

ВІДЗИВ ОФІЦІЙНОГО ОПОНЕНТА

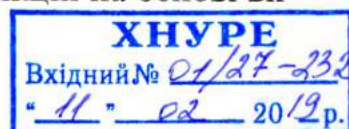
на дисертаційну роботу Любарського Михайла Михайловича на тему «Квантові моделі та методи аналізу логічних Х-функцій», подану на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Квантовий комп'ютинг та хмарні обчислення є одними з пріоритетних напрямів розвитку цифрового світу, що дозволяють істотно підвищити продуктивність та зменшити вартість реалізації цифрового моніторингу та метричного інтелектуального керування всіма процесами та явищами для підвищення якості життя людей і збереження екології планети. Стратегія створення квантового комп'ютингу полягає в одночасній розробці квантової апаратури і квантових програмних додатків на основі паралельних алгоритмів. Ці дві напрями розвитку квантового комп'ютингу надає можливість проектувати, моделювати та верифікувати квантові алгоритми і програмні додатки на класичних комп'ютерах для їх подальшої імплементації в квантові комп'ютери. Моделювання на класичних комп'ютерах паралельних квантових алгоритмів дає істотний приріст продуктивності за рахунок використання надлишкової пам'яті для унітарного кодування кубітних структур даних. Проектування та тестування є найбільш передовим напрямом діяльності науковців, що спрямована на створення нових технологій комп'ютингу з урахуванням швидкодії, енергозбереження, компактності і надійності. Отже, квантові паралельні методи та алгоритми проектування, тестування, верифікації, моделювання і діагностування цифрових виробів на кубітних структурах даних є *актуальними* при їх імплементації в сучасні класичні та у майбутні квантові комп'ютери.

Тема дисертаційної роботи пов'язана зі створенням теорії і методів квантового memory-driven проектування і тестування цифрових систем, орієнтованих на паралельні алгоритми синтезу та аналізу кубітних структур даних, що імplementовані у emerging memory-driven quantum computing.

Науково-практична задача дослідження – верифікація спеціалізованих цифрових систем на кристалах шляхом використання memory-driven архітектур і кубітних структур даних для компактного опису логічних Х-функцій та істотного підвищення продуктивності методів синтезу тестів і дедуктивного моделювання несправностей за рахунок паралельного комп'ютингу алгоритмів.

Сутність дослідження полягає у створенні квантових моделей і методів синтезу тестів та аналізу несправностей логічних Х-функцій на основі ви-



користання кубітних структур даних і memory-driven архітектур для паралельного комп'ютингу алгоритмів з метою істотного підвищення продуктивності тестування і дедуктивного моделювання цифрових систем на кристалах.

Автором поставлено та вирішено такі *задачі*: 1) Розробити memory-driven архітектури та алгоритми для паралельного виконання логічних операцій над кубітними структурами даних у ході реалізації методів тестування та верифікації цифрових систем на кристалах. 2) Удосконалити квантові методи генерації тестів і дедуктивного моделювання несправностей логічних функцій шляхом синтезу матриць булевих похідних за їхнім кубітним покриттям. 3) Розробити структурну модель метричних властивостей Х-функцій, орієнтовану на виконання паралельних операцій, з метою отримання лінійного часу генерації тестів і моделювання цифрових систем. 4) Розробити аналітичну модель для отримання кубітних покриттів Х-функцій від кінцевого числа змінних з метою створення логічних схем, які не вимагають експоненційних витрат на синтез і аналіз тестів. 5) Розробити паралельний метод генерації тестів для несправностей Х-функцій від кінцевого числа змінних на основі взяття похідних за кубітним покриттям, які формують тести мінімальної довжини. 6) Розробити паралельний метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання Х-функцій на основі отримання одиначної матриці похідних з метою створення секвенсора моделювання дефектів.

Результати дисертації отримано відповідно до планів держбюджетних НДР і господарських договорів, виконуваних на кафедрі АПОТ Харківського національного університету радіоелектроніки в період з 2015 року, у тому числі: 1) Договір про дружбу та співробітництво між ХНУРЕ та компанією «Aldec Inc.» (USA) № 04 від 01.11.2011; 2) Curricula Development for New Specialization: Master of Engineering in Microsystems Design 530785-TEMPUS-1-2012-1-PL-TEMPUS-JPCR MastMST (2012-2016); 3) Фундаментальна держбюджетна НДР №297 "Cyber Physical System – Smart Cloud Traffic Control" (2015-2017), № ДР 0115U-000712; 4) Фундаментальна держбюджетна НДР № 316 "Cyber Physical System – Smart Cyber University" (2017-2019), № ДР 0117U-0002524.

Характеристика основних розділів роботи.

Вступна частина містить обґрунтування актуальності розв'язуваних задач, визначення мети, об'єкту, предмету і завдань дослідження; наукову новизну і практичну значущість результатів дослідження, відомості про публікації та апробацію отриманих результатів.

Перший розділ присвячено розгляду розвитку сучасних моделей, методів, алгоритмів і архітектур квантового комп'ютингу для тестування і моделювання цифрових систем з метою створення теорії і практики квантового проектування цифрових систем. Визначено вузькі місця і переваги найбільш затребуваних моделей і методів, опублікованих в спеціальній літературі: ма-

теріали конференцій, журнали, інтернет-видання. На основі огляду і аналізу публікацій в області тестування і верифікації спеціалізованих логічних схем зроблено висновки про актуальність дослідження, сформульовано мету і науково-практичні завдання дослідження в рамках технологій синтезу тестів і моделювання несправностей для спеціалізованих логічних схем, включаючи Х-функції.

У *другому розділі* розглянуті та вирішені питання синтезу квантових memory-driven архітектур паралельного комп'ютингу для аналізу кубітних моделей цифрових систем і компонентів; розроблено метрики і моделі класифікації квантового комп'ютингу; створено інфраструктуру quantum design and test of memory-driven computing; розроблено метричні моделі для спільного використання квантового та класичного комп'ютингу; створено кубітні квантові архітектури для паралельних обчислень при вирішенні задач design and test. Подано архітектури і методи квантового паралельного аналізу кубітних моделей цифрових систем і компонентів для їхньої подальшої реалізації у формі сервісів-додатків.

У *третьому розділі* запропоновано структурну модель взаємодії Х-функцій і похідних компонентів, орієнтованих на синтез і аналіз цифрових систем з метою зменшення часу проектування і тестування обчислювальних пристроїв. Введено поняття простих Х-функцій від кінцевого числа змінних, які характеризуються відсутністю мінімізації та наявністю властивостей тестопригодності для вирішення завдань синтезу тестів, моделювання і діагностування. Сформульовано метричні властивості Х-функцій від кінцевого числа змінних для оцінки якості тестів, що перевіряють, шляхом дедуктивного моделювання константних несправностей на кубітних структурах даних. Запропоновано аналітичний вираз для синтезу кубітних покриттів Х-функцій від кінцевого числа змінних. Подано дедуктивні формули транспортування вхідних списків несправностей на зовнішні виходи для Х-функцій від кінцевого числа змінних для побудови секвенсора моделювання дефектів, інваріантного до вхідних тестових наборів. Запропоновано метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання несправностей на основі використання Q-покриттів функціональностей.

Четвертий розділ включає опис методу синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання несправностей на основі використання Q-покриттів функціональностей, який відрізняється від відомих аналогів оригінальністю математичних рішень, високим рівнем паралелізму і компактністю структур даних, що дає можливість використовувати його програмну (апаратну) реалізацію для синтезу, аналізу, тестування, верифікації та діагностування цифрових систем на кристалах. Подано аналітичний вираз для синтезу кубітних покриттів Х-функцій від кінцевого числа змінних, що дає можливість створювати тестопридатні логічні схеми, які не потребують експонен-

ційних витрат на синтез і аналіз тестів перевірки та діагностування несправностей. Виконано імплементацію кубітних моделей, методів і алгоритмів у програмний серверний додаток QuaSim для вирішення завдань синтезу кубітних моделей, генерування перевіряючих тестів і оцінки якості їхнього покриття для класа одиночних константних несправностей.

Результати дисертаційної роботи у вигляді у складі моделей, методів і фрагментів додатків впроваджені у навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки (акт про впровадження від 23.10.2018); у методологічне та технологічне забезпечення компанії «DIT Delight Limited» (довідка про впровадження від 25.10.2018).

Практична значущість отриманих результатів полягає у розробці моделей, структур даних, методів синтезу та аналізу логічних схем, у тому числі Х-функцій, які дають можливість суттєво зменшити час синтезу тестів і моделювання несправностей, завдяки кубітному опису цифрових схем, що дає можливість паралельно виконувати обчислювальні процедури, характерні квантовому комп'ютингу.

Висновок

Наукова новизна роботи визначається такими пунктами:

1. Вперше запропоновано структурну модель метричних властивостей Х-функцій, що орієнтована на виконання паралельних операцій на кубітних структурах даних з метою отримання лінійного часу генерації тестів і моделювання цифрових систем.

2. Вперше запропоновано аналітичну модель синтезу кубітних покриттів Х-функцій від кінцевого числа змінних, яка характеризується можливістю створення логічних схем, що не потребують експоненційних витрат на генерування і аналіз тестів перевірки несправностей.

3. Вперше запропоновано паралельний метод синтезу тестів для несправностей Х-функцій від кінцевого числа змінних, який характеризується взяттям булевих похідних за кубітним покриттям, що дає можливість отримувати перевіряючі тести мінімальної довжини.

4. Вперше запропоновано паралельний метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання Х-функцій, який характеризується отриманням одиначної матриці похідних, що дає можливість створювати секвенсор моделювання дефектів, інваріантний до вхідних тестових наборів.

5. Удосконалено memory-driven архітектури та алгоритми для реалізації методів тестування та верифікації цифрових систем на кристалах, які відрізняються паралельним виконанням логічних операцій над кубітними структурами даних.

6. Удосконалено квантові методи генерації тестів і дедуктивного моделювання несправностей логічних функцій, які відрізняються від аналогів синтезом матриць булевих похідних за їхнім кубітним покриттям.

Практичне значення отриманих результатів полягає у розробці моделей, структур даних, методів синтезу та аналізу логічних схем, у тому числі Х-функцій, які дають можливість суттєво зменшити час синтезу тестів і моделювання несправностей, завдяки кубітному опису цифрових схем, що дає можливість паралельно виконувати обчислювальні процедури, характерні квантовому комп'ютингу. Окремі сервіси синтезу та аналізу кубітних моделей цифрових пристроїв і компонентів реалізовані у вигляді програмних додатків і пройшли апробацію у навчальному процесі Харківського національного університету радіоелектроніки, а також методологічному та технологічному забезпеченні компанії «DIT Delight Limited».

Обґрунтованість теоретичних положень та наукових результатів підтверджується виконаними експериментами, тестуванням і верифікацією моделей логічних схем і синтезованих тестів.

Порівняльний аналіз змісту дисертаційної роботи та опублікованих робіт здобувача показав, що результати наукових досліджень, а саме: нова структурна модель метричних властивостей Х-функцій; нова аналітична модель синтезу кубітних покриттів Х-функцій від кінцевого числа змінних; новий паралельний метод синтезу тестів для несправностей Х-функцій від кінцевого числа змінних; новий паралельний метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання Х-функцій; удосконалені memory-driven архітектури та алгоритми для реалізації методів тестування та верифікації цифрових систем на кристалах; удосконалені квантові методи генерації тестів і дедуктивного моделювання несправностей логічних функцій відображені у 22 друкованих працях. Серед них 4 розділи у монографії (з них 4 входять до наукометричної бази Scopus), 9 статей (з них 6 – у наукових журналах, включених до «Переліку наукових фахових видань України»; 2 статті в міжнародних наукових журналах за кордоном; 9 статей входять до міжнародних наукометричних баз), а також 9 міжнародних наукових конференціях (з них 6 за кордоном, 3 входять до наукометричної бази Scopus). Здобувач має 7 публікацій у наукометричній базі Scopus та індекс Хірша $h=2$.

Автореферат відображає зміст дисертаційної роботи.

Зауваження по дисертаційній роботі:

1) Не зовсім зрозуміло, чим відрізняються кубітні структури даних від таблиць істинності, які є основою для синтезу комбінаційних схем і алгоритмів.

2) Не зовсім зрозуміло, чому автор заявляє, що кубіт може бути представлений більш, ніж двома значеннями, які перебувають у відношенні суперпозиції один з одним?

3) Неясно, на чому ґрунтуються твердження, що квантова механіка комплексних чисел є аналогом теоретико-множинного обчислення, яке, у свою чергу, має ізоморфізм з алгеброю логіки.

4) Робота присвячена синтезу та аналізу спеціального класу функцій, які неможливо мінімізувати за визначенням. У чому полягають переваги даних функцій для теорії і практики обчислень?

5) Незрозуміло, яка обчислювальна складність для алгоритмів синтезу та аналізу Х-функцій залежно від числа змінних. Яка обчислювальна складність методів дедуктивного моделювання та генерації тестів?

6) При появі масових квантових комп'ютерів на ринку чи можна звести завдання синтезу тестів або отримання мінімального покриття до лінійної обчислювальної складності?

Враховуючи викладене вище, можна зробити такий *висновок*: в дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу верифікації спеціалізованих цифрових систем на кристалах шляхом використання memory-driven архітектур і кубітних структур даних для компактного опису логічних Х-функцій та істотного підвищення продуктивності методів синтезу тестів і дедуктивного моделювання несправностей за рахунок паралельного комп'ютингу алгоритмів.

Основним результатом запропонованого дослідження є створення основ теорії і методів квантового memory-driven проектування і тестування цифрових систем, орієнтованих на паралельні алгоритми синтезу та аналізу кубітних структур даних, що імплементовані у emerging memory-driven quantum computing.

Отримано такі важливі наукові результати:

1. Нова структурна модель метричних властивостей Х-функцій, що орієнтована на виконання паралельних операцій на кубітних структурах даних з метою отримання лінійного часу генерації тестів і моделювання цифрових систем.

2. Нова аналітична модель синтезу кубітних покриттів Х-функцій від кінцевого числа змінних, яка характеризується можливістю створення логічних схем, що не потребують експоненційних витрат на генерування і аналіз тестів перевірки несправностей.

3. Новий паралельний метод синтезу тестів для несправностей Х-функцій від кінцевого числа змінних, який характеризується взяттям булевих похідних за кубітним покриттям, що дає можливість отримувати перевіряючі тести мінімальної довжини.

4. Новий паралельний метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання Х-функцій, який характеризується отриманням одиначної матриці похідних, що дає можливість створювати секвенсор моделювання дефектів, інваріантний до вхідних тестових наборів.

5. Удосконалені memory-driven архітектури та алгоритми для реалізації методів тестування та верифікації цифрових систем на кристалах, які відрізняються паралельним виконанням логічних операцій над кубітними структурами даних.

6. Удосконалені квантові методи генерації тестів і дедуктивного моделювання несправностей логічних функцій, які відрізняються від аналогів синтезом матриць булевих похідних за їхнім кубітним покриттям.

7. Практично реалізовано окремі сервіси синтезу та аналізу кубітних моделей цифрових пристроїв і компонентів у вигляді програмних додатків, що пройшли апробацію у навчальному процесі. Результати дослідження у складі моделей, методів і фрагментів додатків впроваджені в навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки (акт про впровадження від 23.10.2018); у методологічне та технологічне забезпечення компанії «DIT Delight Limited» (довідка про впровадження від 25.10.2018).

Дисертаційна робота відповідає спеціальності 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти, задовольняє вимогам пунктів 9, 11-14 “Порядку присудження наукових ступенів”, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 19 серпня 2015 № 656, а також вимогам Департаменту атестації кадрів МОН України до дисертацій на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а Любарський Михайло Михайлович заслуговує присудження наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти.

Офіційний опонент:

начальник відділу математичного
моделювання та дослідження
ядерно-фізичних процесів і систем
Національного наукового центру
“Харківський фізико-технічний інститут”
доктор технічних наук, професор

Хажмурадов М. А.

Підпис проф. Хажмурадова М.А. засвідчую:

Заст. Ген. директора ННЦ ХФТІ



Сасінатро М.В.