslash F$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	R
1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
2	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
3	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1
4	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1
6	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0
7	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1
8	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0
R=1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
R=0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	
L_m	0	0	0	0	0	0	1	1	0	

Рисунок 4 – Таблиця пошуку кратних дефектів

Процедура паралельного пошуку множини кратних дефектів дає результат $L = \{7,8\}$, ідентифікований двома одиницями в останньому рядку. Слід зазначити, що з таблиці несправностей можна легко перейти до ML-таблиці істинності, а далі вирішувати питання ідентифікації несправних станів методами машинного навчання, що дуже цікаво, особливо для складних цифрових структур. Крім того, таблиця несправнос-

тей як матрична форма є технологічно зручними структурами даних для еквівалентування дефектів з метою синтезу дерева пошуку дефектів. Враховуючи, що класи еквівалентностей, як правило, будуть з неоднаковою потужністю, то розумне додавання додаткових тестів або асерційних точок у вузькі місця цифрової структури може привести дерево до виваженого вигляду.

Таким чином, озброївшись аксіомою збереження добутку $n = t \times a$ для дискретної структури, що підлягає діагностуванню, в матриці тест-асерції, можна будувати матриці, орієнтовані на асерції та мінімальний тест (аж до одиничного), або альтернативне діагностування, де число асерцій дорівнює 1.

Продовженням мультиплікативної метрики діагностування може бути розмірність обчислювальної структури, що пов'язана з таблицею істинності. Тут вступають у відношення компоненти: логіка-пам'ять (L, M), що оперують параметрами їх потужностей у межах оцінки: $n = L \times M$, де n сприймається як інтегральний обмежувач просторово-часових ресурсів для варіантів реалізації алгоритму. Простір асоціюється із розмірністю рядків таблиці істинності.

Проектування: структури даних та алгоритми, простір та час. Таблиця істинності – ідеальна форма структур даних організації спеціалізованих обчислювачів (ASIC). Таблиця істинності є цифровий автомат (FSM) (умовно) з одним станом. Тригер – елементарний автомат (пам'ять) із двома станами. Таблиця переходів – формою не відрізняється від таблиці істинності. Обидві реалізують сукупність умов (if – then) для пошуку чи визначення розв'язку. Фактично, таблиця переходів є скорочена чи неповністю певна таблиця істинності. Поєднання умов if – then створює метрику суттєвих параметрів для форматування всіх рядків-умов у межах таблиці істинності. Можна просто автоматизувати процес синтезу таблиці істинності: якщо параметр вхідної умови відсутня в метриці, то він додається у вектор змінних. При цьому всі інші рядки таблиці істинності, де цього параметра не було, міститимуть на його координаті символ невизначеності або інваріантності. Така процедура ефективно працюватиме під час створення ML-структур даних на основі єдиної таблиці істинності. Умова для перевірки коректності таблиці – перетин всіх пар рядків між собою дорівнює порожній множині. Приклад синтезу умов: if a, then 1; if b then 0; if ab then 2; if c then 3; if bcd then 4; if ae then 1. Таблиця істинності для згаданих умов представлена на рис. 5.

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

Рисунок 5 – Таблиця істинності

Рішення за таблицею істинності визначається як поєднання виходів для тих рядків, які мають непустий результат перетину вхідної умови, записаного у форматі метрики параметрів. Будь-який, скільки завгодно складний комп'ютер можна уявити таблицею істинності з примітивним автоматом управління в один стан, що реалізує синхронізацію. З'являється метрика комп'ютера, що задається добутком простір-час $n = S \times T$, що має взаємно однозначну відповідність до імплементації даних параметрів в аналогічну пару логіка-пам'ять $n = L \times M$. Відхід від паралелізму квантового аналогового комп'ютинга – комбінаційної схеми – породжує часовитратний послідовнісний механізм отримання результату за рахунок перетворення фрагментів простору у послідовні часові фрейми елементарних обчислень. Замість однієї великої таблиці істинності створюється кінцеве число дрібних таблиць, обробка яких синхронізована у часі. Це стає можливим за рахунок введення вже нетривіального автомата управління (алгоритму), що координує роботу невеликих таблиць істинності чи мікрооперацій. Алгоритм завжди є перетворювач-трансформатор простору таблиці істинності у часовий інтервал обчислення, необхідний для отримання результату: $S \rightarrow A \rightarrow T$. Чим складніший алгоритм, тим більший час його обробки. Простір та час створюють методологічний добуток $n = S \times T$, який має бути врахований експертами при розробці обчислювальних пристроїв. Зменшення простору тягне за собою зниження швидкодії і навпаки. Наприклад, три точки на кривій (рис. 6) формують однаковий добуток, що дорівнює $n = S \times T = 8 \times 2 = 4 \times 4 = 2 \times 8 = 16$.

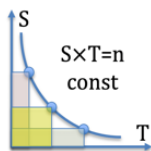


Рисунок 6 – Просторово-часова залежність комп'ютинга

Тут з'являється пам'ять, що необхідна для зберігання проміжних результатів розрахунку і станів алгоритму. Алгоритм (структура), пам'ять і час є метрикою складності обчислювального пристрою, або платою за зменшення простору таблиці істинності. За фактом можна сказати, що ускладнення структур даних нічого хорошого не призводить. Чим вони простіші, тим швидше логіка їх обробки, тим вища продуктивність комп'ютера. Краще та простіше таблиці істинності, як форми опису комбіаторних структур даних для людини та машини, просто не існує. По такому табличному шляху успішно розвивалися технології машинного навчання та нейромереж. Потім вони стали ускладнювати структури шляхом підключення пам'яті та часу, якими пройшов детермінований комп'ютер. Новий виток у гонці розвитку, як часткове повернення до забутого старого, створює сьогодні квантовий комп'ютер. Комбінаційна цифрова схема, як сукуп-

ність бездресних логічних елементів, є аналогом квантового комп'ютера. Його сутність є тривіальною – як паралельно обробити таблицю істинності для отримання результату при вирішенні комбіаторних задач. Звичайно ж вона вирішена в рамках дворівневої комбінаційної схеми класичного комп'ютинга шляхом паралельного розповсюдження аналогових сигналів від вхідів до виходів. Але амбітність квантового комп'ютингу полягає у наближенні його продуктивності до світлової швидкості транзакцій між даними.

Таким чином, ускладнення структур даних від таблиці істинності у бік її розбиття парадоксально призводить до появи складних алгоритмів, що використовують пам'ять, і спричиняє істотне збільшення часу обчислювального процесу для отримання результату. Маючи на увазі, що пам'яті на сьогодні достатньо для реалізації таблиць істинності великої розмірності, необхідне повернення архітектури обчислювача до найпростіших структур даних – таблиць та примітивних алгоритмів управління на основі логіки. До того ж слід мати на увазі, що достатньо зберігати не всю таблицю, а лише вектор її вихідних станів, що ще більше спонукає спеціалізований комп'ютер у бік векторних структур даних та примітивної логіки алгоритмів для їх обробки.

Заміна структури (flow chart) множиною (set chart) означає усунення несуттєвих деталей моделі процесу чи явища задля досягнення мети (рис. 7). При вирішенні великої кількості завдань комп'ютингу структурні особливості створюють обчислювальну складність алгоритму без явних та видимих переваг у формуванні кінцевого результату.



Рисунок 7 – Трансформування структури на множину

Іншими словами, якщо є можливість вирішити задачу примітивною бездресною (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 алгебрі 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.

2. Аналоговий шлях у квантовий комп'ютинг. Квантова комп'ютерна інженерія є нова галузь знань, що займається теорією та практикою проектування, тестування виробництва та експлуатації захищених програмно-апаратних масштабованих обчислювачів для паралельного вирішення комбіаторних задач на основі суперпозиції 2^n когерентних станів, що поро-

джуються n кубітами. Інженерія створюється як інтерфейс між квантовою теорією та програмістом, який повинен розроблювати ефективні паралельні алгоритми та програми на основі знання практично корисних властивостей квантових структур даних для вирішення комбінаторних задач.

Квантовий комп'ютер – пристрій для паралельного розв'язання комбінаторних задач на основі суперпозиції (переплутування) 2^n когерентних станів, що породжуються n кубітами. Метрика квантового комп'ютинга досить заплутана, проте можна зробити наступні висновки.

1) Відношення понад усе (“Beziehungen uber alles”). Відношення між квантовими явищами є первинними, самі явища – вторинними.

2) Кубіт – суперпозиція нуля та одиниці у квантових частинках різної природи або система з двовимірним простором станів (спін електрона або поляризація фотона – кванта електромагнітного поля). Це – ні про що. Нуль і одиниця, утворюючи відношення, що неспроможні існувати окремо один від одного. Це – головна властивість та відмінність від класичного біта, де 0 та 1 існують незалежно один від одного.

3) Операції: суперпозиції та сплутаність формують взаємопов'язані відношення між 2^n станами на сукупності з n знеособлених кубітів. Суперпозиція – когерентна взаємодія 2^n станів у локальному просторі, утвореному n кубітами. Сплутування – когерентна взаємодія нелокальних 2^n станів на n кубітах.

4) Відношення – перетворення між станами (системи частинок) у просторі та часі, але 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. Вимірювання незворотно змінює функцію хвилі (амплітуду ймовірності) або стан системи в комплексному векторному просторі. Квантовий біт, крім базисних станів $|0\rangle$ і $|1\rangle$ може приймати безліч лінійних комбінацій $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$. Будь-яку кількість класичних бітів можна витягти з одного квантового біту за наявності клонууючого пристрою. Насправді з одного кубіту можна витягти лише один біт.

7) Квантовий комп'ютер – пристрій, який дозволяє для структури 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 – одночасне виконання оборотних (унітарних) обчислень над різними стана-

ми квантової суперпозиції. Таким чином, можна одночасно обробляти 2^n схем на одному вхідному впливі (2^n вхідних даних на одній схемі), але при цьому формується всього n бітів даних в кінці обчислень, що є суттєвим обмеженням паралелізму. Логічні класичні вентиля є необоротними. Для оборотних класичних обчислень вхід і вихід елемента завжди містять однакову кількість бітів n де будь-яке обчислення є взаємно-однозначна відповідність множини 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 $H_n = C^{2^n}$. Будь-яке класичне обчислення (логічний елемент) може бути оборотним. Наприклад, таблиця істинності оборотного керуваного елемента НІ (controlled not) має такий вигляд (рис. 8).

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

Рисунок 8 – Таблиця істинності оборотного controlled not

У таких оборотних елементах взаємно-однозначної відповідності ніяк не виявляються властивості квантової суперпозиції та сплутаності. Нелокальна суперпозиція двох когерентних фотонів (електронів) називається квантовою сплутаністю, що проявляється при вимірі одного з них. Квантова сплутаність є властивістю квантової суперпозиції фотонів (електронів). Такі явища як: квантова суперпозиція фотонів; квантова сплутаність електронів; метрика подібності-відмінності для суперпозиції та сплутаності, не визначені строго в джерелах. Сплутаність дає можливість визначати стан усієї системи при її вимірі. Використання квантової суперпозиції станів для розв'язання практичних комбінаторних задач досить повно представлені у публікаціях. Багато алгоритмів, як Deutsch-алгоритм для розпізнавання станів, можна паралельно реалізувати на класичних обчислювачах. Квантова сплутаність – це взаємодія двох альтернативних когерентних нелокальних станів, які не перетинаються, що мають між собою максимальну похідну, яка дорівнює їх суперпозиції або об'єднанню. Суперпозиція означає, що квантова система одночасно перебуває у двох станах. Сплутаність є кореляція двох або більше нелокальних частинок, коли вимір однієї призводить до визначення стану іншої. Суперпозиція та сплутаність – не одне й те саме. Проте, суперпозиція (визначається через когерентність) необхідна для створення сплутаності [30, 31]. Квантова сплутаність включає суперпозицію станів двох сплутаних корелюваних нелокальних частинок, коли вимір однієї миттєво і завжди у протифазі впливає на стан іншої. Когерентність та сплутаність кількісно та функціона-

льно еквівалентні, що відіграє важливу роль у квантових технологіях телепортації, криптографії та кодування. Але як бути з котом Шредингера, який один у двох станах. Квантова сплутаність – 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, тільки базові стани, тому потрібні алгоритми для приведення результату до n бітів. 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 виявляються 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 та 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 розв'язанні комбінаторних задач. При цьому поняття сплутування кубітів не приносить нової інформації для організації обчислювального процесу відносно суперпозиції, крім нелокальності, коли два стани одного кубіту, що ототожнюються з двома квантовими частинками, формують нелокальну суперпозицію.

Квантова сплутаність є нелокальна суперпозиція двох розділених фотонів, що когерентно зберігають протилежні спини на відстані. При вимірі стає очевидним факт протилежності спинів для кількох взаємодіючих фотонів. Сплутані фотони – пара нелокальних частинок з корельованими квантовими станами, що уможлиблює квантовий зв'язок, телепортацію, комп'ютинг та квантовий інтернет, квантову метрологію, моніторинг та управління. Генеруються пари сплутаних 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 сплутаних фотонів за рахунок розпаду збудженого стану. Пара фотонів, сплутана, не в одному (спин), а в n вимірах (поляризація, енергія, поздовжнє обертання), спроможна переносити за оптоволоконном у 2^n разів більше інформації, ніж проста сплутана пара, що є аналогом технології частотного мультиплексування, але вже на квантовому рівні. Виникає знову ж таки суперпозиція станів, але вже кілька сплутаних фотонів у кількох квантових вимірах, які значно підвищують продуктивність передачі даних. Сплутані фотони ділять між собою один загальний квантовий стан. Тому зміна

квантового стану одного з них спричиняє синхронну зміну стану іншого (інших), незалежно від відстані, що розділяє їх у фізичному просторі. Розроблено технологію отримання десятків, сотень та 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 сплутуванням двох фотонів, але вже в 1–100 квантових вимірах, що означає також корисну багатозначність передачі даних [32].

Висновок. Сплутаність (станів) фотонів та суперпозиція (кубітних станів) електронів (атомів) – два ізоморфні аналоги квантового комп'ютингу для передачі даних та організації обчислень відповідно. Квантова сплутаність є ключем до пояснення миттєвих ментальних зв'язків між окремими людьми, розділеними великими відстанями. Якщо розділені сплутані фотони опромінюють пару найближчих родичів, які мають ідентичні геноми, зміни в одному з них викликають когерентний відгук у іншій людині. Існує гіпотеза, що два сплутані фотони нелокально реагують один на одного зі швидкістю в 100 тисяч разів, що перевищує швидкість світла. Інше тривіальне пояснення квантової сплутаності пов'язане з тим фактом, що один фотон у момент його сплутування шляхом розподілу на два породжує дійсно випадковим чином одиничну та нульову визначеність. Тому, коли один із них вимірюється десь у просторі як одиниця, то другий, природно, «миттєво-когерентно» стає нулем. Можна тут емоційно вигукнути – та він і був банкрутом із самого початку сплутаності, коли один фотон був розділений на два. За такої гіпотези зберігається недоторканою єдина константа Всесвіту – швидкість світла. Знову ж таки Альберт Ейнштейн правий – швидкість світла є верхньою межею!

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 спеціалістів), 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 QC через їхні відношення (relations) представлена на рис. 9. Суперпозиція (superposition) – лінійне об'єднання станів, процесів чи явищ. Тут відношення квантових частинок є суперпозицією. Квантові частки не заважають одна одній. Відношення кінцевої множини квантових частинок в одній точці простору (local) є суперпозиція. Відношення кінцевої множини частинок у різних точках простору (nonlocal) є сплутаність (entanglement). Суперпозиція та сплутаність є еквівалентними поняттями.



Рисунок 9 – Відношення між QC-компонентами

Відношення – структура взаємних зв’язків на множині компонентів, що визначає властивості процесу чи явища. Квантове відношення є когерентною структурою кореляційних станів. Немає суперечливих чи взаємовиключних відношень між станами в квантовому світі. Квантовий стан – сукупність параметрів, що характеризують когерентну структуру корелейованих станів у заданий час. Суперпозиція – когерентне відношення між двома та більш корельованими станами квантової частки (фотона, електрона, атома). Сплутаність (entanglement) – нелокальна суперпозиція когерентних станів розділених корелейованих фотонів. Кубіт (qubit) – 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. Багато станів квантової структури, когерентно фігурує в локальному просторі кубітів, є той чарівний механізм, який за визначенням орієнтований на миттєве паралельне вирішення комбінаторних задач експоненційної складності.

Суперпозиція – відношення між станами. Короткі визначення відповідних понять:

- 1) кубіт – локалізована суперпозиція квантових станів;
- 2) сплутаність – нелокальна суперпозиція квантових станів;
- 3) кубіт, як когерентне локалізоване відношення 0 і 1, є примітивом організації структур даних комп’ютеринга;
- 4) сплутаність є квантовою основою передачі даних, кодування, телепортації, інтернету, метрології, моніторингу та управління;
- 5) суперпозиція (методологічно) – властивість не-суперечливого спільного існування нескінченної когерентної множини частинок квантового світу та їх корельованих станів у локальному (нелокальному) просторі. Суперпозиція також працює і в макросвіті, зрозуміло, з обмеженнями на кінцеве число фізичних компонентів та його станів у локальному просторі. Якщо суперпозицію мікросвіту імплементувати в його макроаналог, то люди зможуть проходити один через одного і через стіни, автомобілі перестануть стикатися на дорогах, нові будинки можна будувати, не руйнуючи старих, літаки безперешкодно злітатимуть і сідають на одну смугу, а також літатимуть на зустрічних курсах, селяни збиратимуть з одного поля мільйони тонн овочів і фруктів. Все це водночас, де ніхто нікому не заважає. Така картина макросвіту в

метриці мікрвиконання може бути продовжена до розуміння нескінченної множини когерентних паралельних, одночасно існуючих, фізичних світів. Відома і не зовсім вдала гіпотеза про кота Шредингера мало що дає для розуміння мікросвіту. Останній стає зрозумілішим, якщо уявити закони мікросвіту в їх макроінтерпретації, запропонованої вище. Ніщо не існує у Всесвіті (мікро- та макросвіті) без належності до відношення. Суперпозиція є відношенням. Надпровідність і надплинність зберігають квантову властивість безперешкодного проходження електронів і рідин один через одного в протилежних напрямках за певних температурних умов. Тому фізичний макросвіт також здатний сприймати деякі властивості-стосунки квантового мікросвіту в частині суперпозиційної не-суперечності.

3. Квантові архітектурні рішення. Математики і фізики мають повноту знання мікросвіту. Комп’ютерні інженери володіють технологіями 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 not в квантовому світі. Що можна зробити за допомогою двох інструкцій для створення квантових алгоритмів? Тільки специфічні неуніверсальні алгоритми. Цього достатньо для підрахунку, наприклад, подібності-відмінності. Професор Юрій Петрович Шабанов-Кушнаренко стверджував, що логіки I-АБО (and-or) достатньо для розв’язання комбінаторних задач розпізнавання та прийняття рішень. Паралелізм квантових обчислень на основі застосування послідовності квантових вентилів до структури пов’язаних кубітів визначається одночасним обчисленням станів виходів як реакції на обробку всіх станів входів [33]. Квантовий алгоритм виконується паралельно за той самий приблизно константний час над усіма входними впливами, незалежно від значення $n = \{2,10\}$ у функції $Y = 2^n$, що формує 4 або 1024 станів, з видачею функції ймовірнісного розподілу відповідей. Квантовий комп’ютер аналоговими сигналами запускає 2^n паралельних процесів рішення, кожен з яких обробляє один із можливих варіантів, після чого формується ймовірнісна суперпозиція відповідей, з яких вибирається одна. Для отримання стійкого результату роботи квантового комп’ютера необхідно багаторазово запустити квантовий алгоритм на тому самому входному наборі даних, а потім усереднити результат. Ймовірність не є сильною властивістю квантового комп’ютера, яке мало бути строго детермінованим, як у класичному, коли на ту саму послідовність або паралельність входних дій алгоритм дає стійко стабільний результат. Властивість паралелізму, але детермінованого, цілком можна реалізувати за рахунок надлишкового кодування і додаткової пам’яті в класичному комп’ютері. Найбільш відомі 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 Дойча. На відміну від класичних, квантові комп'ютери, як і алгоритми, є універсальними. У цьому сучасні QC створюють такі проблеми, яким ще 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 багатокубітних структур даних великої розмірності, важливе значення має сусідство шести частинок на 1 кубіт; чим більше сусідів, тим більше проблем;

5) ініціалізація, обчислення на гейтах, корекція, зчитування – все слід укласти під час декогеренції.

Задача пошуку оптимального покриття є комбіаторною і тому може бути орієнтована на квантове рішення. Далі розглядається комбіаційна схема, яка є апаратною реалізацією квазіпаралельного пошуку покриття на класичному комп'ютері (рис. 10).

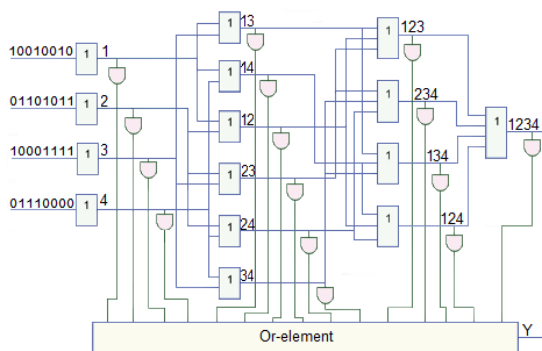


Рисунок 10 – Логіка для квазіпаралельного розв'язання задачі покриття

Для цього використовується структура Хасе, яка дивним чином оптимізує структури даних для вирішення комбіаторних задач. Тут вона формує кінцеву множину вертикальних рівнів, що йдуть ліворуч, задають поєднання вхідних векторів для отримання можливого розв'язку, в даному випадку:

$C_n^m = (C_4^1, C_4^2, C_4^3, C_4^4)$. Розв'язок знайдено, якщо хоча б одне із зазначених п'ятнадцяти or-елементів формує одиничне покриття із поєднання вхідних векторів. Тоді and-gate при or-елементі, що реалізує поєднання, створює значення 1 у векторному регістрі, показаному в нижній частині структури, що обертає в одиницю стан виходу Y . Часова вартість квазіпаралельного

рішення дорівнює $\frac{1}{n} 2^n$ автоматні такти. На квантовому комп'ютері всі рівні поєднуються в один верти-

кальний, що означає створення повністю паралельного алгоритму пошуку рішення на $2^n - 1$ когерентних схемах, але вже в одному автоматному такті. Найповодніший розв'язок – з'єднання всіх схем в ланцюжок, коли розв'язок виходить на часовому 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, що породжуються n -когерентними кубітами. Природно, що на продуктивність QC також впливає швидкість світла, яку можна вважати граничною продуктивністю обміну даними між компонентами квантових структур даних.

Далі подані основні положення публікації [8] та інші підходи до побудови (квантового) комп'ютинга, які в деяких моментах суттєво відрізняються за ідеологією від класичного підходу до створення обчислювачів, а в деяких – мають разючу схожість. Управління квантовим комп'ютером подібно до безумовної установки кубіка 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, спостереження за процесом неможливо, що призводить до його руйнування. Можна спостерігати лише кінцевий стан кубітів. Аналогом може бути безумовний алгоритм установки FSM-автомата (початковий) наперед заданий стан. Відмінність між класичним та квантовим комп'ютером полягає у використанні незвичайних та важких для розуміння (defies intuition) квантово-механічних ефектів для обробки даних. У той час як звичайні класичні комп'ютери маніпулюють бітами, що приймають значення 0 або 1, квантові обчислювачі працюють з квантовими бітами або кубітами. Кубіти використовують квантово-механічний ефект – суперпозицію, що дає можливість кожному кубіту перебувати в стані, що визначається метрикою-ступенем «близкості» до нуля та одиниці. Коефіцієнти, що описують одиничність та нульовість кубіту, є комплексними числами (Sphere Bloch $V=a+ib$), що мають дійсну та уявну (real and imaginary) частини. У QC з кінцевим числом кубітів можна створювати структури даних, де стан одного кубіту пов'язаний зі станом іншого або інших. Це називається «сплутуванням». Два класичних біти можуть бути встановлені тільки в 00, 01, 10, 11. Два сплутані кубіти можуть одночасно створювати суперпозицію цих чотирьох станів, що мають певний ступінь ймовірності для кожного стану: 00, 01, 10, 11 (тут нівельована різниця між сплутаністю і суперпозицією):

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

Що більше взаємодіючих кубітів у структурах даних, то більше станів (векторів) і менше ймовірність кожного їх. Суперпозиція або теоретико-множинне зображення абсолютно детермінованого стану відома в дискретній математиці понад 100 років. Алгебра Кантора (рис. 11) оперує чотирма символами: $A = \{0,1,X,\emptyset\}$, де $X = \{0,1\}$ – стійкий стан, що може бути унітарно закодовано 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 [6].

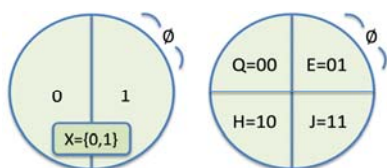


Рисунок 11 – Символи алгебри Кантора

Три сплутаних кубітів можуть бути у суперпозиції восьми фундаментальних (тут і далі елементарних) станів, що створюють повну множину подій. Природно, n кубітів можуть створювати суперпозицію з 2^n станів. Тому виконання операції з n заплутаними кубітами означає одночасну обробку 2^n бітів інформації. У разі класичного комп'ютера метрика унітарного кодування станів для кожного 2^n адресних (двійково-десяткових) кодів, що мають n розрядів, розширюється до 2^n координат. Інакше паралельність та стійкість виконання логічних операцій потребує суттєвої апаратної ($R = 2^n - n$) надмірності – збільшення кількості розрядів для кодів станів. Інших недоліків немає. 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 кубіт), то їх нелокальна зв'язаність (квантова нелокальність), завжди через інверсію, використовується для передачі конфіденційних даних квантовими каналами. Втім, деякі дослідники висловлюють думку, що для квантових комп'ютерів сплутаність є, навпаки, небажаним побічним фактором [9]. З позиції теореми Поста це не зовсім так, оскільки обидві операції: суперпозиція (or) і сплутування (not) створюють функціонально повний базис для логічного комп'ютингу, коли усунення однієї з них унеможливило створення універсального обчислювача. Операції квантових обертань, що виконуються з кубітом, не бувають ідеальними. Обмежен-

ня на якість керуючих сигналів та 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 попри те, що фізичний субстрат, використовуваний для їхнього зберігання, був спроектований так, щоб тримати їх ізольованими. Можна компенсувати ефекти неточності керування та декогеренції шляхом квантового виправлення помилок. Такий підхід потребує великої кількості надлишкових фізичних кубітів та додаткового часу їх обробки. Декогеренція притаманна як квантовим бітам, а й будь-яким даним, інформації, знанням, історії, культурі, науці, освіті. Когерентність завжди є екстравитратною властивістю для будь-якої кіберфізичної або кіберсоціальної системи. Так само як і декогеренція не завжди є погано для функціонування системи.

4. Аналогово-цифровий комп'ютинг. Метрика класичного «дата-адреса-логіка» комп'ютера оперує адресно-цифровими структурами даних та послідовною логікою їх обробки. Адреса створює благо – цифровізацію світобудови і водночас накладає заборону його паралелізму. Заборона усувається аналоговізацією сигналів у цифрових пристроях, що реалізується на основі провідних (гальванічних) з'єднань у регістрах, комбінаційних схемах, байтових структурах пам'яті. Але дивно, в природі і Всесвіту немає адрес. Все: матерія-енергія, простір-час, розвивається за відкритими і ще невідомим 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 (AI), подібний до власного аналога непаралельного сприйняття миру та мислення (рис. 12).



Рисунок 12 – Метрика відношень комп'ютингу

На технологічному рівні комп'ютера працюють аналогові сигнали, які досить складно інтерпретуються як цифрові. Адресна ідентифікація означає послідовність обробки компонентів. Якщо немає адрес, а лише відношення, 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 «пам'ять-логіка», як логіка послідовної обробки даних, що адресуються в пам'яті. Інший шлях комп'ютерингу – безлика множина, створювана відношенням множина-логіка, що є найкращим поданням неадресованих даних для логіки їхньої паралельної обробки. На жаль, сучасний комп'ютер не вирішує завдань ефективного аналізу множини неадресованих елементів. На це і тільки на це (розв'язання комбінаторних задач) орієнтований квантовий комп'ютер, що має примітивами структур даних кубіти, як сукупність суперпозиційованих безадресних сигналів-носіїв. 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 дорослішання QC, буде прагнути до класичного детермінізму. Але труднощі 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 значно кращий варіант обробки інформації, де відсутні адреси. Там, де дані, має бути і логіка їхньої обробки (рис. 13).



Рисунок 13 – Макроархітектура квантового комп'ютера

Інакше дані повинні містити спосіб їх алгоритмічної обробки. Це – аксіома, якщо взяти до уваги, що найпростіший і універсальний метод комп'ютерингу

даних є звичайна транзакція (запис-зчитування). Відношення між структурами даних та алгоритмом є суть комп'ютеринга, який прагне у своїй досконалості до простоти таблиць та and-ог-логіки. Чим простіше ця пара, тим ефективніша і технологічніша HW/SW реалізація в метриці «продуктивність», «прибутковість і час виходу ринку» (Yield & Time-to-Market). Практично також важко переконати людство в маленьких недоліках мікронано-електронної реалізації сучасних комбінатійних схем, що доставляють масу 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. В цьому випадку людина приходить до комп'ютера Всесвіту, суворо аналогового. Всесвіт, на відміну людства, немає адрес і не порушує законів. Зграя риб, наприклад, паралельно управляється зовнішнім сигналом і не стикається між собою – аналоговий комп'ютер. Сьогодні вже можливо і дуже необхідно застосувати DT-комп'ютер для аналітики великих даних (big data analytics). Але вирішення питання стримується потужним індустріальним лобі «аматорів логіки» (logic-like), а також невідкриття високо структурованого матеріалу (жорстка структура електронів), що забезпечує зберігання і транзакцію даних за допомогою фотонів. Транзакції між даними можна порівняти з хаотичним рухом атомів або молекул, які під час зіткнення можуть отримати заряд або віддати його. Більше нічого не потрібно для створення комп'ютерингу data-transaction. Людина вигнала цифровий сигнал (а також накладну надмірність у вигляді АЦП-ЦАП), який є строго штучним. Можливо, цифра – це шлях не розвитку, а деградації людського знання чи тупиковий шлях комп'ютерингу. Решта природи (жива і нежива) спілкується між собою аналоговими сигналами. Точка зустрічі класичного та квантового комп'ютерингу – фотонні транзакції на структурі електронів. Детермінізм класичного чи ймовірність квантового? Детермінізм та ймовірність.

Комп'ютеринг – процес обміну даними. Інакше комп'ютеринг – транзакція (операція читання-запису, read-write) даних між об'єктами, суб'єктами або явищами. Детерміноване управління виникає, коли в соціальні процеси втручається людина, яка створила цифру – перший малюнок на кам'яній стіні печери тисячі років тому. Без людини роль управління виконують закони та геноми розвитку природних явищ, як примітивні та найскладніші алгоритми відповідно. Поява цифри (адреси) як найпростішої моделі природи в мозку людини створила основу для послідовного детермінізму human-комп'ютера (людський детермінізм) (рис. 14).



Рисунок 14 – Комп’ютинг – процес обміну даними

Без людини існує лише природний чи квантовий безадресний аналоговий комп’ютинг Всесвіту, небесних тіл, живої та неживої природи під керівництвом законів, геномів, відносин. Відмінність класичного від квантового комп’ютера полягає в метриці адресації даних, яка замінюється простором та аналоговою природою електромагнітної чи гравітаційної взаємодії. Будь-яке відношення є комп’ютингом, а саме: 1) логіка на адресованих даних (дата-адреса-логіка); 2) закони на адресованих даних (дата-адреса-закон); 3) транзакції на адресованих даних (дата-адреса-транзакції); 4) логіка у просторі даних (дата-простір-логіка); 5) закони у просторі даних (дата-простір-закон); 6) транзакції у просторі даних (дата-простір-транзакції).

Але чи лише дані створюють комп’ютинг? Дані можна замінити на суб’єкти чи об’єкти (computing data-free) (рис. 15).



Рисунок 15 – Комп’ютинг – відношення між явищами

Місяць та Земля – яскравий приклад комп’ютингу управління двох тіл на основі гравітаційного закону. Чоловік і жінка створюють комп’ютинг сім’ї на основі традиційних відношень. Зграя вовків створює комп’ютинг виживання шляхом розподілу ролей ватажка та виконавців його волі для вдалого полювання. Політичні еліти країн створюють комп’ютинг міжнародних відносин. Загальна властивість тут – розподіл функціональних обов’язків, пов’язаних з механізмами управління та виконання (control-execution). Один об’єкт (суб’єкт) реалізує комп’ютинг із собою, де мозок є провідним. Два об’єкти ділять повноваження за принципом «провідний – ведений». Три об’єкти призначають керівника та виконавців. Приклад: сонце

© Хаханова О. В., Чумаченко С. В., Рахліс Д. Ю., Хаханов І. В., Хаханов В. І., 2022
DOI 10.15588/1607-3274-2022-4-4

та планети створюють гармонію комп’ютингу. Два центри управління неможливі у природі.

Практично будь-яке електромагнітне випромінювання впливає на матерію, що завжди перебуває у фізичному просторі. Якщо до останнього помістити субатомні частинки, вони зможуть змінювати свій стан. На цій взаємодії частинок і електромагнітних хвиль створюються квантові комп’ютери. Тоді можна стверджувати, що тут (рис. 16) задекларовано специфічний вид безадресного комп’ютингу, коли суб’єкт чи об’єкт випромінює хвилі-дані у простір, які можуть бути «вважані» іншим суб’єктом чи об’єктом.



Рисунок 16 – Природні (квантові) обчислення

Відбувається запис-зчитування інформації безпосередньо або із затримкою, якщо існує певний просторовий посередник, здатний зберігати інформацію, в межах необхідного часу декогеренції, що функціонально залежить від виду матерії або частинок.

Таким чином, природний аналоговий або квантовий комп’ютинг відкриває і пояснює можливості щодо запису та зчитування даних за допомогою заповненого матерією простору, що приймає, зберігає та передає інформацію. Тоді виходить, що радіо в широкому сенсі є не що інше, як прообраз квантового комп’ютингу, в якому сьогодні абсолютно паралельно взаємодіють передавач (генератор частот) і кінцева (нескінченна) множина безадресних приймачів (кубітів), здатних приймати та зберігати інформацію. Інакше квантовий комп’ютинг є локальною радіосистемою, де генератор радіохвиль «запилює» квантові частинки-кубіти, переводячи їх у альтернативні стани. Тоді постає питання, навіщо потрібні криогенні установки для підтримки матеріалу в температурі абсолютного нуля? Комп’ютер можна зробити у будь-якому просторі з відповідним матеріалом для приймання, зберігання та передачі даних. Але сьогодні лише хмари електронів, що знаходяться в напівпровіднику, з температурою, близькою до абсолютного нуля, здатні змінювати свій стан, зберігати інформацію та віддавати її в межах мізерного часу (близько 50 пікосекунд) декогеренції. Сфера діяльності запропонованої картини комп’ютингу поширюється на квантову фізику-механіку, радіотехніку та комп’ютерну інженерію. Модель універсального комп’ютингу подається вісьмома компонентами, які є шаблоном для створення будь-якої замкнутої системи моніторингу-управління (рис. 17).



Рисунок 17 – Класична структура комп'ютерингу

Використовуючи представлену структуру, нескладно створити модель квантового комп'ютера, яка має різницю в кількох компонентах (рис. 18). Тут з'являються аналогові RF-сигнали активації Qubits and Q-logic для механізму виконання, де результат визначається кінцевим станом кубітів Q-states, а дані формуються за допомогою радіочастотного кодування кубітів.



Рисунок 18 – Структура квантового комп'ютерингу

Далі неважко уявити радіо-комп'ютеринг, який також не дуже суттєво відрізняється від квантового, якщо припустити, що кубіти є маленькі ведені радіоприймачі (рис. 19).



Рисунок 19 – Структура радіо-комп'ютерингу

Векторно-кубітні моделі справного моделювання схем. Вектор-кубіт є компактною формою запису таблиці істинності у вигляді кортежу вихідних станів комбінаційного автомата, де кожен біт має адресу, що визначається двійковим кодом або вхідною умовою. Основні логічні елементи (and, or, not, xor) представлені кубітними векторами станів: 0001, 0111, 10, 0110. Для паралельного виконання логічних операцій над вектор-кубітами інтерес представляє кодування примітивних символів алфавіту Кантора $\{0, 1\}$ унітарним двійковим кодом 10 і 01. Символ $X = \{0,1\}$, що залишився, виходить суперпозицією кодів примітивів $10 \cup 01 = 11$. Симулятор справної поведінки має простий та ефективний інтерфейс графічного зображення логічних елементів, портів введення тестових наборів та виведення результатів моделювання, а також послуги для виправлення помилок та зберігання структур даних. Цікаво, що елементи тут не прив'язані до класичної логіки, а оперують кубіт-векторами, які мають десятковий еквівалент.

4 ЕКСПЕРИМЕНТИ

Як приклад розглянемо такі дані для кубіт-векторів та їхні відповідні десяткові еквіваленти:

© Хаханова О. В., Чумаченко С. В., Рахліс Д. Ю., Хаханов І. В., Хаханов В. І., 2022
DOI 10.15588/1607-3274-2022-4-4

0001=1, 0111=7, 0110=6, 1110=14. Структура логічної схеми подана на рис. 20.

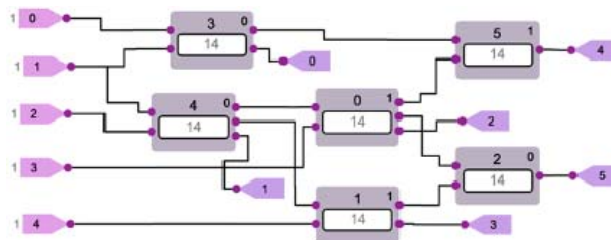


Рисунок 20 – Квантовий симулятор для ISCAS-схеми

Всередині зображення елемента є інформація про порядковий номер примітиву та тип функціональності, представлені десятковим числом, яке є згортою кубітного вектор-покриття логічного елемента. Симулятор працює в покроковому режимі, коли моделюється один вектор, що подається вручну на зовнішні входи схеми. Існує також автоматичний режим подачі вичерпного тесту для отримання таблиці істинності всього цифрового пристрою зі значеннями на всіх (вхідних, внутрішніх та вихідних) лініях схеми. Структурна організація кубітних даних для моделювання справної поведінки цифрової логічної схеми на тестовому наборі 11010 зображено на рис. 21. Тут на вектор справного моделювання цифрового пристрою 11010010111 нанизуються кубітні вектори, що представляють елементарні функції комбінаційної схеми. Виходить, що вертикальне зрушення векторів-кубітів щодо горизонтального вектора моделювання формує стани виходів цифрової схеми. Процедура такого зсуву підпорядковується єдиному та універсальному характеристичному рівнянню моделювання $M_i = Q_i[M(X_i)]$, в якому беруть участь горизонтальний вектор моделювання M , кубітні Q -вектори логіки, а також змінні зв'язки X , що створюють адреси осередків кубітних векторів.

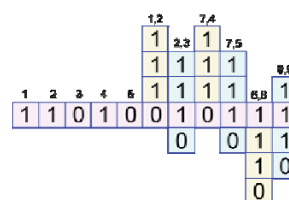


Рисунок 21 – Структури кубітних даних для логічної схеми

Для отримання статистичної інформації та верифікації програмного додатку Quantum Modeling нижче наведено результати 10 варіантів моделювання на логічних схемах з бібліотеки ISCAS, а також на інших структурах, наведених нижче: Adder SP, Circuit Schneider, Circuit C5, Circuit C17, RFO Circuit, MUX16 Circuit, DFA Circuit, Hasse processor, DC4-16 Circuit, Circuit C432. Порівнянню підлягав час синтезу схемної структури (modeling time), і навіть час моделювання (simulation time) (рис. 22).

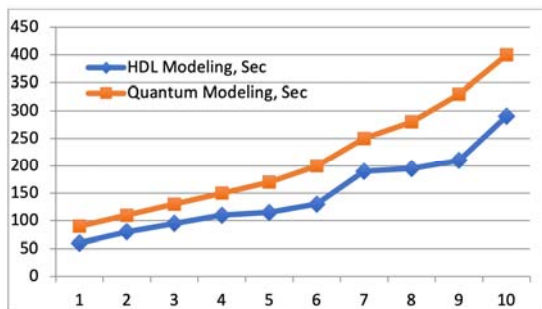


Рисунок 22 – Час синтезу моделі та моделювання схем

Базовим варіантом порівняння послужив продукт Active HDL (Aldec Inc.), де інформація про моделі схеми вводилася мовою опису апаратури VHDL. Перший графік показує інтегральний час моделювання та синтезу моделей логічних схем невеликої розмірності на основі векторних форм опису елементів, другий графік – аналогічний час, де моделі елементів представлені HDL-кодами. Особливо це прийнятно та ергономічно у процесі навчання студентів технологіям проектування та верифікації цифрових систем та компонентів. Проте задля великих промислових проєктів доцільно використовувати мови опису апаратури.

5 РЕЗУЛЬТАТИ

У межах тестування цифрових пристроїв запропоновано:

- 1) графічний інтерфейс проектування кубітних моделей цифрових пристроїв та компонентів, що дає можливість у режимі online здійснювати корекцію помилок;
- 2) кубітні структури даних для опису цифрових пристроїв та компонентів, що відрізняються компактністю та високим паралелізмом їх обробки;
- 3) програмні модулі для моделювання на основі кубітів (qubit-driven modeling), синтезу тестів та діагностування цифрових пристроїв та компонентів у режимах ручного та автоматичного введення вхідних тестових послідовностей при навчанні студентів.

6 ОБГОВОРЕННЯ

Інтегрально, реалізовані кубітні моделі, квантові методи та комбінаторні алгоритми технічного діагностування цифрових пристроїв [15–34], які дають можливість суттєво (до 25 %) зменшити час синтезу тестів, дедуктивного моделювання несправностей та справної поведінки, пошуку дефектних станів за рахунок впровадження інноваційної ідеї використання кубітно-векторних структур даних для опису логічних компонентів (рис. 23).

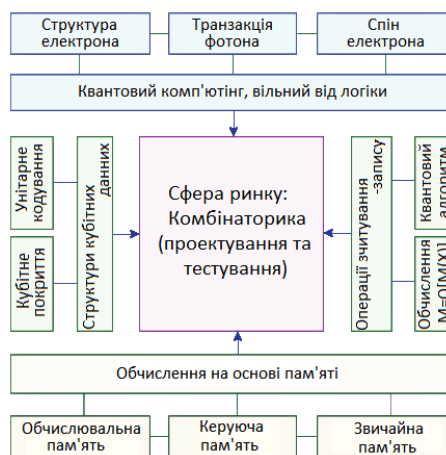


Рисунок 23 – Сервіси тестування на основі квантів

ВИСНОВКИ

Розглянуто задачу векторного моделювання SoC-логіки. Наукова новизна отриманих результатів полягає у тому, що:

- 1) вперше запропоновано метрику технологічних структур даних, орієнтована на паралельний пошук несправностей у цифрових системах на основі використання двох логічних векторних операцій;
- 2) дістала подальшого розвитку метрика відношень між окремими компонентами QC (relations), що дозволяє організувати квантовий детермінований комп'ютинг;
- 3) вперше запропоновано квантові архітектурні рішення, що дозволяють розв'язувати задачі покриття у квазіпаралельному режимі;
- 4) отримали подальший розвиток архітектурні рішення на основі аналого-цифрового комп'ютингу, що можуть бути використані для паралельного розв'язання задач аналізу цифрових систем;
- 5) запропоновано векторно-кубітні структури даних логіки, що дозволяють квазіпаралельно моделювати цифрові схеми.

Практична цінність полягає у розробці графічного інтерфейсу проектування кубітних моделей цифрових пристроїв та компонентів, що дає можливість у режимі online здійснювати корекцію помилок; отриманні кубітні структури даних для опису цифрових пристроїв та компонентів, що відрізняються компактністю та високим паралелізмом їх обробки. Програмні модулі для моделювання на основі кубітів (qubit-driven modeling), синтезу тестів та діагностування цифрових пристроїв та компонентів у режимах ручного та автоматичного введення вхідних тестових послідовностей використовуються у освітньому процесі.

Перспективи подальших досліджень полягають у створенні технології комп'ютингу на основі readwright транзакцій на пам'яті, де повністю відсутня логіка процесора.

1. Будь-який комп'ютинг, як правило, містить два компоненти: пам'ять і логіку, які мають різні параметри швидкодії та витрат. Однак у певних межах можна створити обчислювач без пам'яті або без логіки. Кван-

товий комп'ютер без технологічно складної логіки є перспективним для ринку за метрикою апаратної реалізації. Запропоновано детерміновану парадигму створення квантового комп'ютингу шляхом використання фотонних транзакцій на електронах атома, що виключає використання квантової логіки. Показано можливий еволюційний шлях квантового комп'ютингу: «Пам'ять-Адреса-Транзакція» → «Електрон-Адреса-Транзакція» → «Електрон-Адреса-Квантація».

2. Специфічні переваги практично спрямованого квантового комп'ютингу застосовуються в областях, пов'язаних з паралельними обчисленнями на основі пам'яті (memoory-driven) при розв'язанні комбінаторних задач тестування та діагностування. Запропоновано кубітно-векторні моделі опису функціональностей, які відрізняються від відомих таблиць істинності компактністю опису та технологічністю для реалізації алгоритмів синтезу та аналізу цифрових пристроїв та SoC-компонентів.

3. Сучасний комп'ютинг має як пам'ять стійкий потенціал-заряд у точках простору з кремнію, де транзакційний носій – електрони у субатомному просторі. У квантовому виконанні електрони є пам'ять по спину або орбіті, а фотони є транзакторами-носіями. Створити структуру з електронів, які матимуть адреси-ідентифікатори – крок у напрямку детермінованого квантового обчислювача.

4. Стратегія спільного проектування апаратури та програмного забезпечення для квантового комп'ютингу є посильним завданням сьогодні для технологічно слабких країн, вчені яких можуть зробити істотний внесок у розробку паралельних алгоритмів та програмних додатків на основі кубітів (qubit-driven).

5. Суперпозиція та переплутування є синонімами. Квантовий комп'ютер ефективно і паралельно розв'язує комбінаторні задачі, а в інших обчисленнях він не дає істотного виграшу. Все, що робить квантовий обчислювач, може бути реалізовано в паралельному режимі на класичному комп'ютері за відсутності обмежень на апаратуру.

6. Через 3–5 років класичний детермінований комп'ютер подолає технологічний бар'єр деталізації 3,5 нанометра. Це означає, що і квантовий комп'ютер повинен подолати бар'єр невизначеності і стати детермінованим. Точка зустрічі класичного та квантового комп'ютингу – фотонні транзакції на структурі електронів. Детермінізм класичного чи ймовірність квантового? Детермінізм та ймовірність.

ПОДЯКИ

У даній роботі використано результати, отримані авторами у 2017–2021 роках на кафедрі Автоматизації проектування обчислювальної техніки Харківського національного університету радіоелектроніки. Автори вдячні колегам за їх активну участь в обговоренні та підтримці наукової школи «Проектування та технічна діагностика цифрових систем на кристалах, комп'ютерах та мережах», розуміння важливого значення розвитку фундаментальних та прикладних досліджень теорії

© Хаханова О. В., Чумаченко С. В., Рахліс Д. Ю., Хаханов І. В., Хаханов В. І., 2022
DOI 10.15588/1607-3274-2022-4-4

квантових обчислювальних процесів для аналізу кіберпростору.

ЛІТЕРАТУРА / LITERATURA

1. Post Emil Leon. Introduction to a general theory of elementary propositions / E. L. Post // *American Journal of Mathematics*. – The Johns Hopkins University Press. – 1921. – Vol. 43, No. 3. – P. 163–185.
2. Rosenbloom P. C. Post algebras. I. Postulates and general theory / P. C. Rosenbloom // *American Journal of Mathematics*. – 1942. – Vol. 64. – P. 167–188.
3. Tunable quantum criticality and super-ballistic transport in a “charge” Kondo circuit / [Iftikhar Z., Anthore A., Mitchell A. K. et al.] // *Science*. – 2018. – Vol. 360 (6395). – P. 1315–1320.
4. A single-photon switch and transistor enabled by a solid-state quantum memory / [Shuo S., Hyeochul K., Zhouchen L. et al.] // *Science*. – 2018. – Vol. 361 (6397). – P. 57–60.
5. Panetta K. Distributed cloud, AI engineering, cybersecurity mesh and composable business drive some of the top trends for 2021 [Electronic resource] / K. Panetta. – Access mode: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-strateg-ic-technology-trends-for-2021/>.
6. Hahanov V. *Cyber Physical Computing for IoT-driven Services* / V. Hahanov. – New York : Springer, 2018. – P. 279.
7. Versluis R. Quantum computers scale up: Constructing a universal quantum computer with a large number of qubits will be hard but not impossible / R. Versluis, C. Hagen // *IEEE Spectrum*. – 2020. – Vol. 57, No. 4. – P. 24–29. DOI: 10.1109/MSPEC.2020.9055969.
8. Compiler design for distributed quantum computing / [D. Ferrari, A. S. Cacciapuoti, M. Amoretti, M. Caleffi] // *IEEE Transactions on Quantum Engineering*. – 2021. – Vol. 2. – P. 1–20. DOI: 10.1109/TQE.2021.3053921.
9. Gross D. Most quantum states are too entangled to be useful as computational resources / D. Gross, S. N. Flammia, J. Eisert // *Physical Review Letters*. – 2009. – Vol. 102, № 19. – P. 1–4. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.190501.
10. Drozd A. New on-line testing methods for approximate data processing in the computing circuits / A. Drozd, S. Antoshchuk // 6th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, Prague, Czech Republic, 15–17 September, 2011: proceedings. – P. 291–294. DOI: 10.1109/IDAACS.2011.6072759.
11. Algebra-logical method for SOC embedded memory repair / [V. I. Hahanov, S. V. Chumachenko, W. Gharibi, E. Litvinova] // 15th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 19–21 June, 2008: proceedings. – Vol. 1. – P. 481–486.
12. FPGA implementation of VLC communication technology / [H. Guo et al.] // 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), Taipei, Taiwan, 27–29 March, 2017: proceedings. – P. 586–590. DOI: 10.1109/WAINA.2017.54.
13. Cyber physical system – smart cloud traffic control / [V. Hahanov et al.] // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Kiev, Ukraine, 26–29 September, 2014: proceedings. – P. 1–18. DOI: 10.1109/EWDTS.2014.7027107.
14. Hahanov V. Green cyber-physical computing as sustainable development model / V. Hahanov, E. Litvinova, S. Chumachenko // 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. – P. 65–85. DOI: 10.1007/978-3-319-55595-9_4.
15. Qubit technology for analysis and diagnosis of digital devices / [V. I. Hahanov, T. Bani Amer, S. V. Chumachenko, E. I. Litvinova] // Electronic modeling. – 2015. – Vol. 37 (3). – P. 17–40.
 16. Quantum memory-driven computing for test synthesis / [V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova et al.] // IEEE East-West Design and Test Symposium, Novi Sad, Serbia, 29 September – 2 October, 2017: proceedings. – P. 123–128.
 17. Nanophotonic rare-earth quantum memory with optically controlled retrieval / [T. Zhong, J. M. Kindem, J. G. Bartholomew et al.] // Science. – 2017. – Vol. 357 (6358). – P. 1392–1395.
 18. Photon-triggered nanowire transistors / [J. Kim, H.-Ch. Lee, K.-H. Kim et al.] // Nature Nanotechnology. – 2017. – Vol. 12. – P. 963–968.
 19. Cho A. Vibrations used to talk to quantum circuits / A. Cho // Science, 2018. – Vol. 359 (6381). – P. 1202–1203. DOI: 10.1126/science.359.6381.1202.
 20. Daley A. J. Quantum computing and quantum simulation with group-II atoms / A. J. Daley // Quantum Information Processing Journal. – 2011. – № 865. – Springer. – P. 1–11.
 21. Quantum Mem-Computing for Design and Test. [V. Hahanov et al.] // IEEE Globecom Workshops, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 9–13 December, 2018. – P. 1–7. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644256.
 22. Qubit-driven fault simulation / [V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova, S. Chumachenko] // IEEE Latin American Test Symposium (LATS), Santiago, Chile, 11–13 March, 2019. – P. 1–7. DOI: 10.1109/LATW.2019.8704583.
 23. Architectures of quantum memory-driven computing / V. Hahanov, S. Chumachenko, E. Litvinova, H. Khakhanova // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Kazan, Russia, 14–17 September, 2018. – P. 1–7. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524843.
 24. Test synthesis for logical x-functions / [V. Hahanov, M. Liubarskyi, W. Gharibi et al.] // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Kazan, Russia, 14–17 September, 2018. – P. 1–9. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524863.
 25. Quantum memory-driven computing for test synthesis / [V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova et al.] // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), Novi Sad, 29 September – 2 October, 2017. – P. 1–6. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110147.
 26. Commercialize quantum technologies in five years [Electronic resource] / [M. Mohseni, P. Read, H. Neven et al.] // Nature. – 2017. – Vol. 543. – P. 171–174. – Access mode: <https://www.nature.com/articles/543171a>.
 27. Single-photon-memory two-step quantum secure direct communication relying on Einstein-Podolsky-Rosen pairs / D. Pan, K. Li, D. Ruan et al. // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 1–19. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3006136.
 28. Hiroyuki S. Fundamentals of quantum information. Extended Edition / S. Hiroyuki, Y. Nobuaki // World Scientific. – 2020. – P. 312. DOI: 0.1142/12016.
 29. Similarity-Difference Analysis and Matrix Fault Diagnosis of SoC-components / [V. Hahanov, M. Karavay, V. Sergienko et al.] // IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS), 4–7 September, 2020. – P. 1–5. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224740.
 30. Physicists find quantum coherence and quantum entanglement are two sides of the same coin [Electronic resource] / L. Zyga. – Access mode: <http://phys.org/news/2015-06-physicists-quantum-coherence-entanglement-sides.html>.
 31. Physicists find quantum coherence і quantum entanglement є два суті з тих самих coin [Electronic resource] / L. Zyga. – Access mode: <http://phys.org/news/2015-06-physicists-quantum-coherence-entanglement-sides.html>.
 32. Generation and confirmation of a (100x100)-dimensional entangled quantum system [Electronic resource] / [M. Krenn, M. Huber, R. Fickler et al.] – Access mode: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1306/1306.0096.pdf>.
 33. Как работают квантовые компьютеры. Собираем пазл [Electronic resource]. – Access mode: <https://habr.com/ru/post/480480/>.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2022.
Після доробки 09.11.2022.

UDC 681.326

QUANTUM DIGITAL-ANALOGUE COMPUTING

Khakhanova A. – PhD, Associate Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Chumachenko S. – Doctor of Science, Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Rakhlis D. – PhD, Associate Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

Hahanov I. – Postgraduate student of Kharkov National University of Radio Electronics, Україна.

Hahanov V. – Doctor of Science, Professor of Design Automation Department, Kharkiv National University of Radio Electronics, Ukraine.

ABSTRACT

Context. Nature is the relation among processes and phenomena. Nothing exists in the universe without relations. Computer is transactions of relations between data with the help of control and execution mechanisms. Quantum relations are a superposition of particles and their states. Superposition and entanglement are equivalent concepts. Entanglement is a non-local superposition of deterministic states. A quantum computer is unconditional transactions of relations between qubit data. Quantum computer is an analog device for parallel solution of combinatorial problems. Practically oriented definitions of the quantum computer concepts are the path to development of scalable quantum parallel algorithms for combinatorial problems solving. Any algorithm can be reduced to a sequence of operations without conditions, because any truth table is a collection of a complete system of conditions-states. Any

sequence of actions can always be reduced to one parallel operation. Conditions and sequences arise only when the developer wants to use previously created primitive constructs to build an always non-optimal computing unit. The paradigm of quantum computer creation is determined through the use of photonic transactions on the electrons of an atom may exclude the use of quantum logic. The evolutionary path of a quantum computer from the classical one: “memory-address-transaction” (MAT) → “electron-address-transaction” → “electron-address-quantaction” (EAQ) → state-superposition-logic. The meeting point of classical and quantum computers is photon transactions on the structure of electrons. Everything that is calculated on a quantum computer can be calculated in parallel on a classical one on account of memory redundancy. The given example is a memory-driven algorithm for modeling digital products based on qubit-vector forms of functionality description for significant performance boost of computing processes by parallel execution of logical operations.

Objective. Simulation of the correct SoC-component behavior based on vector representation of the logic. Formation of the triggering development of a computing based on the superposition of the classical, quantum and analog computing process, which in its development should be based on technological qubit, tabular and vector data structures for the parallel solution of combinatorial problems.

Method. MAT-computing implements any algorithms on account of transactions (read-write) in memory. Qubit-vector models for describing functionalities, which differ from known truth tables in compactness of description and manufacturability for the implementation of parallel algorithms of the synthesis and analysis of digital devices and SoC-components.

Results. 1) The metric of the technological data structures, focused on parallel troubleshooting in digital systems based on the usage of two logical vector operations, was proposed for the first time. 2) The metric of relations between the individual components of QC, allowing organizing a quantum deterministic computer, has been further developed. 3) Quantum architectural solutions, that allow solving coverage problems in a quasi-parallel mode, were proposed for the first time. 4) Architectural solutions based on an analog-to-digital computing, which can be used to solve the problems of the digital systems parallel analysis, have been further developed. 5) Vector-qubit structures of the logic data, that allow a quasi-parallel simulation of digital circuits, were proposed.

Conclusions. Qubit models, quantum methods and combinatorial algorithms for technical diagnostics of digital devices have been implemented, which can significantly (up to 25%) reduce the time of test synthesis, deductive modeling of faulty and correct behavior, search for defective states by introducing an innovative idea of using qubit-vector data structures for describing logical components. Comparative assessments of qubit models and methods usage show an increase in the efficiency of algorithms for modeling digital devices compared to tabular ones. The superposition of a classical, quantum and analog computer is integrally represented, which allows to find the best solutions for recognition and decision making.

KEYWORDS: quantum digital-analog computing, quantum determinism, superposition, entanglement, memory-address-transaction, electron-address-quantaction, quantum transactions on structure of electrons, qubit vectors, matrix data structures, systems on chip.

REFERENCES

1. Post Emil Leon. Introduction to a general theory of elementary propositions, *American Journal of Mathematics*. The Johns Hopkins University Press, 1921, Vol. 43, No. 3, pp. 163–185.
2. Rosenbloom P.C. Post algebras. I. Postulates and general theory, *American Journal of Mathematics*, 1942, Vol. 64, pp. 167–188.
3. Ifikhar Z., Anthore A., Mitchell A. K. et al. Tunable quantum criticality and super-ballistic transport in a “charge” Kondo circuit, *Science*, 2018, Vol. 360 (6395), P. 1315–1320.
4. Shuo S., Hyochul K., Zhouchen L. et al. A single-photon switch and transistor enabled by a solid-state quantum memory, *Science*, 2018, Vol. 361 (6397), pp. 57–60.
5. Panetta K. Distributed cloud, AI engineering, cybersecurity mesh and composable business drive some of the top trends for 2021 [Electronic resource]. Access mode: <https://www.gartner.com/smarterwithgartner/gartner-top-strateg-ic-technology-trends-for-2021/>.
6. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services. New York, Springer, 2018, P. 279.
7. Versluis R., Hagen C. Quantum computers scale up: Constructing a universal quantum computer with a large number of qubits will be hard but not impossible, *IEEE Spectrum*, 2020, Vol. 57, No. 4, pp. 24–29. DOI: 10.1109/MSPEC.2020.9055969.
8. Ferrari D., Cacciapuoti A. S., Amoretti M., Caleffi M. Compiler design for distributed quantum computing // *IEEE Transactions on Quantum Engineering*, 2021, Vol. 2, pp. 1–20. DOI: 10.1109/TQE.2021.3053921.
9. Gross D., Flammia S. N., Eisert J. Most quantum states are too entangled to be useful as computational resources, *Physical Review Letters*, 2009, Vol. 102, № 19, pp. 1–4. DOI:10.1103/PhysRevLett.102.190501.
10. Drozd A., Antoshchuk S. 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, 15–17 September, 2011, proceedings, pp. 291–294. DOI:10.1109/IDAACS.2011.6072759.
11. Hahanov V. I., Chumachenko S. V., Gharibi W., E. Litvinova Algebra-logical method for SOC embedded memory repair, *15th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, 19–21 June, 2008*, proceedings, Vol 1, pp. 481–486.
12. Guo H. et al. FPGA implementation of VLC communication technology, *31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. Taipei, Taiwan, 27–29 March, 2017: proceedings. pp. 586–590. DOI: 10.1109/WAINA.2017.54.
13. Hahanov V. et al. Cyber physical system – smart cloud traffic control, *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Kiev, Ukraine, 26–29 September, 2014: proceedings, pp. 1–18. DOI: 10.1109/EWDTS.2014.7027107.
14. Hahanov V., Litvinova E., Chumachenko S. In: Kharchenko V., Kondratenko Y., Kacprzyk J. (eds) Green cyber-physical computing as sustainable development model, *Green IT Engineering: Components, Networks and Systems Implementation. Studies in Systems, Decision and Control*, Vol. 105. Springer, Cham, pp. 65–85. DOI: 10.1007/978-3-319-55595-9_4.
15. Hahanov V. I., Amer T. Bani, Chumachenko S. V., Litvinova E. I. Qubit technology for analysis and diagnosis

- of digital devices, *Electronic modeling*, 2015, Vol. 37 (3), pp. 17–40.
16. Hahanov V., Gharibi W., Litvinova E. et al. Quantum memory-driven computing for test synthesis, *IEEE East-West Design & Test Symposium*, Novi Sad, Serbia, 29 September – 2 October, 2017: proceedings, pp. 123–128.
 17. Zhong T., Kindem J. M., Bartholomew J. G. et al. Nanophotonic rare-earth quantum memory with optically controlled retrieval, *Science*, 2017, Vol. 357 (6358), pp. 1392–1395.
 18. Kim J., Lee H.-Ch., Kim K.-H. et al. Photon-triggered nanowire transistors, *Nature Nanotechnology*, 2017, Vol. 12, pp. 963–968.
 19. Cho A. Vibrations used to talk to quantum circuits, *Science*, 2018, Vol. 359 (6381), pp. 1202–1203. DOI: 10.1126/science.359.6381.1202.
 20. Daley A. J. Quantum computing and quantum simulation with group-II atoms, *Quantum Information Processing Journal*, 2011, № 865, Springer, pp. 1–11.
 21. Hahanov V. et al. Quantum Mem-Computing for Design and Test, *IEEE Globecom Workshops, Abu Dhabi, United Arab Emirates*, 9–13 December, 2018. – P. 1–7. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2018.8644256.
 22. Hahanov V., Gharibi W., Litvinova E., Chumachenko S. Qubit-driven fault simulation, *IEEE Latin American Test Symposium (LATS)*. Santiago, Chile, 11–13 March, 2019, pp. 1–7. DOI: 10.1109/LATW.2019.8704583.
 23. Hahanov V., Chumachenko S., Litvinova E., Khakhanova H. Architectures of quantum memory-driven computing, *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Kazan, Russia, 14–17 September, 2018, pp. 1–7. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524843.
 24. Hahanov V., Liubarskyi M., Gharibi W. et al. Test synthesis for logical x-functions, *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Kazan, Russia, 14–17 September, 2018, pp. 1–9. DOI: 10.1109/EWDTS.2018.8524863.
 25. Hahanov V., Gharibi W., Litvinova E. et al. Quantum memory-driven computing for test synthesis, *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*. Novi Sad, 29 September – 2 October, 2017, pp. 1–6. DOI: 10.1109/EWDTS.2017.8110147.
 26. Mohseni M., Read P., Neven H. et al. Commercialize quantum technologies in five years [Electronic resource], *Nature*, 2017, Vol. 543, pp. 171–174. Access mode: <https://www.nature.com/articles/543171a>.
 27. Pan D., Li K., Ruan D. et al. Single-photon-memory two-step quantum secure direct communication relying on Einstein-Podolsky-Rosen pairs, *IEEE Access*, 2020, Vol. 8, pp. 1–19. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3006136.
 28. Hiroyuki S., Nobuaki Y. Fundamentals of quantum information. Extended Edition, World Scientific, 2020, P. 312. DOI: 0.1142/12016.
 29. Hahanov V., Karavay M., Sergienko V. et al. Similarity-Difference Analysis and Matrix Fault Diagnosis of SoC-components, *IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS)*, 4–7 September, 2020, pp. 1–5. DOI: 10.1109/EWDTS50664.2020.9224740.
 30. Physicists find quantum coherence and quantum entanglement are two sides of the same coin [Electronic resource]. Access mode: <http://phys.org/news/2015-06-physicists-quantum-coherence-entanglement-sides.html>.
 31. Zyga L. Physicists find quantum coherence i quantum element є два суті з тих самих coin [Electronic resource], Access mode: <http://phys.org/news/2015-06-physicists-quantum-coherence-entanglement-sides.html>.
 32. Krenn M., Huber M., Fickler R. et al. Generation and confirmation of a (100x100)-dimensional extangled quantum system [Electronic resource], Access mode: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1306/1306.0096.pdf>.
 33. Kak robotayut kvantovyye kompyuteryi. Sobiraem pazzl [Electronic resource], Access mode: <https://habr.com/ru/post/480480/>.