

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ЄМЕЛЬЯНОВ ІГОР ВАЛЕРІЙОВИЧ

УДК 658:512.011:681.326:519.713

**МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ КУБІТНОГО ТЕСТУВАННЯ ЦИФРОВИХ
ПРИСТРОЇВ НА ОСНОВІ MEMORY-DRIVEN СТРУКТУР ДАНИХ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2018

Дисертацією є рукопис.

Роботу виконано у Харківському національному університеті радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Хаханов Володимир Іванович, Харківський національний університет радіоелектроніки, головний науковий співробітник кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Дрозд Олександр Валентинович, Одеський національний політехнічний університет МОН України, професор кафедри комп'ютерних інтелектуальних систем та мереж;

доктор технічних наук, професор
Мірошник Марина Анатоліївна, Український державний університет залізничного транспорту МОН України, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем.

Захист відбудеться “27” червня 2018 року о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.01 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Науки, 14.

Автореферат розісланий “26” травня 2018 року.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

Є.І. Литвинова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Цифровий світ передбачає точну цифрову ідентифікацію всіх кіберфізичних процесів і явищ в часі та просторі. Метою створення цифрового світу є розумний кіберфізичний і соціальний комп'ютинг вичерпного цифрового моніторингу та метричного інтелектуального керування всіма процесами та явищами для підвищення якості життя людей і збереження екології планети. Існуючі обчислювальні потужності всієї планети не здатні задовільно вирішити згадану проблему через низьку продуктивність глобального комп'ютингу і високу енерговитратність існуючих класичних і квантових комп'ютерів. Це дає підстави для пошуку альтернативних технологій реалізації комп'ютингових інноваційних архітектур. Можливим вирішенням проблеми може бути квантовий memory-driven і logic-free комп'ютинг, що виключає дорогі, енерговитратні, логіко-подібні (or, not) операції суперпозиції і переплутування. Квантовий комп'ютинг – це паралельна комбінаторика, де неоднорідні підмножини даних обробляються за один такт. Класичний комп'ютинг – це паралельна регуляторика, де регулярні адресовні дані обробляються за один такт. Тільки поєднання двох видів комп'ютингу надасть людству необхідні обчислювальні потужності для створення глобального інтелекту.

Проблеми (квантового) проектування, моделювання, тестування, діагностування та відновлення працездатності цифрових систем знаходять відображення в публікаціях вчених: Y. Zorian, J. Bergeron, Z. Navabi, A. Jerraya, D.B. Armstrong, P. Prinetto, J. Abraham, H. Fujiwara, T. Nishida, X. Wang, Peter Mueller, Анатолій Петренко, Раймунд Убар, Andre Ivanov, Олексій Романкевич, Дмитро Сперанський, Анжела Матросова, Павло Пархоменко, John Paul Roth, Вазген Мелікян, Самвел Шукурян, Володимир Тарасенко, Михайло Коровай, Олександр Палагін, Володимир Опанасенко, В'ячеслав Харченко, Леонід Дербунович, В'ячеслав Ярмолик, Рімантас Шейнаускас, Ніна Євтушенко, Роман Базилевич, Геннадій Кривуля.

Науково-практична задача дослідження полягає у квантовому проектуванні, моделюванні і тестуванні цифрових пристроїв і компонентів на основі використання memory-driven кубітних структур даних, вільних від застосування логіки.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Розробка теми дисертації здійснювалася відповідно до планів держбюджетних НДР та договорів, виконуваних на кафедрі АПОТ Харківського національного університету радіоелектроніки в період з 2011 року, в тому числі: 1) Договір про дружбу і співробітництво між ХНУРЕ та корпорацією «Aldec Inc.» (USA), № 04 від 01.11.2011. 2) Фундаментальна НДР «Персональний віртуальний кіберкомп'ютер та інфраструктура аналізу кіберпростору», №258 (2012-2014). 3) Держбюджетна НДР «Кіберфізична система – «Розумне хмарне управління транспортом», № 0115U-000712 (2015-2017). 4)

«Розумний кібер університет – Cloud-Mobile сервіси управління науково-освітніми процесами», № 0117U-002524 (2017-2019).

Мета і задачі дослідження. Метою даного дослідження є розробка квантових методів паралельного синтезу та аналізу цифрових пристроїв і компонентів для істотного підвищення швидкодії програмних хмарних сервісів і зменшення часу проектування програмно-апаратних комп'ютерних систем за рахунок збільшення пам'яті для зберігання кубітних структур даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1) Визначити модель метричної взаємодії класичного та квантового комп'ютерингу за параметрами паралелізму, суперпозиційності та переплутування для реалізації квантового комп'ютерингу в класичному виконанні за рахунок збільшення пам'яті.

2) Удосконалити метод невизначених коефіцієнтів для мінімізації булевих функцій шляхом паралельного виконання логічних операцій в цілях отримання двох векторів, відповідних мінімальній диз'юнктивній і кон'юнктивній нормальним формам.

3) Удосконалити кубітний метод пошуку дефектів для паралельного виконання операцій над двома групами векторів таблиці несправностей цифрового пристрою, отриманих після виконання діагностичного експерименту.

4) Реалізувати подальший розвиток квантового методу синтезу тестів для логічних функціональностей на основі використання булевих похідних за кубітними структурами даних для підвищення швидкодії за рахунок паралельного виконання логічних операцій.

5) Реалізувати подальший розвиток квантового методу моделювання справної поведінки на основі memory-driven кубітних структур даних шляхом використання транзакційних адресно-орієнтованих процедур аналізу цифрових пристроїв, що виключають логічні операції.

6) Розробити хмарні сервіси синтезу та аналізу кубітних моделей цифрових пристроїв і компонентів, верифікувати їх на різних прикладах цифрових схем і впровадити їх в навчальний процес. Середовище проектування: SWIFT, C++, Verilog, Java Script, Google Cloud Platform.

Об'єкт дослідження – технології квантового паралельного комп'ютерингу на класичних обчислювальних пристроях, що використовують memory-driven кубітні структури даних без застосування логічних елементів.

Предмет дослідження – моделі, методи, алгоритми та засоби квантового синтезу та аналізу цифрових пристроїв і компонентів на основі використання кубітних memory-driven структур даних без застосування логічних елементів.

Методи дослідження: квантовий комп'ютеринг, прикладна теорія цифрових автоматів, архітектури комп'ютерів, булева алгебра, теорія множин, теорія графів, квантово-кубітні методи обчислень і структури даних – для побудови моделей цифрових пристроїв; векторно-логічний аналіз, теорія алгоритмів, методи, засоби, мови проектування і моделювання цифрових систем – для

синтезу та аналізу; методи і критерії якості створення обчислювальних проєктів – для оцінювання тестопридатності цифрових виробів; засоби синтезу схем і аналізу кубітних покриттів – для тестування програмно-апаратних компонентів інфраструктури хмарних сервісів.

Наукова новизна отриманих результатів:

1. Вперше запропоновано модель метричної взаємодії класичного та квантового комп'ютингу, яка характеризується взаємно-однозначною відповідністю за параметрами паралелізму, суперпозиційності та переплутування в обох видах обчислень, що дає можливість реалізувати квантовий комп'ютинг в класичному виконанні за рахунок збільшення пам'яті.

2. Удосконалено метод невизначених коефіцієнтів для мінімізації булевих функцій, який відрізняється від класичного унітарним кодуванням даних для паралельного виконання логічних операцій в цілях отримання двох векторів, відповідних мінімальній диз'юнктивній і кон'юнктивній нормальним формам.

3. Удосконалено кубітний метод пошуку дефектів, який відрізняється від існуючого унітарним кодуванням таблиці дефектів, що перевіряються, для паралельного виконання операцій; це дає можливість привести обчислення до логічної різниці двох векторів, відповідних одиничному і нульовому значенням станів-реакцій виходів цифрового пристрою при виконанні тест-експерименту.

4. Отримав подальший розвиток квантовий метод синтезу тестів для логічних функціональностей за рахунок використання булевих похідних за змінними на кубітних структурах даних, що дає можливість підвищити швидкодію методу шляхом паралельного виконання логічних операцій.

5. Отримав подальший розвиток квантовий метод моделювання справної поведінки за рахунок memory-driven реалізації кубітних структур даних, що дає можливість використовувати транзакційні адресно-орієнтовані процедури аналізу цифрових пристроїв, які виключають логічні операції.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблено хмарні сервіси синтезу та аналізу кубітних моделей цифрових пристроїв і компонентів, які протестовані на різних прикладах комбінаційних схем і пройшли вичерпну апробацію моделей і методів при вивченні курсів «Квантові обчислення», «Схемотехнічне проектування та моделювання НВІС», «Проектування та тестування цифрових пристроїв на ПЛІС», «Комп'ютерна логіка». Середовище проектування: SWIFT, C++, Verilog, Java Script, Python 2.7 і платформи: Microsoft Windows, X Window і Macintosh OS X, Google Cloud Platform, Daemon Docker Engine.

Отримані в процесі виконання досліджень наукові висновки і практичні результати є достовірними, що підтверджується достатньою кількістю проведених експериментів, тестуванням і моделюванням реальних і тестових функціональних модулів з відкритих бібліотек компаній і конференцій. Практична значущість наукових досліджень підтверджується інтеграцією програмних додатків аналізу і синтезу з сервісами проектування і верифікації

компанії Aldec. Результати дисертації в складі моделей, методів та інфраструктури впроваджено в навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки (акт про впровадження від 04.01.2018); в науково-дослідну і виробничу діяльність компанії Aldec, USA (довідка про впровадження від 09.01.2018).

Особистий внесок здобувача. Всі наукові і практичні результати отримані автором особисто. У роботах, опублікованих зі співавторами, здобувачеві належать: [1] – квантовий метод синтезу тестів, кубітний метод дедуктивного моделювання, хмарний сервіс аналізу цифрових пристроїв; [2] – матрична модель для паралельного діагностування несправностей цифрових пристроїв, кубітний метод пошуку дефектів; [3] – аналіз великих даних для векторно-кубітного моделювання функціональних цифрових схем, квантовий метод моделювання справної поведінки; [4] – кубітні форми опису обчислювальних структур, квантовий метод моделювання справної поведінки; [5] – квантовий метод синтезу Q-тестів за допомогою кубітного опису функціональностей; [6] – кубітний векторний метод дедуктивного аналізу несправностей для логічних схем, квантовий метод синтезу тестів для логічних функціональностей; [7] – хмарні сервіси на основі квантових моделей і методів тестування, моделювання та діагностування цифрових пристроїв; [8] – квантовий метод моделювання цифрових пристроїв у формі хмарного сервісу, метод невизначених коефіцієнтів для мінімізації булевих функцій, кубітний метод пошуку дефектів; [9] – визначення класичного та квантового комп'ютингу, метод синтезу тестів для логічних функціональностей за рахунок використання булевих похідних за змінними на кубітних структурах даних, метод отримання квазіоптимального тесту, алгоритм і структура секвенсора; [10] – хмарна інфраструктура квантово-векторного моделювання цифрових пристроїв на основі кубітного опису функцій примітивів, квантовий метод моделювання справної поведінки; [11] – квантові структури даних для тестування цифрових логічних компонентів; [12] – комп'ютерні та квантові технології синтезу та аналізу цифрових пристроїв, модель метричної взаємодії класичного та квантового комп'ютингу; [13] – комп'ютерні моделі хмарних сервісів для тестування цифрових систем; [14] – синтез і аналіз кубітних моделей цифрових систем, квантовий метод синтезу тестів для логічних функціональностей; [15] – синтез моделей і кубітне моделювання цифрових систем; [16] – метрика для аналізу даних при діагностуванні цифрових виробів; [17] – квантове діагностування та моделювання цифрових систем на кристалах, кубітний метод пошуку дефектів; [18] – квантовий процесор для аналізу цифрових компонентів; [19] – технологічна культура великих даних для діагностування дефектів; [20] – квантовий метод моделювання справної поведінки, хмарні сервіси синтезу та аналізу кубітних моделей цифрових пристроїв і компонентів; [21] – дедуктивне моделювання несправностей на основі використання кубітних структур даних; [22] – кубітний метод синтезу тестів для примітивних функціональностей, модель метричної взаємодії класичного та квантового

комп'ютерингу; [23] – квантовий процесор для мінімізації тестів логічних схем; [24] – квантові методи аналізу і синтезу цифрових систем на кристалах; [25] – квантові моделі послідовностних примітивів; [26] – хмарна інфраструктура для реалізації мікросервісів; [27] – технології кіберкомп'ютерингу, як нового бренду IoT-ринку.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи були представлені та обговорені на таких конференціях: 1-4) IEEE East-West Design and Test Symposium 2014 (Ukraine), 2015 (Georgia), 2016 (Armenia); 2017 (Serbia); 5-7) XX Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI сторіччі» 2013, 2016, 2017, Україна; 8) the 11-th IEEE International Conference TCSET 2016 Slavsk, Ukraine; 9) XI International Conference "Perspective +Technologies and Methods in MEMS Design", Lviv-Polyana, 2015; 10-11) 13th International Conference: The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2015 2017, Lvov, Ukraine; 12) 5th Prague Embedded Systems Workshop 2017 Roztoky u Prahy, Czech Republic; 13) the 4th International Microelectronics Congress 2017, Taiwan.

Публікації. Результати наукових досліджень опубліковано в 27 друкованих працях: 1 монографії, 10 статтях у наукових фахових виданнях України (з них 10 статей входять до міжнародних наукометричних баз), 3 статтях у міжнародних наукових журналах за кордоном, а також 13 міжнародних наукових конференціях (з них 10 за кордоном і 9 входять до наукометричної бази Scopus).

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота містить 197 сторінок (з них 127 с. основного тексту), 48 рисунків. Її структура складається з вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел з 187 назв (на 21 с.), 4 додатків (на 24 с.).

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

Вступ містить обґрунтування актуальності розв'язуваної задачі, формулювання мети, об'єкта та задач дослідження, сукупність наукових результатів, що виносяться на захист, відомості про їх апробацію та реалізацію.

Перший розділ присвячено викладенню моделей, методів, алгоритмів та структури хмарно-орієнтованого квантового комп'ютерингу для тестування і моделювання цифрових систем в цілях надання відкритих освітніх сервісів студентам і фахівцям. Дається короткий аналітичний огляд технологій (квантового) проектування, тестування, моделювання справної поведінки і несправностей цифрових систем і схем. Робиться висновок про фінансову та освітню спроможність хмарного комп'ютерингу для проектування і тестування кіберфізичної продукції, online доступного для кожної людини в будь-якій точці земної кулі. Ставляться науково-практичні задачі дослідження, присвяченого хмарній реалізації квантового комп'ютерингу для синтезу тестів, моделювання справної поведінки і несправностей функціональних компонентів SoC.

У другому розділі запропоновано модель метричної взаємодії класичного та квантового комп'ютерингу, удосконалений метод невизначених

коефіцієнтів для мінімізації булевих функцій, удосконалений кубітний метод пошуку дефектів.

Фізична основа класичного квантового комп'ютингу (рис. 1) полягає у використанні операцій суперпозиції і переплутування над станами електронів (р), яких цілком достатньо для організації обчислювального процесу [139-141]. Електрон виконує функцію пам'яті для зберігання біта інформації. Транзакції між електронами здійснюються за допомогою квантів або фотонів (q). Низька і висока орбіти електрона відповідають значенням нуля і одиниці.

Classic Computing	Metric of Computing	Quantum Computing
RAM CMOS memory	1. Memory	Electrons, atoms, particles
Bit, Byte, Register	2. Data Structures	Qubit, Set
Or, Not, And, Read-Write	3. Operations	Superposition, Entanglement, Read-Write
Sequential in time	4. Algorithms	Parallel in space
Silicon nano-technology	5. Technologies	Subatomic particles, superconductivity
Watts	6. Energy Consumption	KWatts
N-performance	7. Performance	N^{**2} performance
Room temperature	8. Temperature	-273 C
Regularity addressable	9. Objectives	Combinatorics set-theoretic
Combinatorial uncertainty	10. Uncertainty	Quantum uncertainty

Рис. 1. Метрика комп'ютингу

Функціонально повний базис для створення архітектури квантового комп'ютингу представлений операціями суперпозиції та переплутування, яким можна поставити у відповідність традиційний логічний базис або-ні. В теорії множин даному базису ставиться у відповідність ізоморфізм у формі пари «об'єднання-додаток». Однозначно, операція суперпозиції в квантовій фізиці ізоморфна логічній інверсії або теоретико-множинному доповненню в алгебрі логіки. Тому природно, що кожний стан двійкового розряду (електрона) після застосування даної операції до біту інформації знає один про одного все, де б вони не знаходилися, з точністю до інверсії a_i / \bar{a}_i . Далі на основі пари операцій-примітивів (або, не) будується складніша система логічних компонентів і пристроїв для організації та оптимізації обчислювальних процесів.

Інновація в архітектурі квантового комп'ютингу визначається усуненням логіки, пов'язаної з суперпозицією і переплутуванням. Аналогом можуть виступати memoqy-driven архітектури класичного комп'ютера, вільні від reusable logic. В такому комп'ютері немає нічого, крім пам'яті, де реалізується транзакція (операції запису-зчитування даних) на адресовній пам'яті. Транзакції досить для організації будь-якого обчислювального процесу шляхом використання єдиного характеристичного рівняння: $M_i = Q_i[M(X_i)]$. Тут M_i, Q_i, X_i являють собою компоненти пам'яті: для вектора-стану обчислювального процесу, вектора-кубіта логічного примітиву, вектора-адреси комірки логічного примітиву. Q-логіка реалізується на адресній пам'яті, де також здійснюється асемблювання всіх примітивів за допомогою інтегруючого M-вектора стану обчислювального пристрою, який формує двійкові адреси $M(X)$ на основі використання масиву номерів вхідних змінних X .

Функціонально повний базис для створення архітектури квантового комп'ютингу представлений операціями суперпозиції та переплутування, яким можна поставити у відповідність традиційний логічний базис або-ні. В теорії множин даному базису ставиться у відповідність ізоморфізм у формі пари «об'єднання-

Квантове представлення даних у вигляді суперпозиції унарних кодів можна використовувати для істотного спрощення методу невизначених коефіцієнтів при мінімізації булевих функцій. Таблиця істинності дискретного об'єкта може бути представлена не більше, ніж двома векторами квантового покриття при унітарному кодуванні (UC) вхідних станів. Процедура, що ілюструє дане твердження, наведена на рис. 2. Тут представлені нульові і одиничні куби таблиці істинності – вхідні стани, які унарно кодуються і логічно об'єднуються (VUC). В результаті виходять два вектори квантового покриття, кожен з яких може представляти логічну функцію в формі кубітного покриття.

Розглядається таблиця $T = T_{ij}$, $i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$. У гіршому випадку кількість станів у кожному стовпчику таблиці (матриці) дорівнює m . Кількість станів може бути представлена m розрядами унітарного коду. В результаті виходить матриця розмірністю m на n , де кожна комірка містить m -розрядний вектор. Застосування операції суперпозиції або логічного об'єднання до всіх рядків таблиці, завдяки унітарному кодуванню, створює один рядок, який формує в компактному вигляді відносини, раніше представлені початковою таблицею.

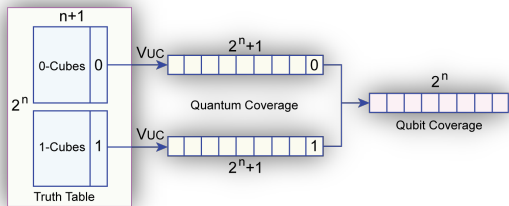


Рис. 2. Модель отримання кубітного покриття

З урахуванням отриманої інформації про можливість подання таблиці істинності двома кубами квантового покриття запропоновано модернізацію відомого методу невизначених коефіцієнтів для мінімізації логічних функцій.

Нехай є первинна таблиця невизначених коефіцієнтів для мінімізації булевої функції від трьох змінних. Здійснюється роздільне логічне об'єднання всіх одиничних і нульових рядків таблиці в два інтегруючих вектора. В результаті виходять всі можливі поєднання змінних, які формують одиничні і нульові значення функції.

Щоб отримати диз'юнктивну форму мінімізованої розмірності (рядок 3 в наведеній Q-таблиці), необхідно з

одиничного куба квантового покриття логічно відняти нульовий куб за правилом, представленим такою формулою:

Q	Operations	1	2	3	12	13	23	123	f
1	$Q^1 = \bigvee_{f_i=1} T_{ij}$	11	11	11	1111	1011	1011	10101001	1
2	$Q^0 = \bigvee_{f_i=0} T_{ij}$	11	11	11	1111	0111	0111	01010110	0
3	$Q = (\bigvee_{f_i=1} T_{ij}) \wedge (\bigvee_{f_i=0} T_{ij})$	00	00	00	0000	1000	1000	10101001	Y

$$Q = (\bigcup_{f_i=1} T_{ij}) \setminus (\bigcup_{f_i=0} T_{ij}) = (\bigvee_{f_i=1} T_{ij}) \wedge (\overline{\bigvee_{f_i=0} T_{ij}}).$$

Обчислювальна складність Q квантового методу невизначених коефіцієнтів знаходиться за допомогою виразу, який визначає час для унарного кодування станів таблиці істинності (для порівняння Q^b – складність базового методу мінімізації):

$$Q = 2^n \times 3^n;$$

$$Q^b = 2^n \times 2^n \times 2^n = 2^n \times 2^{n+n};$$

$$R = \frac{Q}{Q^b} = \frac{2^n \times 3^n}{2^n \times 2^{n+n}} = \frac{3^n}{2^{2n}}.$$

Таким чином, обчислювальна складність Q отримання компактного квантового покриття для мінімізації булевих функцій істотно менша в порівнянні з базовим методом Q^b невизначених коефіцієнтів, який використовує таблицю істинності спеціальної форми.

Розроблено кубітний метод пошуку дефектів шляхом визначення теоретико-множинної різниці двох векторів, відповідних одиничному і нульовому значенням станів виходів, як реакцій спостережуваних виходів на вхідний тест перевірки несправностей:

$$F = (\bigcup_{\forall R_i=1} Q_{ij}) \setminus (\bigcup_{\forall R_i=0} Q_{ij}) = (\bigvee_{\exists R_i=1} Q_{ij}) \wedge (\overline{\bigvee_{\exists R_i=0} Q_{ij}}).$$

Структури даних представлені таблицею несправностей на декартовому добутку тестових наборів і множиною ліній об'єкта діагностування, де кожна комірка являє собою два біти: перший з них ідентифікує перевірювану константну несправність нуля (10), а другий – константну несправність одиниці (01):

$$Q = \{F, T, L\},$$

$$Q = Q_{ij}, i = \overline{1, m}; j = \overline{1, n};$$

$$F = (F_1, F_2, \dots, F_j, \dots, F_n),$$

$$F_j = \{10 \equiv 0; 01 \equiv 1; 11 = \{ \equiv 0, \equiv 1 \}; 00 = \emptyset\};$$

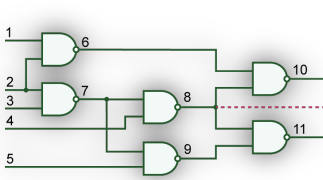
$$T = (T_1, T_2, \dots, T_i, \dots, T_m);$$

$$L = (L_1, L_2, \dots, L_i, \dots, L_n).$$

Суперпозиція несправностей (дві одиниці на одній ліній-комірці) дає можливість істотно мінімізувати структури даних для зберігання інформації в цілях подальшого пошуку дефектів при виконанні діагностичного експерименту в режимі online. Для перевірки методу пошуку

дефектів використовується логічна схема, представлена на рис. 3, яка має 6 елементів and-not, 11 ліній, 5 входів і два виходи. Таблиця на рис. 3 ілюструє виконання діагностичного експерименту з метою об'єднання множини дефектів, які формують некоректні стани виходів на тестових наборах $\{T1-R10; T5-R11; T6-R10, R11; T8-R11\}$. Тут диз'юнкція рядків $T1, T5, T6, T8$ формує вектор $Q1$, який збирає всі можливі дефекти, що перевіряються на тестових наборах. Вектор $Q0$ за допомогою рядків $T2, T3, T4, T7$ об'єднує всі неможливі, неперевірювані на тестових наборах дефекти. Віднімання всіх

неможливих з усіх можливих дефектів дає шуканий результат у вигляді трьох несправностей, закодованих як F2=10; F4=01; F8=10.



Q = Q _{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	R ₁₀	R ₁₁
T ₁	01	10	01	00	10	00	10	10	00	10	01	1	0
T ₂	10	00	10	00	01	10	00	00	10	01	10	0	0
T ₃	00	01	01	00	00	01	10	01	01	10	10	0	0
T ₄	10	00	01	00	10	00	01	00	10	01	01	0	0
T ₅	00	10	00	01	00	01	00	10	00	10	10	0	1
T ₆	01	10	00	00	10	00	00	01	10	01	10	1	1
T ₇	01	00	00	10	00	00	01	00	10	01	01	0	0
T ₈	00	10	10	01	01	10	00	00	00	01	10	0	1
Q ₁	01	11	11	01	11	11	10	11	10	11	11	1	1
Q ₀	11	01	11	10	11	11	11	01	11	11	11	0	0
F	00	10	00	01	00	00	00	10	00	00	00	1/0	1/0

Рис. 3. ISCAS-схема для верифікації

Таким чином, паралельне виконання двох регістрових or-операцій на основі результатів проведеного діагностичного експерименту дозволило визначити три можливих несправності, кожна з яких може мати місце в логічній схемі: $F = \{2^0, 4^1, 8^0\}$.

Більш жорсткою є обмежувальна умова існування в логічній схемі поодинокого константного дефекту, використання якого призводить до обчислення дефектів на основі виразу:

$$F = \left(\bigcap_{\forall R_i=1} Q_{ij} \right) \setminus \left(\bigcup_{\forall R_i=0} Q_{ij} \right) = \left(\bigwedge_{\exists R_i=1} Q_{ij} \right) \wedge \left(\bigvee_{\exists R_i=0} \overline{Q_{ij}} \right).$$

Застосування цієї формули істотно уточнює результат діагностування і приводить його до виду: $F = \{2^0\}$ за рахунок суперечливості кодів дефектів по and-операції в стовпчиках 4 і 8.

У третьому розділі запропоновано *квантовий метод синтезу тестів для логічних функціональностей за рахунок використання булевих похідних за змінними на кубітних структурах даних.*

Метод отримання квазіоптимального тесту або покриття є складовою частиною для синтезу мінімального тесту цифрових схем і базується на використанні регістрових паралельних операцій над апаратно-орієнтованими структурами даних, які представляють собою матрицю кубітних похідних для black-box функціональності. Архітектура секвенсора для визначення квазіоптимального тесту представлена компонентами, зображеними на рис. 4. Аналітична модель і обчислювальні процедури для мінімізації перевіряльного тесту на основі використання матриці кубітних покриттів містять такі компоненти:

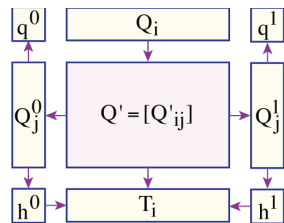


Рис. 4. Архітектура секвенсора

1) кубітне покриття black box функціональності; 2) матриця кубітних похідних за всіма змінними; 3) буферний накопичувальний регістр для індикації процесу отримання квазіоптимального покриття за нульовими координатами Q-вектора; 4) буферний накопичувальний регістр для індикації процесу отримання квазіоптимального покриття за одиничними координатами Q-вектора; 5) кубітний тест-вектор, де одиничними координатами відзначено тестові набори, які необхідно подавати на пристрій Unit Under Test; 6) індикатор досягнення квазіоптимального покриття за нульовими координатами Q-вектора; 7) індикатор досягнення квазіоптимального покриття за одиничними координатами Q-вектора; 8) перемикач закінчення аналізу стовпців матриці похідних за нульовими координатами Q-вектора; 9) перемикач закінчення аналізу стовпців матриці похідних за одиничними координатами Q-вектора; 10) показчик збільшення ступеня покривальності рядків матриці кубітних похідних для розглянутого стовпчика. Якщо показчик дорівнює нулю (збільшення немає), то стовпець з нульової або одиничної підмножини

матриці не додається до тесту: $p = \bigvee_{i=1}^n [(Q^{0(1)} \wedge Q_i') \oplus Q_i']$.

Структурна схема алгоритму синтезу квазіоптимального тесту на основі розбиття матриці похідних має дві симетричні гілки, кожна з яких орієнтована на аналіз нульової та одиничної підмножини стовпців відповідно (рис. 5). Основна ідея отримання квазіоптимального тесту полягає у визначенні мінімальної кількості стовпців в нульовій та одиничній підмножині матриці кубітних похідних, які своїми одиничними координатами покривають всі рядки або змінні розглянутої функціональності. При цьому, якщо черговий стовпець не додає перевіряльних властивостей до раніше доданих до тесту векторів, то він вилучається зі списку. В розділі описано процедури синтезу квазімінімального тесту для логічного прикладу Шнейдера, наведеного на рис. 6. Для кожної змінної кубітна похідна складена парами одиничних координат у векторі. В сукупності, кожна пара при виконанні og-операції дає функціональний терм з трьох вхідних змінних, де відсутня четверта, за якою береться похідна.

$$A = \langle Q, Q', Q^0, Q^1, T, q^0, q^1, h^0, h^1, p \rangle,$$

$$1) Q = (Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_{2^n});$$

$$2) Q' = [Q'_{ij}], i = 1, 2^n, j = \overline{1, n};$$

$$3) Q^0 = (Q_1^0, Q_2^0, \dots, Q_j^0, \dots, Q_n^0);$$

$$4) Q^1 = (Q_1^1, Q_2^1, \dots, Q_j^1, \dots, Q_n^1);$$

$$5) T = (T_1, T_2, \dots, T_1, \dots, T_{2^n});$$

$$6) q^0 = (Q_1^0 \wedge Q_2^0 \wedge \dots \wedge Q_j^0 \wedge \dots \wedge Q_n^0);$$

$$7) q^1 = (Q_1^1 \wedge Q_2^1 \wedge \dots \wedge Q_j^1 \wedge \dots \wedge Q_n^1);$$

$$8) h^0 = 1 \leftrightarrow q^0 = 1;$$

$$9) h^1 = 1 \leftrightarrow q^1 = 1;$$

$$10) p = \bigvee_{j=1}^n [(Q_j^{0(1)} \wedge Q_{ji}') \oplus Q_{ji}'].$$

Кубітна похідна, як пара вхідних наборів, являє собою тест для перевірки поодиноких константних несправностей розглянутої вхідної змінної. Нижче наведено кубітне покриття, булеві похідні і стани вхідних змінних, які відповідають значенням координат кубітного покриття (для візуального сприйняття загальної картини даних точками відзначено нульові стани координат таблиці істинності та матриці похідних):

X_1	.....11111111
X_2	.....1111.....1111
X_3	..11..11..11..11
X_4	.1.1.1.1.1.1.1.1
Q	1.....1
$Q'(X_1)$	1.....11.....1
$Q'(X_2)$	1.....1.....1.....1
$Q'(X_3)$	1.1.....1.1.....1.1
$Q'(X_4)$	11.....11.....11
Test =	111.1..11..1.111
T_{min} =	11.....11.....11

В результаті виконання операції над векторами кубітних похідних отримано тест, який містить 10 вхідних наборів $T=(1110100110010111)$. Він є тестом діагностування (надлишковим перевіряльним) для поодиноких константних несправностей цифрової логічної схеми. Процедура мінімізації тесту з урахуванням структури схеми шляхом знаходження квазі-мінімального покриття всіх вхідних змінних нульовими та одиничними підмножинами кубітних похідних видає результат з шести тестових наборів, (точками відзначено координати

неперевірюваними несправностями). Мінімальний тест для логічної схеми Шнейдера містить шість вхідних послідовностей, які перевіряють 100

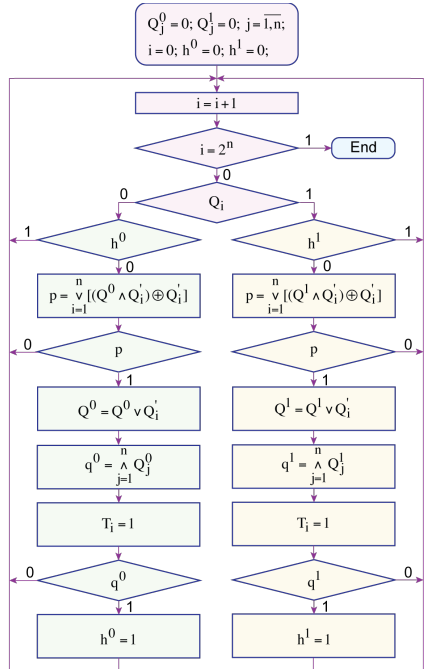


Рис. 5. Алгоритм пошуку квазіоптимального тесту

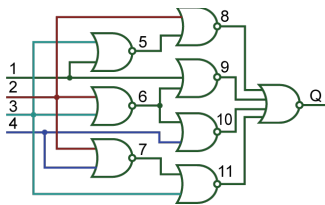


Рис. 6. Логічна схема Шнейдера для синтезу тесту

Test	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	FD	FC
000011100001	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	0	50	50
000111000010	.	.	.	0	.	.	1	.	.	.	0	1	16	66
011100001000	.	.	.	.	.	1	.	0	.	.	.	.	12	75
100001110000	0	.	.	.	1	.	.	0	.	.	.	1	16	87
111000000100	.	.	.	.	.	1	.	.	.	0	.	1	12	91
111100000001	0	0	0	0	.	.	.	1	1	1	1	0	37	100
$U =$	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X		

відсотків поодиноких константних несправностей для вхідних, внутрішніх і вихідних ліній пристрою.

Проведені експерименти мінімізації тестів над 16 фрагментами цифрових пристроїв (4-10 вхідних змінних) свідчать про таке: 1) у 25 відсотках випадків були отримані оптимальні тести; 2) у 70 відсотках випадків тести відрізнялися від оптимальних не більше, ніж на 25 відсотків; 3) у 5 відсотках випадків тести були близькі до вичерпної кількості вхідних послідовностей; 4) обчислювальна складність запропонованого кубітного методу синтезу мінімального тесту для логічної функціональності від n змінних визначається оцінкою, яка формує часові витрати на взяття кубітних похідних і мінімізацію тесту: $E = 2n + 2n^2 = 2n(n + 1)$.

Метод синтезу тестів на основі використання кубітних похідних дозволяє генерувати вхідні набори, які перевіряють всі поодинокі константні несправності вхідних і внутрішніх ліній. Однак для синтезу мінімального тесту необхідно використовувати структуру цифрового пристрою.

Кубітно-дедуктивний метод аналізу несправностей базується на аналітичній інтерпретації таблиці кубітних похідних $Q'(X)$, поверненої на 90 градусів для подальшого моделювання несправностей. Практично процедура формування вихідного списку (вектора) транспортовуваних поодиноких константних несправностей $L(X)$ полягає в диз'юнкції списків транспортовуваних несправностей, записаних за одиничними значеннями координат рядка таблиці похідних, помноженої на заперечення кон'юнкцій, записаних за нульовими координатами рядка таблиці похідних:

$$L^S(X) = \bigvee_{i=1}^{2^n} \{ \bigvee_{X_{ij}=1} L(X_{ij}) \} \& \{ \overline{\bigwedge_{X_{ij}=0} L(X_{ij})} \} = \bigvee_{i=1}^{2^n} \{ \bigvee_{X_{ij}=1} L(X_{ij}) \} \& \{ \bigvee_{X_{ij}=0} \bar{L}(X_{ij}) \}.$$

x_1	x_2	x_3	x_4	Y
0	0	0	0	1
0	0	0	1	0
0	0	1	0	0
0	0	1	1	0
0	1	0	0	0
0	1	0	1	0
0	1	1	0	0
0	1	1	1	0
1	0	0	0	0
1	0	0	1	0
1	0	1	0	0
1	0	1	1	0
1	1	0	0	0
1	1	0	1	0
1	1	1	0	0
1	1	1	1	0

X_1	X_2	X_3	X_4	$L^S(X)$
1	1	1	1	$X_1 \vee X_2 \vee X_3 \vee X_4$
0	0	0	1	$X_4(\overline{X_1 X_2 X_3})$
0	0	1	0	$X_3(\overline{X_1 X_2 X_4})$
0	0	0	0	$X_1 X_2 X_3 X_4$
0	1	0	0	$X_2(\overline{X_1 X_3 X_4})$
0	0	0	0	$X_1 X_2 X_3 X_4$
0	0	0	0	$X_1 X_2 X_3 X_4$
1	0	0	0	$X_1(\overline{X_2 X_3 X_4})$
1	0	0	0	$X_1(\overline{X_2 X_3 X_4})$
0	0	0	0	$X_1 X_2 X_3 X_4$
0	0	0	0	$X_1 X_2 X_3 X_4$
0	1	0	0	$X_2(\overline{X_1 X_3 X_4})$
0	0	0	0	$X_1 X_2 X_3 X_4$
0	0	1	0	$X_3(\overline{X_1 X_2 X_4})$
0	0	0	1	$X_4(\overline{X_1 X_2 X_3})$
1	1	1	1	$X_1 \vee X_2 \vee X_3 \vee X_4$

Використовуючи цю формулу, далі синтезуються таблиці виразів для дедуктивного моделювання поодиноких несправностей з кількістю термів, що дорівнює розмірності або довжині кубітного покриття. Запис термів ДНФ за одиничними значеннями стовпців-похідних (права таблиця) являє собою наближені умови транспортування списків вхідних поодиноких несправностей на вхідних наборах, що задаються відповідними адресами рядків (0000, 0001 ...). Другий рядок таблиці свідчить про транспортування на вихід функціональності всіх дефектів

від першого входу за винятком всіх тих, які будуть одночасно присутніми на входах 2,3,4.

При наявності в рядку таблиці всіх нульових координат виконується логічний перетин списків поодиноких несправностей для всіх входів, які будуть транспортуватися на вихід функціональності. Точні формули дедуктивного моделювання мають недолік великої розмірності, оскільки для кожного вхідного вектора необхідно будувати не один терм, а ДНФ, яка за розміром має верхньою межею таблицю істинності.

На рис. 7 представлені списки-вектори вхідних дефектів, які необхідно транспортувати через примітив, схему Шнейдера, на шести тестових наборах 0000, 0001 0010, 0100, 1000, 1111. Один результат, як вектор вихідних несправностей, що перевіряються на вхідному наборі 0000, отримано завдяки використанню першого стовпчика матриці похідних векторних похідних $Q'(X)$ для моделювання поодиноких

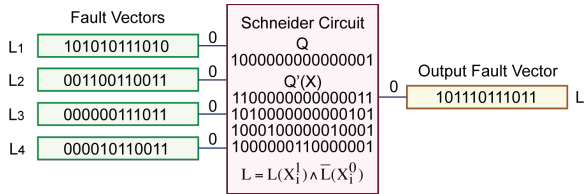


Рис. 7. Транспортування векторів несправностей

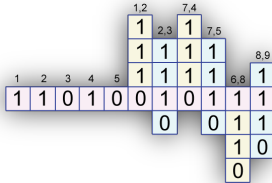
константних дефектів. Кожна несправність з вхідного списку вектора є інверсною відносно тестового стану даної вхідної змінної. Решта результатів моделювання вхідних несправностей на шести вхідних наборах (Test Column) шляхом використання стовпців матриці похідних (Derivatives) для прикладу Шнейдера, представлені нижче:

Input Faults	Test Column	Derivatives	Output Faults	Для підвищення продуктивності дедуктивного аналізу несправностей можна пожертвувати кількома відсотками точності, яка істотно не впливає на проектування
101010111010	0 1 0 0 0 1	1 1 0 0 0 1	111111111111	
001100110011	0 0 1 0 0 1	1 0 1 0 0 1	000010000000	
000000111011	0 0 0 1 0 1	1 0 0 1 0 1	000000000000	
111101001100	0 0 0 0 1 1	1 0 0 0 1 1	000000000000	
			010001000100	
			111111111111	

цифрових систем великої розмірності. Неточність кубітно-дедуктивного методу пов'язана з виявленням несправностей, які є наслідком багатовимірної активізації дефектів на лініях східних розгалужень. Виграшом від використання практично орієнтованого методу є істотне зменшення витрат пам'яті для зберігання структур даних, а також технологічність та висока швидкодія реалізації алгоритму дедуктивного аналізу, заснованого тільки на використанні векторів кубітних похідних.

У четвертому розділі пропонується квантовий метод моделювання справної поведінки за рахунок тетору-Driven реалізації кубітних структур даних. Структурна організація кубітних даних для моделювання справної поведінки цифрової логічної схеми на тестовому наборі наведена на рис. 8.

Горизонтальний вектор М формує структуру зв'язків кубітних покриттів, а вертикальні стовпчики являють собою кубітні Q-вектори, які рухаються вгору-вниз для формування станів комірок вектору моделювання. Кубітні покриття цифрової логічної схеми, що має п'ять вхідних змінних, чотири внутрішніх і дві вихідних, представлені такими двома векторами:



Q ₁₀	0011001100110000 0011001111111111
Q ₁₁	0111011101110000 0111011101110000

Вони призначені для синтезу тестів на основі отримання булевих похідних шляхом зустрічного зсуву частин кубіта з подальшим обчисленням паралельної операції хог і занесенням результатів за згаданими частинами:

Рис. 8. Структури кубітних даних для логічної схеми

$$Q'(X) = \{Q_i^L, Q_i^R\} = Q_i^L \oplus Q_i^R, i = 1, 2^{k-1}, k = \overline{1, n}.$$

Оскільки схема має п'ять вхідних змінних, то п'ять булевих похідних формують відповідну матрицю, яка одиничними значеннями координат вказує на зміну стану виходу на парі вхідних тестових наборів. Наведені нижче таблиці ілюструють процес і результат мінімізації тесту для перевірки несправностей всіх ліній логічної схеми:

Q ₁₀	0011001100110000 0011001111111111
Q ₁	00000000x100xxx1 00000000x100xxx1
Q ₂	000000x1000000x1 x100x100x100x100
Q ₃	0000000000x100x1 0000000000000000
Q ₄	xxxxxxxxxxx10000 xxxxxxxx100000000
Q ₅	0000000000000000 0000000000000000
T(Q ₁₀)=	0000000101010001 0100010101000101

Q ₁₁	0111011101110000 0111011101110000
Q ₁	0000000000000000 0000000000000000
Q ₂	00000xx100000xx1 00000xx100000xx1
Q ₃	0000000000xx10xx1 0000000000xx10xx1
Q ₄	x0x0x0x010100000 x0x0x0x010100000
Q ₅	xx00xx0011000000 xx00xx0011000000
T(Q ₁₁)=	0000000111110001 0000000111110001

Об'єднання двох тестів для кожного з виходів дає результат, який містить дванадцять тестових наборів і перевіряє поодинокі константні несправності вхідних, внутрішніх і вихідних ліній логічної схеми:

$$\begin{aligned} T_{10} &= 0000000101010001 0000000101000001 \\ T_{11} &= 0000000111110001 0000000111110001 \\ T &= 0000000111110001 0000000111110001 \end{aligned}$$

Метод синтезу тестів за кубітними покриттями логічної схеми має такі пункти: 1) Обчислення кубітного покриття логічної схеми за допомогою структурно-функціональної моделі. 2) Визначення кубітних похідних на основі використання кубітного покриття за формулою зустрічного зсуву його частин і виконання хог-операцій над ними: $Q'(X) = \{Q_i^L, Q_i^R\} = Q_i^L \oplus Q_i^R, i = 1, 2^{k-1}, k = \overline{1, n}$. 3) Мінімізація кількості одиничних координат в матриці кубітних покриттів на основі об'єднання умов для активізації вхідних логічних змінних. 4) Верифікація отриманого тесту методом моделювання дефектів для

отримання таблиці несправностей в цілях проведення діагностичного експерименту і пошуку дефектів заданого класу.

Хмарний сервіс "Quantum modeling" реалізований на платформі Google, яка забезпечує засоби для реалізації інфраструктурних мікро-сервісів зберігання даних і доступу до них, кібер захисту хмарної функціональності і автентифікації користувачів. Сервіс представлений доменно і IP-ідентифікованою структурою кіберфізичних компонентів, які реалізують моделювання цифрових пристроїв в контейнерно-орієнтованому середовищі Docker, що працює в Google Computing Engine. Інфраструктуру сервісу моделювання наведено на рис. 9.

Для отримання статистичної інформації та верифікації Quantum Modeling було проведено 10 експериментів на логічних схемах з бібліотеки ISCAS, а також на інших структурах: 1) Adder SP. 2) Circuit Schneider. 3) Circuit C5. 4) Circuit C17. 5) RFO Circuit. 6) MUX16 Circuit. 7) DFA

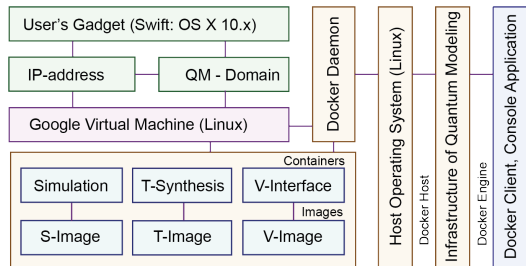


Рис. 9. Інфраструктура сервісу моделювання

Circuit. 8) Hasse processor. 9) DC4-16 Circuit. 10) Circuit C432. Порівнянню підлягали час введення схемної структури (Modeling Time), а також час проектування діагностичної інформації (Designing Time), до якого входять: введення моделі пристрою, синтез і аналіз тестів для отримання таблиці несправностей. Базовим варіантом для порівняння послужив продукт Active HDL, Aldec Inc., де інформація про моделі схеми вводилася VHDL мовою опису апаратури. Статистика порівняння двох часів: Modeling Time і Designing Time представлена на рис. 10 і 11 відповідно.

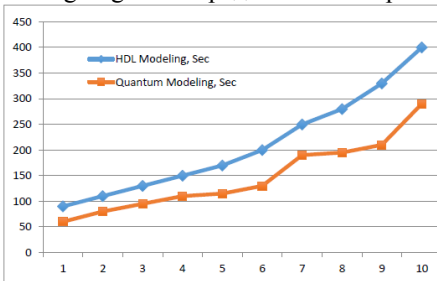


Рис. 10. Аналіз часу введення логічних схем

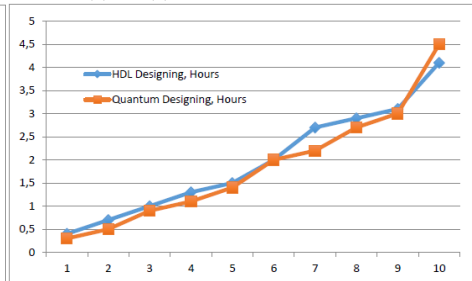


Рис. 11. Аналіз часу проектування логічних схем

ВИСНОВКИ

Проведені науково-технологічні дослідження в рамках дисертаційної роботи характеризуються успішним вирішенням актуальної науково-практичної задачі квантового проектування, моделювання і тестування цифрових пристроїв і компонентів на основі використання *metoгу-driven* кубітних структур даних, вільних від застосування логіки.

Автором одержано такі наукові та практичні результати:

1) Нова модель метричної взаємодії класичного та квантового комп'ютингу, яка характеризується взаємно-однозначною відповідністю за параметрами паралелізму, суперпозиційності та переплутування в обох видах обчислень, що дає можливість реалізувати квантовий комп'ютинг в класичному виконанні за рахунок збільшення пам'яті. Модель охоплює всі метричні компоненти, необхідні для реалізації комп'ютингу.

2) Удосконалений метод невизначених коефіцієнтів для мінімізації булевих функцій, який відрізняється від класичного унітарним кодуванням даних для паралельного виконання логічних операцій отримання двох векторів, відповідних мінімальній диз'юнктивній і кон'юнктивній нормальним формам. Паралельне виконання операції суперпозиції над нульовими і одиничними станами вхідних змінних, представленими унітарними кодами, дає можливість підвищити швидкодію за рахунок надлишкової пам'яті.

3) Удосконалений кубітний метод пошуку дефектів, який відрізняється від існуючого унітарним кодуванням таблиці перевірюваних дефектів для паралельного виконання логічних операцій над нульовими і одиничними станами вхідних змінних, що дає можливість підвищити швидкодію за рахунок надлишкової пам'яті.

4) Розвинений квантовий метод синтезу тестів для логічних функціональностей за рахунок використання булевих похідних за змінними на кубітних структурах даних, що дає можливість підвищити швидкодію методу шляхом паралельного виконання логічних операцій. Метод дозволяє згенерувати вхідні набори для перевірки всіх поодиноких константних несправностей вхідних і внутрішніх ліній схеми.

5) Розвинений квантовий метод моделювання справної поведінки за рахунок *metoгу-driven* реалізації кубітних структур даних, що дає можливість використовувати транзакційні адресно-орієнтовані процедури аналізу цифрових пристроїв, які виключають логічні операції. Структури даних для кубітного опису цифрових пристроїв і компонентів відрізняються компактністю і високим паралелізмом їх обробки.

6) Розроблені хмарні сервіси синтезу та аналізу кубітних моделей цифрових пристроїв і компонентів, протестовані на різних прикладах комбінаційних схем. Отримані результати підтверджують висновок, що з'єднання квантового комп'ютингу з його хмарним виконанням є вдалою технологічною зв'язкою для вирішення задач кіберфізичного формату, орієнтованого на проектування і тестування цифрових систем і програмно-апаратних компонентів.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Hahanov V. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services [4. Hahanov I., Iemelianov I., Liubarskyi M., Hahanov V. Qubit Description of the Functions and Structures for Service Computing Synthesis; 5. Hahanov V., Bani Amer T., Iemelianov I., Liubarskyi M. Quantum Computing for Test Synthesis; 6. Hahanov I., Bani Amer T., Iemelianov I., Liubarskyi M., Hahanov V. QuaSim – Cloud Service for Quantum Circuits Simulation.] – New York. – Springer. – 2018.– С. 73-143.
2. Hahanov V. Matrix-Model for Diagnosing SoC HDL-Code / V. Hahanov, E. Litvinova, V. Obrizan, I. Yemelyanov // Radioelektroniks and informatics.– 2013.– №1.– Р. 12-19. (Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, OECSP, OAJI, Scholar Steer, SIS, Cyberleninka, CiteFactor, TIU Hannover, I2OR).
3. Хаханов В.И. Процессорные структуры для анализа Big Data / В.И. Хаханов, Е.И. Литвинова, С.В. Чумаченко, И.В. Емельянов, Т. Bani Amer // Радиоелектронні і комп'ютерні системи. – 2016.– № 6 (80).– С. 163-175. (Входить до міжнародних бібліометричних і наукометричних баз даних: наукової електронної бібліотеки eLIBRARY.RU (Російська Федерація); Index Copernicus (Польща); INSPEC IDEAS (Institution of Engineering and Technology, Великобританія); CiteFactor; Academic Keys; Infobase Index; Google Scholar).
4. Bani Amer T. Кубитная форма описания вычислительных структур / Т. Bani Amer, С.В. Чумаченко, И.В. Емельянов // Радиоэлектроника и информатика. – 2016. – № 1.– С.47-52. (Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, OECSP, OAJI, Scholar Steer, SIS, Cyberleninka, CiteFactor, TIU Hannover, I2OR).
5. Хаханов В.И. Синтез Q-тестов по кубитному описанию функциональностей / В.И. Хаханов, Т. Bani Amer, И.В. Емельянов, М.М. Любарский // Радиоэлектроника и информатика.– 2016.– № 2(72).– С. 38-48. (Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, OECSP, OAJI, Scholar Steer, SIS, Cyberleninka, CiteFactor, TIU Hannover, I2OR).
6. Хаханов В.И. Кубитный метод дедуктивного анализа неисправностей для логических схем / В.И. Хаханов, И.В. Емельянов, М.М. Любарский, С.В. Чумаченко, Е.И. Литвинова, Т. Бани Амер // Электронное моделирование.– 2017.– Том 39, № 6.– С. 59-92 [Входить до міжнародних наукометричних баз Cambridge Scientific Abstracts, Computer and Information Systems Abstracts, INIS Collection, Inspec, ВИНТИ РАН].
7. Хмарний сервіс для тестування і верифікації систем на кристалах / Є.І. Литвинова, І.В. Емельянов, І.В. Хаханов // Радиоэлектроника и информатика.– 2017.– №3.– С. 60-69. (Входить до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, OECSP, OAJI, Scholar Steer, SIS, Cyberleninka, CiteFactor, TIU Hannover, I2OR).

8. Емельянов И.В. Квантовые модели и облачные сервисы для анализа и диагностирования логических схем / И.В. Емельянов, М.М. Любарский, В.И. Хаханов // Радиоэлектроника и информатика. – 2017. – № 4.– С.28-45. (Входит до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, OECSP, OAJI, Scholar Steer, SIS, Cyberleninka, CiteFactor, TIU Hannover, I2OR)
9. Хаханов В.И. Квантовый метод синтеза тестов на основе кубитных структур данных / В.И. Хаханов, И.В. Емельянов, М.М. Любарский, С.В. Чумаченко, Е.И. Литвинова // Электронное моделирование.– 2018.– Том 40, № 1.– С. 63-80 [Входит до міжнародних наукометричних баз Cambridge Scientific Abstracts, Computer and Information Systems Abstracts, INIS Collection, Inspec, ВИНТИ РАН].
10. Hahanov V. Cloud-driven Cyber Managing Resources / V. Hahanov, S. Chumachenko, E. Litvinova, O. Mishchenko, I. Yemelyanov, Bani Amer Tamer // Australian Journal of Scientific Reseach.– № 1(5).– 2014.– С. 202-215.
11. Hahanov V. Quantum Data Structures for SoC Component Testing / V. Hahanov, W. Gharibi, S. Chumachenko, E. Litvinova, I. Iemelianov, M. Liubarskyi // International Journal of Design, Analysis & Tools for Integrated Circuits & Systems.– Oct. 2017.– Vol. 6, iss. 1.– P. 23. (Входит до міжнародної наукометричної бази EBSCO Information Services).
12. Хаханов В.И. Gartner 2017 топ-технологии: их анализ и применение / В.И. Хаханов, А.С. Мищенко, И.В. Емельянов, М.М. Любарский, Т.И. Соклакова, В.Г. Абдулаев // Paradigmata poznání. Vědecko vydavatelské centrum «Sociosféra-CZ», s.r.o., Praha, Česká republika. – 2017. – №4. – P. 33-62. (The journal is indexed by Electronic Research Library, Russia; Research Bible, China; Scientific Indexing Services, USA; Cite Factor, Canada; General Impact Factor, India; Scientific Journal Impact Factor, India; CrossRef, USA; ORCID, USA).
13. Bani Amer T. Компьютерные модели облачных сервисов / Т. Bani Amer, В.И. Хаханов, И.В. Емельянов, М. Любарский // АСУ и приборы автоматики.– 2015.– Вып. 173.– С.48-57. (Входит до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Cyberleninka).
14. Bani Amer T. Синтез и анализ кубитных моделей цифровых систем / Т. Bani Amer, И.В. Хаханов, Е.И. Литвинова, И.В. Емельянов // АСУ и приборы автоматики.– 2016.– Вып. 174.– С. 24-41. (Входит до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Cyberleninka).

які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

15. Emelyanov I. Qubit Modeling Digital Systems / I. Emelyanov, I. Hahanova, T. Bani Amer // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium. – Kiev, 26-29 September.– 2014. – P. 246-248. (Входит до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).
16. Hahanova A. Metric for Analyzing Big Data / A. Hahanova, Yu. Hahanova, I. Yemelyanov, V. Obrizan, D. Krulevska, M. Skorobogatiy // Матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції CADSM 2015 «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці».– 24-27

- лютого, 2015.– Львів – Поляна.– С.81-83. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).
17. Hahanov V. «Quantum» diagnosis and simulation of SOC / V. Hahanov, I. Yemelyanov, V. Obrizan, I. Hahanov // Proc. of XIth International Conference “Perspective Technologies And Methods In Mems Design”.– Lviv-Polyana.– 2-6 September, 2015.– P.58-60. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).
18. Hahanov V. «Quantum» Processor for Digital Systems Analysis / V. Hahanov, W. Gharibi, I. Iemelianov, D. Shcherbin // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium (EWDTS-2015).– 2015.– Batumi, Georgia.– P. 104-110. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).
19. Soklakova T. Technological culture of Big Data / T. Soklakova, I. Iemelianov, T. Bani Amer, I. Hahanov // Матеріали XIII Міжнародної конференції TCSET 2016.– 23-26 лютого, 2016.– Львів – Славське.– С.549-554. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).
20. Hahanov I. QuaSim – Cloud Service for Digital Circuits Simulation / I. Hahanov, W. Gharibi, I. Iemelianov, T. Bani Amer // Proceedings of IEEE East-West Design & Test Symposium.– 2016.– Yerevan, Armenia.– P. 363-370. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).
21. Hahanov I. Deductive qubit fault simulation / I. Hahanov, I. Iemelianov, T. Bani Amer, D. Timofieiev, S. Chumachenko, V. Hahanov, L. Larchenko // Матеріали XIV Міжнародної науково-технічної конференції CADSM 2017 «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці».– 21-25 лютого, 2017.– Львів – Поляна.– С.256-259. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).
22. Hahanov V. Qubit test synthesis for the black box functionalities / V. Hahanov, E. Litvinova, S. Chumachenko, I. Iemelianov, M. Liubarskyi // Proc. of 5th Prague Embedded Systems Workshop.– June 29-30, 2017.– Roztoky u Prahy, Czech Republic.– P.45-51.
23. Hahanov V. Quantum Sequencer for the Minimal Test Synthesis of Black-box Functionality / V. Hahanov, S. Chumachenko, I. Hahanova, I. Iemelianov, I. Hahanov // Proc. of IEEE East-West Design and Test Symposium.– Novi Sad.– October, 2017.– P.445-450. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).
24. Hahanov V. Quantum Data Structures for SoC Component Testing / V. Hahanov, W. Gharibi, K. L. Man, S. Chumachenko, E. Litvinova, I. Iemelianov, M. Liubarskyi // The International Conference on Recent Advancements in Computing, IoT and Computer Engineering Technology.– The Tamkang University.– Taipei, Taiwan.– 2017.– 7 p.
25. Емельянов И.В. Models of Quantum Sequential Primitives / И.В. Емельянов, Д.И. Тимофеев, Б.Д. Ларченко // Матеріали XXI Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке».– 25-27 апреля, 2017.– Ч. 5.– С.70-71.

які додатково відображають наукові результати дисертації:

26. Емельянов И. Телеметрический модуль «SherLock» для управления мобильными объектами / И. Емельянов, А. Котляров // Материалы XVII Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – Ч. 5. – 22-24 апреля, 2013. – С. 64-65.
27. Van Amer T. Киберкомпьютинг – новый бренд IoT-рынка / Т. Van Amer, И. Емельянов // Материалы XX Международного молодежного форума «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке». – 2016. – Ч. 5. – С.36-37.

АНОТАЦІЯ

Емельянов Игорь Валерійович. Моделі та методи кубітного тестування цифрових пристроїв на основі memoгу-driven структур даних. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

Мета дослідження – розробка квантових методів паралельного синтезу та аналізу цифрових пристроїв і компонентів для істотного підвищення швидкодії програмних хмарних сервісів і зменшення часу проектування програмно-апаратних комп'ютерних систем за рахунок збільшення пам'яті для зберігання кубітних структур даних. Основні результати: модель метричної взаємодії класичного та квантового комп'ютингу, яка характеризується взаємно-однозначною відповідністю за параметрами паралелізму, суперпозиційності та переплутування в обох видах обчислень, що дає можливість реалізувати квантовий комп'ютинг в класичному виконанні за рахунок збільшення пам'яті; метод невизначених коефіцієнтів для мінімізації булевих функцій, який відрізняється від класичного унітарним кодуванням даних для паралельного виконання логічних операцій в цілях отримання двох векторів, відповідних мінімальній диз'юнктивній і кон'юнктивній нормальним формам; кубітний метод пошуку дефектів, який відрізняється від існуючого унітарним кодуванням таблиці дефектів, що перевіряються, для паралельного виконання операцій; квантовий метод синтезу тестів для логічних функціональностей за рахунок використання булевих похідних за змінними на кубітних структурах даних; квантовий метод моделювання справної поведінки за рахунок memoгу-driven реалізації кубітних структур даних, що дає можливість використовувати транзакційні адресно-орієнтовані процедури аналізу цифрових пристроїв, які виключають логічні операції.

Ключові слова: кубіт, кубітне покриття, квантове проектування, моделювання і тестування, верифікація, діагностування, memoгу-driven кубітні структури даних, цифрові системи на кристалах, квантові обчислення.

АННОТАЦИЯ

Емельянов Игорь Валерьевич. Модели и методы кубитного тестирования цифровых устройств на основе memory-driven структур данных.– На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.05 – компьютерные системы и компоненты.– Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Цель исследования – разработка квантовых методов параллельного синтеза и анализа цифровых устройств и компонентов для существенного повышения быстродействия программных облачных сервисов и уменьшения времени проектирования программно-аппаратных компьютерных систем за счет увеличения памяти для хранения кубитных структур данных.

Объект исследования – технологии квантового параллельного компьютеринга на классических вычислительных устройствах, использующие memory-driven кубитные структуры данных без применения логических элементов. Предмет исследования – модели, методы, алгоритмы и средства квантового синтеза и анализа цифровых устройств и компонентов на основе использования кубитных memory-driven структур данных без применения логических элементов. Сущность исследования заключается в разработке облачных сервисов, моделей и методов квантового синтеза и анализа memory-driven кубитных моделей цифровых устройств и компонентов для существенного повышения быстродействия средств проектирования, тестирования, моделирования и диагностирования неисправностей.

Основные результаты: 1. Впервые предложена модель метрического взаимодействия классического и квантового компьютеринга, которая характеризуется взаимно-однозначным соответствием по параметрам параллелизма, суперпозиционности и перепутывания в обоих видах вычислений, что дает возможность реализовать квантовый компьютеринг в классическом исполнении за счет увеличения памяти. 2. Усовершенствован метод неопределенных коэффициентов для минимизации булевых функций, который отличается от классического унитарным кодированием данных для параллельного выполнения логических операций в целях получения двух векторов, соответствующих минимальной дизъюнктивной и конъюнктивной нормальным формам. 3. Усовершенствован кубитный метод поиска дефектов, который отличается от существующего унитарным кодированием таблицы проверяемых дефектов для параллельного выполнения операций, что дает возможность привести вычисления к логической разности двух векторов, соответствующих единичному и нулевому значению состояний-реакций выходов цифрового устройства при выполнении тест-эксперимента. 4. Получил дальнейшее развитие квантовый метод синтеза тестов для

логичеких функциональностей, который отличается от аналога использованием булевых производных по переменным на кубитных структурах данных, что дает возможность повысить быстродействие метода, благодаря параллельному выполнению логических операций. 5. Получил дальнейшее развитие квантовый метод моделирования исправного поведения, который отличается от аналога memory-driven реализацией кубитных структур данных, что дает возможность использовать транзакционные адресно-ориентированные процедуры анализа цифровых устройств, исключая логические операции.

Практическое значение полученных результатов. Разработаны облачные сервисы синтеза и анализа кубитных моделей цифровых устройств и компонентов, которые протестированы на различных примерах комбинационных схем и прошли исчерпывающую апробацию моделей и методов при изучении курсов «Квантовые вычисления», «Схемотехническое проектирование и моделирование СБИС», «Проектирование и тестирование цифровых устройств на ПЛИС», «Компьютерная логика». Среда проектирования: SWIFT, C++, Verilog, Java Script, Python 2.7 и платформы: Microsoft Windows, X Window и Macintosh OS X, Google Cloud Platform, Daemon Docker Engine.

Ключевые слова: кубит, кубитное покрытие, квантовое проектирование, моделирование и тестирование, верификация, диагностирование, memory-driven кубитные структуры данных, цифровые системы на кристаллах, квантовые вычисления.

ABSTRACT

Igor Valerievich Iemelianov. Models and methods for qubit testing digital devices based on memory-driven data structures. – Manuscript.

PhD thesis (candidate degree of technical sciences) in speciality 05.13.05 – Computer Systems and Components. – Kharkiv National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2018.

The goal of the investigation is to develop quantum methods for parallel synthesis and analysis of digital devices and components to significantly improve the performance of cloud software services and reduce the design time of software and hardware computing systems through increasing memory for storing qubit data structures.

The main results are the following: 1) a new model of the metric interaction of classical and quantum computing, which is characterized by a one-to-one correspondence of the parameters of parallelism, superposition and entanglement in both types of computing; this makes it possible to realize quantum computing in the classical execution through increasing the memory; 2) an improved method of undetermined coefficients for minimizing Boolean functions, which differs from

the classical one by unitary coding of data for parallel execution of logical operations in order to obtain two vectors corresponding to the minimal disjunctive and conjunctive normal forms; 3) an improved qubit method of fault detection, which differs from the existing one by unitary encoding of the fault detection table for parallel execution of operations, which makes it possible to reduce the calculations to the logical difference of two vectors corresponding to the unit and zero values of states-responses of the digital device outputs during the test experiment; 4) a quantum method for test synthesis of logical functionalities has been further developed through the use of Boolean derivatives with respect to variables on qubit data structures, which makes it possible to increase the performance of the method through the parallel execution of logical operations; 5) a quantum method for fault-free simulation is further developed through the memory-driven implementation of qubit data structures, which makes it possible to use transactional address-focused procedures for analyzing digital devices free of logical operations.

Key words: qubit, qubit coverage, quantum design, simulation and test, verification, diagnosis, memory-driven qubit data structures, digital system-on-chip, quantum computing.

Підп. до друку 18.04.18. Формат 60x84¹/₁₆. Папір друк.; Умов. друк. арк. 0,9

Облік. вид. арк. 1,0. Зам. № б/н; Тираж 100 прим.

Надруковано у видавництві ЧП “Степанов В.В.”

61168, Харків, вул. акад. Павлова, 311