

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

**ЛЮБАРСЬКИЙ МИХАЙЛО МИХАЙЛОВИЧ**

УДК 658:512.011: 681.326: 519.713

**КВАНТОВІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ АНАЛІЗУ ЛОГІЧНИХ Х-ФУНКЦІЙ**

05.13.05 – комп'ютерні системи та компоненти

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана 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  
Мірошник Марина Анатоліївна, Український державний університет залізничного транспорту МОН України, професор кафедри спеціалізованих комп'ютерних систем;

доктор технічних наук, професор  
Хажмурадов Манап Ахмадович, Національний науковий центр "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України, начальник відділу математичного моделювання та дослідження ядерно-фізичних процесів і систем.

Захист відбудеться "27" лютого 2019 р. о 15-00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д64.052.01 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, місто Харків, пр. Науки, 14.

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

Автореферат розісланий "26" січня 2019 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Є.І. Литвинова

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми дослідження.** Аналітичні прогнози останніх десяти років від компанії Gartner виділяють квантовий комп'ютинг як тригерну інноваційну технологію, в яку вкладаються мультиміліардні інвестиції від топ-компаній планети. Квантовий комп'ютинг – галузь знань, що займається теорією і практикою паралельного розв'язання комбінаторних задач на обчислювачах, що використовують субатомні частинки під час створення структур даних і їх фізичної взаємодії для реалізації логічних операцій. Квантовий комп'ютинг, що емулює, – структури даних, моделі, методи та алгоритми для створення software додатків з метою паралельного розв'язання комбінаторних задач на класичних комп'ютерах шляхом використання додаткової пам'яті. Квантовий комп'ютер без квантових паралельних алгоритмів – лише дорога іграшка. Тому стратегія створення квантового комп'ютингу полягає в одночасній розробці квантової апаратури і квантових програмних додатків на основі паралельних алгоритмів. Паралельний і роздільний розвиток двох гілок квантового комп'ютингу пов'язаний з проектуванням, моделюванням та верифікацією квантових алгоритмів і програмних додатків на класичних комп'ютерах з метою їх подальшої імплементації в ринково доступні квантові комп'ютери у недалекому майбутньому. Моделювання на класичних комп'ютерах паралельних квантових алгоритмів дає істотний приріст продуктивності за рахунок використання надлишкової пам'яті для унітарного кодування кубітних структур даних. Design and Test є найбільш передовим напрямом діяльності вчених і компаній, спрямованою на створення нових технологій комп'ютингу за швидкодією, енергозбереженням, компактністю і надійністю. Параметр time-to-market під час створення комп'ютирової продукції поряд з якістю є домінуючим. Тому квантові паралельні методи та алгоритми проектування, тестування, верифікації, моделювання і діагностування цифрових виробів на кубітних структурах даних є *актуальними* в ході їхньої імплементації в сучасні класичні та у майбутні квантові комп'ютери з метою істотного зменшення time-to-market. Особливий інтерес становить використання кубітних покриттів примітивних функціональностей для мінімізації, синтезу, аналізу і діагностування цифрових систем на кристалах.

Запропоноване дослідження спрямоване на вирішення *науково-практичної задачі* верифікації спеціалізованих цифрових систем на кристалах шляхом використання memory-driven архітектур і кубітних структур даних для компактного опису логічних X-функцій та істотного підвищення продуктивності методів синтезу тестів і дедуктивного моделювання несправностей за рахунок паралельного комп'ютингу алгоритмів.

Вирішення проблем, пов'язаних з design and test, проектуванням, верифікацією, синтезом тестів і моделюванням цифрових систем, представлено в публікаціях вчених: Y. Zorian, J. Bergeron, Z. Navabi, A. Jerraya, DB Armstrong, P. Prinetto, J. Abraham, H. Fujiwara, T. Nishida, X. Wang, P. Mueller, A. Петренко,

Р. Убар, А. Ivanov, А. Романкевич, В. Романкевич, Д. Сперанський, А. Матророва, П. Пархоменко, J.P. Roth, В. Мелікян, С. Шукур'ян, В. Тарасенко, М. Коровай, А. Палагін, В. Опанасенко, В. Харченко, Л. Дербунович, В. Ярмолік, Р. Шейнаускас, Н. Євтушенко, Р. Базилевич, Г. Кривуля, М. Мірошник.

**Зв'язок роботи з науковими програмами та темами.** Розробка теми дисертації здійснювалася відповідно до планів держбюджетних НДР і міжнародних договорів, виконуваних на кафедрі АПОТ Харківського національного університету радіоелектроніки у 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.

Автор дисертаційної роботи брав участь у виконанні зазначених договорів і програм як розробник-архітектор і програміст-тестувальник засобів синтезу тестів і моделювання несправностей на основі використання IEEE стандартів.

**Сутність дослідження** – квантові моделі і методи синтезу тестів та аналізу несправностей логічних X-функцій на основі використання 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.

**Об'єкт дослідження** – архітектури і технології паралельного комп'ютингу логічних операцій для вирішення завдань проектування, верифікації та тестування цифрових систем на кристалах.

**Предмет дослідження** – моделі, методи, алгоритми та процедури паралельного синтезу й аналізу спеціалізованих логічних схем для створення засобів тестування і верифікації на основі кубітних структур даних.

**Мета дослідження** – зменшення часу верифікації цифрових систем на кристалах шляхом використання memory-driven архітектур і кубітних структур даних для компактного опису логічних X-функцій та істотного підвищення продуктивності методів тестування і дедуктивного моделювання несправностей за рахунок паралельного комп'ютингу алгоритмів.

**Задачі дослідження:**

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 X-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 X-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 X-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 X-функцій на основі отримання одиначної матриці похідних з метою створення секвенсора моделювання дефектів.

#### **Наукова новизна:**

1. *Вперше запропоновано* структурну модель метричних властивостей X-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 X-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 X-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 X-функцій, який *характеризується* отриманням одиначної матриці похідних, що дає можливість створювати секвенсор моделювання дефектів, інваріантний до вхідних тестових наборів.

5. *Удосконалено* методу-*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 X-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'ютерингу. Окремі сервіси синтезу та аналізу кубітних моделей цифрових пристроїв і компонентів реалізовані у вигляді програмних до-

датків і пройшли вичерпну апробацію у навчальному процесі під час вивчення курсів «Квантові обчислення», «Основи комп'ютерної діагностики», «System on Chip». Середовище проектування: SWIFT, C ++, Verilog, Java і платформи: Microsoft Windows, X Window і Macintosh OS X.

Отримані в процесі виконання досліджень наукові висновки та практичні результати є достовірними, що підтверджується достатньою кількістю проведених експериментів, тестуванням і верифікацією моделей логічних схем і синтезованих тестів. Результати дисертації у складі моделей, методів і фрагментів додатків впроваджені у навчальний процес Харківського національного університету радіоелектроніки (акт про впровадження від 23.10.2018); в методологічне та технологічне забезпечення компанії «DIT Delight Limited» (довідка про впровадження від 25.10.2018).

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові і практичні результати отримано автором особисто. У роботах, опублікованих зі співавторами, здобувачеві належать: [1] – кубітні моделі для квантового методу синтезу тестів; [2] – кубітні структури для опису функцій і тестів; [3] – квантові структури опису логічних елементів і архітектура системи моделювання; [4] – аналітичний огляд технологій квантового комп'ютерингу стосовно Design and Test; [5] – аналітична модель для синтезу Q-тестів на основі кубітних покриттів; [6] – синтез аналітичних моделей для дедуктивного моделювання несправностей; [7] – синтез аналітичних моделей для діагностування одиночних і кратних константних несправностей; [8] – метод синтезу тестів для класу логічних функцій на основі кубітних векторів; [9] – метод діагностування несправностей логічних схем, дедуктивний метод моделювання несправностей за кубітним покриттям логічних елементів, паралельний метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання X-функцій, memory-driven архітектури та алгоритми для реалізації методів тестування та верифікації цифрових систем на кристалах; [10] – структурна модель метричних властивостей X-функцій, аналітична модель синтезу кубітних покриттів X-функцій від кінцевого числа змінних, метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання X-функцій, memory-driven архітектури тестування і верифікації цифрових систем на кристалах, квантові методи генерації тестів і дедуктивного моделювання несправностей логічних функцій; [11] – квантові структури даних для генерації тестів і моделювання справної поведінки цифрових схем; [12] – аналітичний огляд кубітних методів діагностування та тестування цифрових систем; [13] – структури даних і архітектури хмарних сервісів для вирішення завдань тестування цифрових систем на кристалах; [14] – кубітний опис логічних функцій для синтезу та аналізу memory-driven комп'ютерингу; [15] – аналітичні моделі для синтезу тестів на основі використання кубітних похідних; [16] – алгоритм кубітного дедуктивного моделювання логічних схем і його програмна реалізація; [17] – квантові структури даних для синтезу тестів і аналізу несправностей; [18] – архітектура квантового memory-driven комп'ютерингу для синтезу тестів; [19] – моделі кубітного

опису логічних схем для генерування тестів; [20] – алгоритм мінімізації логічних функцій на основі унітарного опису таблиць невизначених коефіцієнтів; [22] – метричні властивості Х-функцій; [21] – аналітичний огляд хмарних технологій, орієнтованих на вирішення завдань технічної діагностики.

**Апробація результатів дисертації.** Результати роботи були представлені та обговорені на таких конференціях: IEEE East-West Design and Test Symposium, 2016 (Armenia); 2017 (Serbia); XX Міжнародний молодіжний форум «Радіоелектроніка та молодь у XXI сторіччі», 2017 (Україна); 13th International Conference: The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2017 (Lviv, Ukraine); 5th Prague Embedded Systems Workshop, 2017 (Rožtoky u Prahy, Czech Republic); International Conference on Recent Advancements in Computing, IoT and Computer Engineering Technology, 2017 (Taiwan); International MultiConference of Engineers and Computer Scientists, 2018 (Hong Kong); World Congress in Computer Science, Computer Engineering, & Applied Computing, 2018 (Las Vegas, USA).

**Публікації.** Результати дисертаційної роботи відображені у 22 друкованих працях: 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  $h=2$ .

Дисертаційна робота має 159 сторінок (з них 124 становлять основний текст) і містить: 4 розділи, 32 рисунки, список джерел з 102 назв (на 13 с.), 4 додатки (на 9 с.), анотації на 22 с.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність завдань, які вирішуються в дисертаційній роботі, сформульовано мету дослідження, а також викладено наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів.

У **першому розділі** показано сучасні моделі, методи, алгоритми і архітектури квантового комп'ютингу для тестування і моделювання цифрових систем з метою створення теорії і практики квантового проектування цифрових систем. На основі огляду і аналізу публікацій в області тестування і верифікації спеціалізованих логічних схем шляхом розробки паралельних квантових методів аналізу і синтезу кубітних структур даних цифрових систем зроблено висновок щодо актуальності дослідження, сформульовано мету і науково-практичні завдання дослідження в рамках технологій синтезу тестів і моделювання несправностей для спеціалізованих

логічних схем, включаючи Х-функції. Виконання досліджень і проведення експериментів ґрунтується на використанні метрики параметрів, інтегрованої в функцію мети:

$$L = \min_i \left( \sum_{i=1}^n T_i \times P_i^T + \sum_{i=1}^n M_i \times P_i^M + \sum_{i=1}^n C_i \times P_i^C \right),$$

$$T = (T_{\text{mod}}, T_{\text{tpg}}, T_{\text{tver}}, T_{\text{sim}}); n = 4;$$

$$M = (M_{\text{mod}}, M_{\text{tpg}}, M_{\text{tver}}, M_{\text{sim}});$$

$$C = (C_{\text{mod}}, C_{\text{tpg}}, C_{\text{tver}}, C_{\text{sim}}).$$

Формула показує зменшення часу  $T$  проектування цифрових систем на кристалах і забезпечення якості (обчислювальної складності) алгоритмів  $C$  за рахунок використання надлишкової пам'яті  $M$  для зберігання кубітних структур даних, які орієнтовані на паралельне виконання логічних операцій в ході синтезу і аналізу логічних схем, пов'язаних з тестуванням і верифікацією. Подано вартісні характеристики  $P$  чотирьох основних процесів, пов'язаних з modeling (mod), test pattern generation (tpg), test verification (tver), test simulation (sim).

У **другому розділі** розглядаються архітектури і методи квантового паралельного аналізу кубітних моделей цифрових систем і компонентів для їхньої подальшої реалізації у формі сервісів-додатків. Вирішуються задачі синтезу квантових memory-driven архітектур паралельного комп'ютингу для аналізу кубітних моделей цифрових систем і компонентів; розробляються метрики і моделі класифікації квантового комп'ютингу; створюються карти або інфраструктури quantum design and test of memory-driven computing; розробляються метричні моделі для спільного використання квантового та класичного комп'ютингу; створюються кубітні квантові архітектури для паралельних обчислень при вирішенні задач design and test.

Модифікація memory-driven комп'ютингу полягає у внесенні блоку управління до пам'яті (рис. 1), що дає можливість виключити неоднорідність архітектури і призвести її до чистої пам'яті, на якій реалізуються модулі управління, комп'ютингу і зберігання даних до і після обробки.

Memory-driven computing містить Computational Memory, яка подана покриттями функціональних примітивів, що реалізують логічні (арифметичні) операції. Control Memory є алгоритмом управління обчислювальним процесом, який зчитує дані з Conventional Memory, обробляє їх за допомогою Computational Memory і записує результати в регулярну пам'ять для зберігання. Така структура комп'ютингу на пам'яті є типовою, яку можна поширити на вирішення практичної задачі, пов'язаної з моделюванням цифрових схем на основі кубітних структур даних (рис. 2).

Таким чином, поєднання квантового комп'ютингу з архітектурою обчислювальної пам'яті надає науці і практиці нову технологічну культуру quantum memory-driven computing, яка інтегрально отримує переваги структурної однорідності і паралелізму обробки великих даних за рахунок



усунення транзакцій між пам'яттю і ALU-процесором, і виключення квантових операцій суперпозиції і змішування.

Кіберкультура квантового memory-driven комп'ютингу інтегрує в трикутну структуру технології паралельного вирішення часовитратних комбінаторних задач, ринково доступні квантові обчислювачі і паралельно мислячих програмістів. Масштабна карта досліджень, відповідних квантовій кіберкультурі, націленої на створення паралельних алгоритмів, зокрема, для SoC Design and Test, наведена на рис. 3.

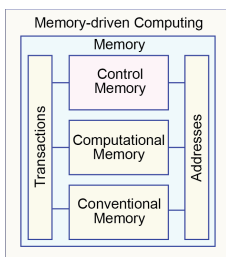


Рисунок 1 – Architectures: Memory-driven and quantum computing

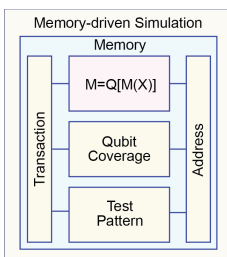


Рисунок 2 – Memory-driven quantum computing: Simulation and Recognition

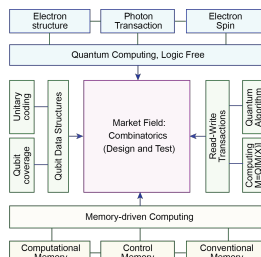


Рисунок 3 – Roadmap of quantum design and test memory-driven computing

Таблична модель логічного елемента подана сукупністю кубів або дискретних відносин між вхідними та вихідними змінними. Натомість пропонується кубітний вектор упорядкованих за адресами вихідних станів, орієнтований на паралельне моделювання цифрових систем.

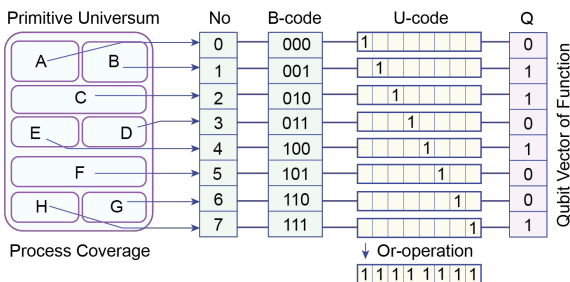


Рисунок 4 – Унітарне кодування символів універсуму

Суперпозиція  $n$  рівнозначних елементів кінцевої множини в квантовому (Q) комп'ютингу взаємоднозначно відповідає  $n$ -вимірному вектору в класичному (C) адресованому комп'ютингу, рис. 4, який отримано шляхом виконання or-операції над унарними кодами примітивних елементів множини.

У **третьому розділі** пропонується структурна модель взаємодії X-функцій і похідних компонентів, орієнтованих на синтез і аналіз цифрових систем з метою зменшення часу проектування і тестування обчислювальних пристроїв. Вводиться поняття простих X-функцій від кінцевого числа змінних, які характеризуються відсутністю мінімізації та наявністю

властивостей тестопригодності для вирішення завдань синтезу тестів, моделювання і діагностування. Формуються метричні властивості Х-функцій від кінцевого числа змінних для оцінки якості перевіряючих тестів шляхом дедуктивного моделювання константних несправностей на кубітних структурах даних, що перевіряються. Пропонується аналітичний вираз для синтезу кубітних покриттів Х-функцій від кінцевого числа змінних з метою подальшого синтезу і аналізу тестів перевірки та діагностування несправностей. Синтезуються 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. Пропонується метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання несправностей на основі використання Q-покриттів функціональностей.

Запит з поєднання слів "Fault Simulation" дає 35355 посилань на наукові публікації в IEEE Xplore Digital Library. Такий інтерес ринку визначається перманентними проблемами, пов'язаними з дефектами в усіх комп'ютерних виробках різного призначення: соціальні мережі, обчислення, транспорт, медицина, будівництво, космонавтика, озброєння, енергетика. Що стосується моделювання дефектів, тут загальна картина технічної діагностики може бути подана взаємодією структур даних, моделей, методів і різних дефектів, зображених на рис. 5.

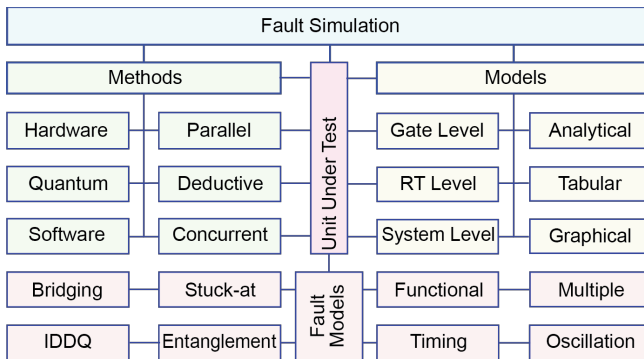


Рисунок 5 – Моделі і методи аналізу несправностей

Структура для моделювання справної поведінки і дедуктивного моделювання несправностей Х-функції на основі використання регістрових операцій представлена на рис. 6.

Переваги дедуктивного симулятора логічних X-функцій полягають у тому, що: 1. Відсутня традиційна апаратна надмірність для дедуктивного моделювання несправностей X-функцій, в той час як всі інші логічні функції вимагають 10-кратного збільшення апаратури. 2. Для обробки вхідного впливу використовуються два автоматних такти, які орієнтовані на справне моделювання і дедуктивний аналіз несправностей відповідно. 3. Дедуктивний симулятор використовує паралельні логічні регістри операції для ефективного транспортування вхідних списків несправностей.

Формула для визначення похідних вхідних булевих змінних використовує хог-операцію між осередками сусідніх частин кубіта:

$$Q^L(X_k) = \{Q_i^L, Q_i^R\} = Q_i^L \bigoplus_{i=1,2}^{k-1} Q_i^R.$$

Структура обчислювача-секвенсора кубітної похідної наведена на рис. 7, де результати виконання хог-операції заносяться в обидві частини кубіта.

Визначення. X-функція є логічною простою функцією від кінцевого числа змінних ( $n = 1, 2, 3, \dots$ ), яку неможливо мінімізувати.

Твердження. Шахова форма подання нульових і одиничних станів у карті Карно задає X-функцію. Наступні два приклади логічних функцій, зображених у формі карти Карно, ілюструють дві взаємно інверсних булевих X-функції від чотирьох змінних:

$X_1 X_2 \setminus X_2 X_3$	00 01 11 10	$X_1 X_2 \setminus X_2 X_3$	00 01 11 10
00	0 1 0 1	00	1 0 1 0
01	1 0 1 0	01	0 1 0 1
11	0 1 0 1	11	1 0 1 0
10	1 0 1 0	10	0 1 0 1

$$Y(0110100110010110) = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 X_4 \vee \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 \bar{X}_4 \vee \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 \bar{X}_4 \vee \bar{X}_1 X_2 X_3 X_4 \vee X_1 X_2 \bar{X}_3 X_4 \vee X_1 X_2 X_3 \bar{X}_4 \vee X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 \bar{X}_4 \vee X_1 \bar{X}_2 X_3 X_4;$$

$$Y(1001011001101001) = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 \bar{X}_4 \vee \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 X_4 \vee \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 X_4 \vee \bar{X}_1 X_2 X_3 \bar{X}_4 \vee X_1 X_2 \bar{X}_3 \bar{X}_4 \vee X_1 X_2 X_3 X_4 \vee X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 X_4 \vee X_1 \bar{X}_2 X_3 \bar{X}_4.$$

Аналогічно, за допомогою Карт Карно, можна зобразити логічні X-функції від трьох змінних, які мають 8 станів виходів:

$X_1 \setminus X_2 X_3$	00 01 11 10	$X_1 \setminus X_2 X_3$	00 01 11 10
0	0 1 0 1	0	1 0 1 0
1	1 0 1 0	1	0 1 0 1

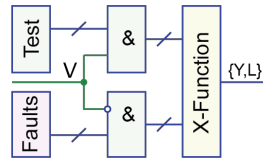


Рисунок 6 – Дедуктивний симулятор X-функцій для моделювання несправної поведінки

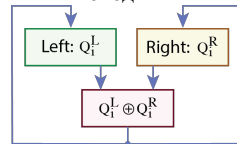


Рисунок 7 – Секвенсор для взяття кубітної похідної

Даним функціям можна поставити у відповідність їхні аналітичні форми, які мають корисну властивість – кожен терм ДДНФ відрізняється від інших за двома змінними:

$$Y(01101001) = \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 \vee \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 \vee X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 \vee X_1 X_2 X_3;$$

$$Y(10010110) = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 \vee \bar{X}_1 X_2 X_3 \vee X_1 \bar{X}_2 X_3 \vee X_1 X_2 \bar{X}_3.$$

Це означає, що будь-яка одиночна константна несправність може бути ідентифікована і виправлена на перевірюваному вхідному наборі.

Синтез тестів для логічних X-функцій. Ідея синтезу кубітних тестів на основі використання операції зустрічного зсуву даних у кубітному покритті представлена формулою:

$$T(S) = \bigvee_{j=1}^n [Q \oplus S_j(\bar{Q})].$$

Наступна таблиця ілюструє результати виконання чотирьох логічних операцій для отримання тесту кубітної форми:

Q - Test Synthesis	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
$\bar{Q}$	0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0
$S_1(\bar{Q})$	1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1
$S_2(\bar{Q})$	1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1
$S_3(\bar{Q})$	1 1 1 1 0 1 1 1 1 1 1 1 1 0 1 1 1 1
$S_4(\bar{Q})$	1 1 1 1 1 1 1 0 0 1 1 1 1 1 1 1 1
$T_1 = Q \oplus S_1(\bar{Q})$	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
$T_2 = Q \oplus S_2(\bar{Q})$	1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1
$T_3 = Q \oplus S_3(\bar{Q})$	1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 1
$T_4 = Q \oplus S_4(\bar{Q})$	1 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1
$T(S) = T_1 \vee T_2 \vee T_3 \vee T_4$	1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1

Загальна довжина тесту визначається числом одиничних значень координат:  $T(S) = T(A) = (1110100110010111)$ . Використовуючи булеву кубітну похідну, процедура синтезу тесту спрощується до двох логічних операцій:

$$T(Q') = \bigvee_{i=1}^n Q'(X_i)$$

Результат у формі кубіта визначає тест перевірки несправностей, з числом вхідних наборів, що дорівнює 10:

$Q'(X)$	1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1
$Q'(X_1)$	1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1
$Q'(X_2)$	1 0 1 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1 0 1
$Q'(X_3)$	1 0 0 0 1 0 0 0 0 0 0 0 1 0 0 0 0 1
$Q'(X_4)$	1 0 0 0 0 0 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 1
$T(Q') = \bigvee_{i=1}^n Q'(X_i)$	1 1 1 0 1 0 0 1 1 0 0 1 0 1 1 1 1

Обидва методи синтезу тестів дають ідентичний результат:

$$T(Q') = T(S) = T(A) = (1110100110010111)$$

Проте, процедури синтезу тестів для довільних логічних функцій досить непрості для їхньої реалізації навіть на кубітних структурах даних, де потрібні витратні процедури реєстрового зсуву, які у програмній реалізації є часовитратними. Сутність або унікальна особливість тесту для будь-якої Х-функції полягає в його непобудованості, оскільки існують дві Т-аксіоми, що пояснюють відсутність синтезу:

1) Логічна Х-функція, записана у вигляді одиничних термів ДДНФ  $T_i \in T, f(T_i)=1$ , є тестовими наборами для перевірки одиничних константних 0-несправностей вхідних, внутрішніх змінних і виходу:

$$T^1 (\equiv 0) = \bigvee_{\forall i \{f(T_i)=1\}} T_i,$$

$$T = \{T_0, T_1, \dots, T_i, \dots, T_k\},$$

$$k = 2^{2^n} - 1; f(T_i) = \{0, 1\}.$$

2) Тест у формі ДДНФ логічної Х-функції завжди доповнюється єдиною вхідною послідовністю – будь-яким термом зворотної ДДНФ

$$T_i \in T^0, f(T_i) = 0,$$

який перевіряє всі константні 1-несправності внутрішніх ліній і виходу:

$$T^0 (\equiv 1) = T_i \leftarrow \forall i : f(T_i) = 0.$$

Зокрема, доповнення до 1-тесту Х-функції ( $Q = 01101001$ ) визначається нульовим тестовим набором (000) за всіма вхідними координатами; доповнення до 1-тесту для Х-функції ( $Q = 10010110$ ) задається першим тестовим набором (001), що містить в останньому розряді одиницю на тлі всіх інших нулів. Насправді доповненням до 1-тесту є будь-яка вхідна послідовність, що відсутня в 1-тесті. Тому повним перевіряючим тестом для Х-функції завжди є тест розмірності

$$Q = 1 + \frac{1}{2} \times 2^{2^n}.$$

Отже, тестом для логічної Х-функції від  $n$  змінних є її ДДНФ, доповнена будь-яким термом зворотної ДДНФ даної функції:

$$T = T^1 \vee T_i^0,$$

$$T^1 = \bigvee T_i : f(T_i) = 1$$

$$T_i^0 \in T^0 = \bigvee T_i : f(T_i) = 0;$$

$$T(01101001) = (001 \vee 010 \vee 100 \vee 111) \vee 000;$$

$$T(10010110) = (000 \vee 011 \vee 101 \vee 110) \vee 001.$$

Інша унікальна властивість логічної Х-функції визначається як: покоординатно хог-сума всіх двійкових кодів, відповідних ДДНФ (зворотної ДДНФ), дорівнює нульовому за всіма двійковими розрядами, у форматі  $n$  змінних, вектору:

$$\bigoplus_{i=1}^{n_1} C(T_i^1) = 0;$$

$$\bigoplus_{i=1}^{n_0} C(T_i^0) = 0;$$

$$n_0 + n_1 = 2^{2^n}.$$

Ілюстрація факту конволюції простору ДДНФ або зворотної ДДНФ у нуль-вектор подана двома Х-функціями від трьох змінних:

$$Y(01101001) = \bar{X}_1 \bar{X}_2 X_3 \vee \bar{X}_1 X_2 \bar{X}_3 \vee X_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 \vee X_1 X_2 X_3 \rightarrow$$

$$\rightarrow 001 \oplus 010 \oplus 100 \oplus 111 = 000;$$

$$Y(10010110) = \bar{X}_1 \bar{X}_2 \bar{X}_3 \vee \bar{X}_1 X_2 X_3 \vee X_1 \bar{X}_2 X_3 \vee X_1 X_2 \bar{X}_3 \rightarrow$$

$$\rightarrow 000 \oplus 011 \oplus 101 \oplus 110 = 000.$$

Властивість конволюції дає можливість: 1) верифікувати якість тестових послідовностей без застосування складних процедур моделювання несправностей; 2) обчислювати невідомі терми тесту або ДДНФ на основі відомих компонентів шляхом застосування, наприклад, наступної рівності для Х-функції від трьох змінних:

$$T_1 \oplus T_2 \oplus T_3 \oplus T_4 = 0;$$

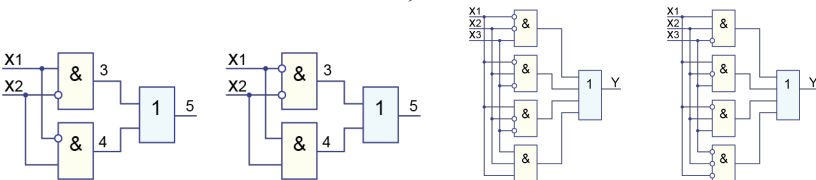
$$001 \oplus 010 \oplus 100 \oplus 111 = 0(000).$$

$$T_2 \oplus T_3 \oplus T_4 = T_1;$$

$$010 \oplus 100 \oplus 111 = 001.$$

Для логічних Х-функцій від двох змінних (рис. 8), які відомі як хог, пот-хог примітивни, нижче наведено моделювання справної поведінки всіх вхідних наборів (таблиця Т), аналіз несправностей (таблиця D) і кубітна форма чотирьох варіантів мінімальних тестів – таблиця T (Q). Для обох функцій тут отримані мінімальні тести, що складаються з трьох вхідних наборів. Це пов'язано з тим, що протилежні вхідні вектори мають однакові стани вихідної змінної.

T(xor)	1 2 3 4 5	D	1 2 3 4 5	T(Q)	1 2 3 4	T(nxr)	1 2 3 4 5	D	1 2 3 4 5	T(Q)	1 2 3 4
0	0 0 0 0 0	0	1 1 1 1 1	0	0 1 1 1	0	0 0 1 0 1	0	1 1 0 . 1	0	0 1 1 1
1	0 1 0 1 1	1	1 0 . 0 0	1	1 0 1 1	1	0 1 0 0 0	1	1 1 0 1 1 0	1	1 0 1 1
2	1 0 1 0 1	2	0 1 0 . 0	2	1 1 0 1	2	1 0 0 0 0	2	0 1 1 1 0	2	1 1 0 1
3	1 1 0 0 0	3	0 0 1 1 1	3	1 1 1 0	3	1 1 0 1 1	3	0 0 . 0 1	3	1 1 1 0



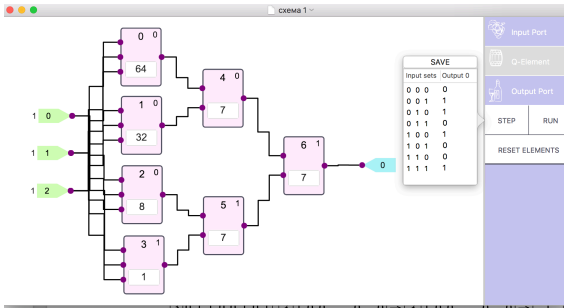


Рисунок 8 – Схеми X-функції від двох змінних

Тест, який використовує T-аксіоми для запису вхідних послідовностей, які перевіряють всі поодинокі константні несправності цифрових схем (xor, nxr), має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 T(\text{xor}, \text{nxr}) &= T^1 \vee T_i^0, \\
 T(Q = 0110)(\text{xor}) &= (01 \vee 10) \vee 00; \\
 T(Q = 1001)(\text{nxr}) &= (00 \vee 11) \vee 01.
 \end{aligned}$$

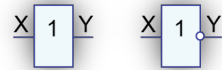


Рисунок 9 –X-функції від однієї змінної

Для двох логічних X-функцій від однієї змінної (рис. 9).

Нижче подано моделювання справної поведінки всіх вхідних наборів (таблиця T), аналіз несправностей (таблиця D) і кубітна форма мінімальних тестів – таблиця T (Q), розглядаються функціональні елементи (повторювач – ger, інвертор – not):

T(rep)	X	Y	→	D	X	Y	→	T(Q)
0	0	0		0	1	1		1
1	1	1		1	0	0		1

T(not)	X	Y	→	D	X	Y	→	T(Q)
0	0	1		0	1	0		1
1	1	0		1	0	1		1

Тест, який використовує T-аксіоми для запису вхідних послідовностей, які перевіряють всі поодинокі константні несправності цифрових примітивів (ger, not), має такий вигляд:

$$\begin{aligned}
 T(\text{rep}, \text{not}) &= T^1 \vee T_i^0, \\
 T(Q = 01)(\text{rep}) &= 1 \vee 0; \\
 T(Q = 10)(\text{not}) &= 0 \vee 1.
 \end{aligned}$$

Таким чином, використання двох згаданих вище T-аксіом дає можливість записувати без обчислень повний перевіряючий тест для одиночних константних несправностей вхідних, внутрішніх і вихідних ліній будь-якої як завгодно складної логічної X-функції.

У четвертому розділі запропоновано аналітичний вираз для синтезу кубітних покриттів X-функцій від кінцевого числа змінних, що дає можливість створювати тестопридатні логічні схеми, які не потребують експоненційних витрат на синтез і аналіз тестів перевірки та діагностування несправностей. Розроблено метод синтезу дедуктивних кубітних покриттів для моделювання несправностей на основі використання Q-покриттів функціональності, який відрізняється від відомих аналогів оригінальністю математичних рішень, високим рівнем паралелізму і

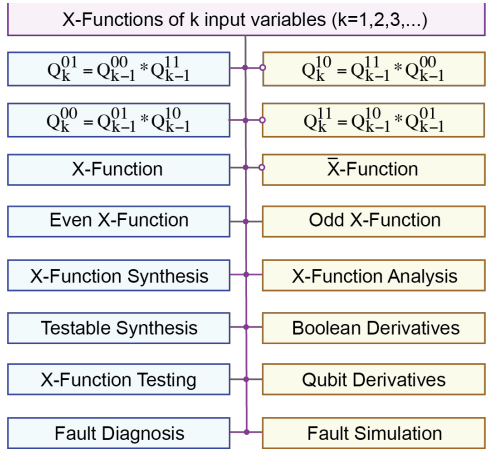


Рисунок 10 – Структурна модель взаємодії X-функцій

компактністю структур даних, що дає можливість використовувати його програмну (апаратну) реалізацію для синтезу, аналізу, тестування, верифікації та діагностування цифрових систем на кристалах. Виконана імплементація кубітних моделей, методів і алгоритмів у практичну програмного серверного додатка QuaSim, що має на меті вирішення завдань синтезу кубітних моделей, генерування перевіряючих тестів і оцінки якості їхнього покриття для класу одиночних константних несправностей.

Модель відносин наведена на рис. 10. Структура секвенсора, який призначений для синтезу кубітних покриттів X-функцій від  $n=1,2,3,4$  змінних за допомогою конкатенації її інверсії, позначеної кружечком, наведена на рис. 11.

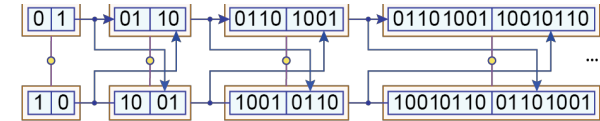


Рисунок 11 – Секвенсор синтезу Q-покриття для X-функції

*Метод синтезу*

*дедуктивного кубітного покриття і ДНФ за таблицею істинності.* Пропонується формула-процедура отримання для вхідної послідовності (T) дедуктивної таблиці (L), а по ній і записи дедуктивної формули для функціональності від  $n$  змінних, заданої таблицею істинності (C) або кубітним покриттям функціональності:

$$L_i = T_i \oplus C_j, \{i, j\} = 1, 2^{2^n}.$$

Синтез матриці кубітних покриттів дедуктивних функцій, що залежить від двійково-десятькового номера вхідного набору і координат Q-вектора функціональності від  $n$  змінних:

$$L_{ij}^* = (Q_i \oplus Q_j)_{j=1}^m, m = 2^{2^n}.$$



Фактично береться перша координата кубітного покриття, яка хог-складається з усіма координатами Q-вектора для формування дедуктивного вектора на першій вхідній послідовності. Потім береться друга координата Q-вектора, яка також хог-складається з усіма координатами. Процедура закінчується після того, як всі координати Q-вектора були хог-складені з кубітним вектором. Обчислювальна складність даної процедури дорівнює  $m^{**2}$ , яка може бути зменшена до  $m$  шляхом апаратної паралельної реалізації хог-операції.

Аналітична модель процесу моделювання на основі використання кубітних структур даних для синтезу та аналізу цифрових систем і компонентів має такий вигляд:

$$\begin{aligned} W &= (M, Q, X), \\ M &= (M_1, M_2, \dots, M_1, \dots, M_n); \\ Q &= [Q_{ij}]; \\ Q &= (Q_1, Q_2, \dots, Q_i, \dots, Q_n); \\ Q_i &= (Q_{i1}, Q_{i2}, \dots, Q_{ij}, \dots, Q_{im}); \\ M(i) &= Q[i, M(X_i)]. \end{aligned}$$

Модель інтегрує такі системоутворюючі компоненти: M – вектор моделювання логічної схеми, який пов'язує всі кубітні покриття примітивних елементів у структуру; X – вектор десяткових номерів вхідних змінних; Q – матриця кубітних покриттів, поданих у вигляді вектор-стовпців вихідних станів логічних елементів. Аналітичне рівняння адресних транзакцій у вигляді запису-зчитування даних між вектором моделювання і кубітними покриттями створює простий і ефективний алгоритм моделювання будь-яких дискретних обчислювальних процесів:  $M(i) = Q [I, M(X(i))]$ .

Аналітичне рівняння моделювання безпосередньо впливає на продуктивність квантового методу аналізу, яка залежить від операцій конкатенації  $k$ , зчитування  $g$  і запису  $w$  бітів, кількості  $q$  кубітних покриттів у цифровій схемі, а також довжини тестової послідовності вхідних наборів  $t$ :

$$Q = (k + g + w) \times q \times t.$$

Фактично необхідно виконати три транзакційних операції read-write для моделювання функціонального елемента будь-якої складності на основі технології memory-driven квантового паралельного комп'ютингу для вирішення завдань синтезу та аналізу.

Серверний додаток QuaSim пов'язано з популяризацією нових технологій квантово-кубітного синтезу та аналізу цифрових пристроїв у середовищі студентів, вчених і фахівців, завдяки згаданим вище переваг quantum memory-driven computing і має такі функціональності (рис. 12):

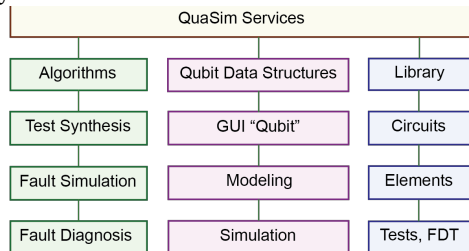


Рисунок 12 – Сервіси моделювання QuaSim

1. Modeling – створення кубітної моделі цифрового або іншого дискретно функціонуючого пристрою шляхом введення логічних елементів, вхідних і вихідних інтерфейсів, малювання зв'язків між ними, а також введення кубітних покриттів всередину кожного примітиву. 2. Simulation – моделювання цифрових схем на синтезованих тестових наборах, на таблиці істинності цифрової схеми або у покроковому режимі, коли на входи подається окремий тестовий двійковий набір. 3. Test Synthesis – виконується кубітний метод генерації тестів, який використовує булеві кубітні похідні. 4. Fault Simulation – здійснюється моделювання одиночних константних несправностей методом дедуктивного кубітного аналізу з метою визначення якості покриття перевіряючим тестом заданого класу дефектів. 5. Fault Diagnosis – пошук несправностей на основі використання кубітних структур даних для унітарного кодування станів таблиці перевірюваних дефектів, що дає можливість за три паралельних операції ідентифікувати можливі несправності.

Програмні модулі QuaSim сервісів закодовані мовою Swift, операційна система OSX 10.9, компілятор XCode 7. Кількість вихідних файлів 55, загальна кількість рядків коду – 2900. Верифікація QuaSim виконана на логічних схемах з бібліотеки ISCAS 89: 1) C5 sample. 2) C17 comb. 3) PatternB. 4) Hasse proc. 5) Sec. Circuit. 6) MUX8-1 Circuit. 7) Des Circuit. 8) Cov. processor. 9) RF4-16 Circuit. 10) C432 sample. Порівнювався час: введення схеми (Modeling Time), синтезу та аналізу якості тестів. Базовий засіб – продукт Active HDL, Aldec Inc., де моделі схеми вводиться на VHDL мовою. Статистика порівняння Modeling, Sythesis, and Simulation Time для X-функцій наведена на рис. 13. Аналіз показує певні переваги використання QuaSim для проектування логічних схем невеликої розмірності порівняно з синтезом HDL-опису.

## ВИСНОВКИ

Проведені дослідження в рамках дисертаційної роботи вирішують науково-практичну задачу – верифікації спеціалізованих цифрових систем на кристалах шляхом використання memory-driven архітектур і кубітних структур даних для компактного опису логічних X-функцій та істотного підвищення продуктивності методів синтезу тестів й дедуктивного моделювання несправностей за рахунок паралельного комп'ютингу алгоритмів.

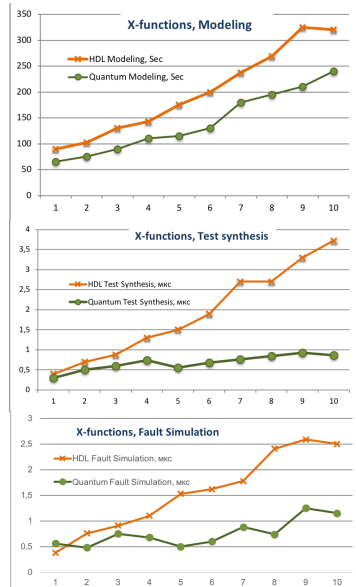


Рисунок 13 – Аналіз часу Modeling, Synthesis, and Simulation

Автором одержано такі *наукові та практичні результати*:

1. *Нова* структурна модель метричних властивостей X-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 X-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 X-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 X-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.

*Практична значущість* отриманих результатів полягає у розробці моделей, структур даних, методів синтезу та аналізу логічних схем, у тому числі X-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 вичерпну апробацію у навчальному процесі під час вивчення курсів «Квантові обчислення», «Основи комп'ютерної діагностики», «System on Chip». Середовище проектування: SWIFT, C ++, Verilog, Java і платформи: Microsoft Windows, X Window і Macintosh OS X.

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 Llimited» (довідка про впровадження від 25.10.2018).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Список публікацій здобувача, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Hahanov V. at all. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services [Text] / V. Hahanov at all. – New York. USA. – Springer, 2018. – 279 p. [Part 4. Qubit Description of the Functions and Structures for Service Computing Synthesis [Text] / I. Hahanov, I. Iemelianov, M. Liubarskyi, V. Hahanov. – P. 71-93] (Indexed by Springer, Scopus).

2. Hahanov V. at all. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services [Text] / V. Hahanov at all. – New York. USA. – Springer, 2018. – 279 p. [Part 5. Quantum Computing for Test Synthesis [Text] / V. Hahanov, Bani Amer T., I. Iemelianov, M. Liubarskyi. – P. 95-134] (Indexed by Springer, Scopus).

3. Hahanov V. at all. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services [Text] / V. Hahanov at all. – New York. USA. – Springer, 2018. – 279 p. [Part 6. QuaSim – Cloud Service for Quantum Circuits Simulation [Text] / I. Hahanov, Bani Amer T., I. Iemelianov, M. Liubarskyi, V. Hahanov – P. 135-147] (Indexed by Springer, Scopus).

4. Hahanov V. at all. Cyber Physical Computing for IoT-driven Services [Text] / V. Hahanov at all. – New York. USA. – Springer, 2018. – 279 p. [Part 14. Cyber-Physical Technologies: Hype Cycle 2017 [Text] / V. Hahanov, Wajeb Gharibi, Ka Lok Man, I. Iemelianov, M. Liubarskyi, V. Abdullayev, E. Litvinova, S. Chumachenko – P. 259-272] (Indexed by Springer, Scopus).

5. Хаханов В.И. Синтез Q-тестов по кубитному описанию функциональностей [Text] / В.И. Хаханов, Т. Bani Amer, И.В. Емельянов, М.М. Любарский // Радиоэлектроника и информатика. – 2016. – № 2(72). – С. 38-48. (Входит 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 [Text] / 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 [Входит до міжнародних наукометричних баз Cambridge Scientific Abstracts, Computer and Information Systems Abstracts, INIS Collection, Inspec, ВИНТИ РАН].

7. Емельянов И.В. Квантовые модели и облачные сервисы для анализа и диагностирования логических схем [Text] / И.В. Емельянов, М.М. Любарский, В.И. Хаханов // Радиоэлектроника и информатика. – 2017. – № 4. – С.30-47. (Входит до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, OECSP, OAJI, Scholar Steer, SIS, Cyberleninka, CiteFactor, TIU Hannover, I2OR)

8. Хаханов В.И. Квантовый метод синтеза тестов на основе кубитных структур данных [Text] / 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).

9. Хаханов В.И. Дедуктивный анализ и диагностирование логических X-функций [Text] / В.И. Хаханов, И.В. Емельянов, *М.М. Любарский*, С.В. Чумаченко, Е.И. Литвинова, Л.В. Ларченко // Радиоэлектроника и информатика. – 2018. – № 1. – С. 55-64. (Входит до міжнародних наукометричних баз Index Copernicus, Google Scholar, OECSP, OAJI, Scholar Steer, SIS, Cyberleninka, CiteFactor, TIIU Hannover, I2OR)

10. *Любарский М.М.* Синтез и анализ логических X-функций [Text] / *М.М. Любарский*, В.Г. Абдуллаев, В.И. Хаханов, С.В. Чумаченко, Е.И. Литвинова, И.В. Хаханов // Радиоэлектроника и информатика. – 2018. – №2. – С. 18-28.

11. Hahanov V. Quantum Data Structures for SoC Component Testing [Text] / 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. 69-76. (Входит до міжнародної наукометричної бази EBSCO Information Services).

12. Хаханов В.И. Gartner 2017 топ-технологии: их анализ и применение [Text] / 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 [Text] / Т. Bani Amer, В.И. Хаханов, И.В. Емельянов, *М. Любарский* // АСУ и приборы автоматки. – 2015. – Вып. 173. – С.48-57. (Входит до міжнародних наукометричних баз Google Scholar, Cyberleninka).

*Результати, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

14. Hahanov V. Qubit description of the functions and structures for computing [Text] / V. Hahanov, E. Litvinova, S. Chumachenko, *M. Liubarskyi* // Proc. of the IEEE East-West Design & Test Symposium. – 2016. – Yerevan, Armenia. – 6 p. (Входит до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).

15. Hahanov V. Qubit test synthesis for the black box functionalities [Text] / 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.

16. Hahanov I. Qubit deductive fault simulation of black box functionalities [Text] / I. Hahanov, A. Hahanova, V. Hahanov, E. Litvinova, S. Chumachenko, *M. Liubarskyi* // Proc. of 5th Prague Embedded Systems Workshop. June 29-30, 2017. Roztoky u Prahy, Czech Republic. P.83-91.

17. Hahanov V. Quantum Data Structures for SoC Component Testing [Електронний ресурс] / V. Hahanov, W. Gharibi, K. L. Man, S. Chumachenko, E. Litvinova, I. Iemelianov, *M. Liubarskyi* // Proc. of the International Conference on Recent Advancements in Computing, IoT and Computer Engineering Technology. – The Tamkang University. – Taipei, Taiwan. – October 23-25, 2017. – 1 p.

18. Hahanov V. Quantum memory-driven computing for test synthesis [Text] / V. Hahanov, W. Gharibi, E. Litvinova, M. Liubarskyi, A. Hahanova // Proc. of the IEEE East-West Design and Test Symposium. – Novi Sad, Serbia. – October, 2017. – P. 6. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).

19. Vladimir Hahanov. Qubit test synthesis of the functionality [Text] / V. Hahanov, Tamer Bani Amer, E. Litvinova, T. Soklakova, *M. Liubarskyi*, N. Shavlak, K. Dziuba // Proc. of the 14th International Conference “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (CADSM). – Lviv-Polyana, Ukraine. – 21-25 February, 2017. – P. 251 – 255. (Входить до міжнародних наукометричних баз Scopus, IEEE Xplore).

20. Hahanov V. Qubit Minimization of Boolean Functions [Text] / Vladimir Hahanov, Ka Lok Man, *Mykhailo Liubarskyi*, Ivan Hahanov, Svetlana Chumachenko // Proc. of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists. – Hong Kong. – March 14-16, 2018. – Vol II IMECS 2018. – Pp. 690-695.

21. Hahanov V. Quantum Deductive Fault Simulation [Text] / V. Hahanov, W. Gharibi, M. Liubarskyi, E. Litvinova, M. Gharibi, S. Chumachenko, I. Hahanov, and A. Hahanova // Proc. of Int'l Conf. Modeling, Sim. and Vis. Methods (MSV'18) in The 2018 World Congress in Computer Science, Computer Engineering, & Applied Computing (CSCE2018) . – Jul 30-Aug 02, 2018. – Las Vegas, USA. – P. 10-16.

*Публікації, які додатково відображають наукові результати дисертації:*

22. *Mykhailo Liubarskyi*. IoT Computing Evolution [Text] / M. Liubarskyi, I. Hahanov // Матеріали XXI Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь у XXI ст.». – 25-27 квітня 2017. – Ч. 5. – С.46-47.

## АНОТАЦІЯ

Любарський М.М. Квантові моделі та методи аналізу логічних Х-функцій. – Кваліфікаційна наукова робота на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.13.05 «Комп'ютерні системи та компоненти». – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2018.

Мета дослідження – зменшення часу верифікації цифрових систем на кристалах шляхом використання memory-driven архітектур і кубітних структур даних для компактного опису логічних Х-функцій та істотного підвищення продуктивності методів тестування і дедуктивного моделювання несправностей за рахунок паралельного комп'ютерного алгоритмів.

Основні результати, що визначають наукову новизну: 1) Вперше запропоновано структурну модель метричних властивостей Х-функцій, яка орієнтована на виконання паралельних операцій на кубітних структурах даних у цілях 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 по кубітних покриттях, 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 входних 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 одержаних результатів досліджень полягає у розробці моделей, структур даних, методів синтезу та аналізу логічних схем, включаючи Х-функції, 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'ютерингу. Окремі сервіси синтезу та аналізу кубітних моделей цифрових пристроїв і компонентів реалізовані у вигляді програмних додатків і пройшли вичерпну апробацію у навчальному процесі. Середовище проектування: SWIFT, C ++, Verilog, Java і платформи: Microsoft Windows, X Window і Macintosh OS X.

Ключові слова: квантові моделі, квантові методи, логічні Х-функції, цифрові системи на кристалах, memory-driven архітектура, кубітні структури даних.

## АННОТАЦИЯ

Любарский М.М. Квантовые модели и методы анализа логических X-функций. – Квалификационная научная работа на правах рукописи. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.13.05 «Компьютерные системы и компоненты». – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2018.

Цель исследования – уменьшение времени верификации цифровых систем на кристаллах путем использования memory-driven архитектур и кубитных структур данных для компактного описания логических X-функций и существенного повышения производительности методов тестирования и дедуктивного моделирования неисправностей за счет параллельного компьютинга алгоритмов.

Задачи исследования: 1) Разработать memory-driven архитектуры и алгоритмы для параллельного выполнения логических операций над кубитными структурами данных при реализации методов тестирования и верификации цифровых систем на кристаллах. 2) Усовершенствовать квантовые методы генерации тестов и дедуктивного моделирования неисправностей логических функций путем синтеза матриц булевых производных по их кубитным покрытиям. 3) Разработать структурную модель метрических свойств X-функций, ориентированную на выполнение параллельных операций, в целях получения линейного времени генерации тестов и моделирования цифровых систем. 4) Разработать аналитическую модель для получения кубитных покрытий X-функций от конечного числа переменных в целях создания логических схем, не требующих экспоненциальных затрат на синтез и анализ тестов. 5) Разработать параллельный метод генерации тестов для неисправностей X-функций от конечного числа переменных на основе взятия производных по кубитным покрытиям, формирующих тесты минимальной длины. 6) Разработать параллельный метод синтеза дедуктивных кубитных покрытий для моделирования X-функций на основе получения единичной матрицы производных в целях создания секвенсора моделирования дефектов.

Объект исследования – архитектуры и технологии параллельного компьютинга логических операций для решения задач проектирования, верификации и тестирования цифровых систем на кристаллах.

Предмет исследования – модели, методы, алгоритмы и процедуры параллельного синтеза и анализа специализированных логических схем для создания средств тестирования и верификации на основе кубитных структур данных.

Научно-практическая задача – верификация специализированных цифровых систем на кристаллах путем использования memory-driven архитектур и кубитных структур данных для компактного описания



логических X-функций и существенного повышения производительности методов синтеза тестов и дедуктивного моделирования неисправностей за счет параллельного компьютинга алгоритмов.

Сущность исследования – квантовые модели и методы синтеза тестов и анализа неисправностей логических X-функций на основе использования кубитных структур данных и memory-driven архитектур для параллельного компьютинга алгоритмов в целях существенного повышения производительности тестирования и дедуктивного моделирования цифровых систем на кристаллах.

Научная новизна результатов исследования:

1) Впервые предложена структурная модель метрических свойств X-функций, ориентированная на выполнение параллельных операций на кубитных структурах данных в целях получения линейного времени генерации тестов и моделирования цифровых систем.

2) Впервые предложена аналитическая модель синтеза кубитных покрытий X-функций от конечного числа переменных, которая характеризуется возможностью создания логических схем, не требующих экспоненциальных затрат на генерирование и анализ тестов проверки неисправностей.

3) Впервые предложен параллельный метод синтеза тестов для неисправностей X-функций от конечного числа переменных, который характеризуется взятием булевых производных по кубитным покрытиям, что дает возможность получать проверяющие тесты минимальной длины.

4) Впервые предложен параллельный метод синтеза дедуктивных кубитных покрытий для моделирования X-функций, который характеризуется получением единичной матрицы производных, что дает возможность создавать секвенсор моделирования дефектов, инвариантный к входным тестовым наборам.

5) Усовершенствованы memory-driven архитектуры и алгоритмы для реализации методов тестирования и верификации цифровых систем на кристаллах, которые отличаются параллельным выполнением логических операций над кубитными структурами данных.

6) Усовершенствованы квантовые методы генерации тестов и дедуктивного моделирования неисправностей логических функций, которые отличаются от аналогов синтезом матриц булевых производных по их кубитным покрытиям.

Практическая значимость полученных результатов. Разработаны модели, структуры данных, методы синтеза и анализа логических схем, включая X-функции, которые дают возможность существенно уменьшить время синтеза тестов и моделирования неисправностей, благодаря кубитному описанию цифровых схем, что дает возможность параллельно выполнять вычислительные процедуры, характерные квантовому компьютингу. Отдельные сервисы синтеза и анализа кубитных моделей цифровых

устройств и компонентов реализованы в виде программных приложений и прошли исчерпывающую апробацию в учебном процессе. Среда проектирования: SWIFT, C++, Verilog, Java и платформы: Microsoft Windows, X Window и Macintosh OS X.

**Публикации.** Результаты научных исследований опубликованы в 22 работах: 4 раздела в монографии (из них 4 входят в наукометрическую базу Scopus), 9 статей (из них 6 – в научных журналах, включенных в «Перечень научных специализированных изданий Украины»; 2 статьи в международных научных журналах за рубежом; 9 статей входят в международные наукометрические базы), а также 9 международных научных конференций (из них 6 за рубежом, 3 входят в наукометрическую базу Scopus). Соискатель имеет 7 публикаций в наукометрической базе Scopus и индекс Хирша  $h=2$ .

Ключевые слова: квантовые модели, квантовые методы, логические X-функции, цифровые системы на кристаллах, memory-driven архитектура, кубитные структуры данных.

**ABSTRACT**

Liubarskyi M.M. Quantum models and methods for logic X-function analysis – Qualification scientific work as a manuscript. Thesis for the degree of candidate of technical sciences (PhD) in specialty 05.13.05 "Computer systems and components". – Kharkov National University of Radio Electronics, Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkov, 2018.

The purpose of the research is reducing the verification time of digital systems-on-chips by using memory-driven architectures and qubit data structures to compactly describe logical X-functions and significantly improve the performance of methods for testing and deductive fault simulation through parallel computing of algorithms.

The research tasks: 1) Develop memory-driven architectures and algorithms for parallel execution of logical operations on qubit data structures when implementing methods for testing and verification of digital systems-on-chips. 2) Improve the quantum methods of test generation and deductive fault simulation of logical functions by synthesizing matrices of Boolean derivatives with respect to their qubit coverage. 3) Develop a structural model of the metric properties of X-functions, focused on the implementation of parallel operations, in order to provide the linear time of test generation and simulation of digital systems. 4) Develop an analytical model for defining qubit coverages of X-functions of a finite number of variables in order to create logic circuits, which do not require exponential costs for the synthesis and analysis of tests. 5) Develop a parallel test generation method for the faults of X-functions of a finite number of variables based on taking the derivatives with respect to qubit coverages, which define tests of minimal length. 6) Develop a parallel method for the synthesis of deductive qubit coverages for the simulation of X-functions based on obtaining a unit matrix of derivatives in order to create a sequencer for fault simulation.

The object of the research is architectures and technologies of parallel computing of logic operations for solving problems of designing, verifying and testing digital systems-on-chips.

The subject of the research is models, methods, algorithms and procedures for parallel synthesis and analysis of specialized logic circuits to create test and verification tools based on qubit data structures.

The scientific and practical task is verification of specialized digital systems-on-chips by using memory-driven architectures and qubit data structures to compactly describe logical X-functions and significantly improve the performance of methods for testing and deductive fault simulation through parallel computing of algorithms.

The essence of the research is quantum models and methods for test synthesis and fault analysis of logical X-functions based on the use of qubit data structures and memory-driven architectures for parallel computing of algorithms in order to significantly improve the performance of testing and deductive simulation of digital systems-on-chips.

Scientific novelty of research results:

1) A structural model of the metrical properties of X-functions is proposed for the first time, focused on executing parallel operations on qubit data structures in order to provide linear time of test generation and simulation of digital systems.

2) An analytical model for the synthesis of qubit coverages of X-functions of a finite number of variables is proposed for the first time, characterizing by the possibility of creating logic circuits, which do not require exponential costs of generating and analyzing tests.

3) A parallel method of test synthesis for the faults of X-functions of a finite number of variables is proposed for the first time, characterizing by taking Boolean derivatives with respect to qubit coverages, which makes it possible to generate tests of minimal length.

4) A parallel method for the synthesis of deductive qubit coverages for simulation of X-functions is proposed for the first time, characterizing by obtaining a unit matrix of derivatives, which makes it possible to create a sequencer for fault simulation that is invariant to the input test patterns.

5) Memory-driven architectures and algorithms for implementing methods for testing and verifying digital systems-on-chips are improved, which are distinguished by the parallel execution of logical operations on qubit data structures.

6) The quantum methods of test generation and deductive fault simulation of logic functions are improved, which differ from analogs in the synthesis of matrices of Boolean derivatives with respect to their qubit coverages.

The practical significance of the research results. Models, data structures, methods for synthesizing and analyzing logic circuits, including X functions, have been developed, which make it possible to significantly reduce the time of test synthesis and fault simulation through the qubit description of digital circuits, that makes it possible to simultaneously perform computational procedures related to quantum computing. Some services for the synthesis and analysis of qubit models of digital devices and components are implemented in the form of software applications and in the educational process in training courses “Quantum Computing”, “Fundamentals of computer diagnostics”, «System-on-Chip». Design environment includes SWIFT, C++, Verilog, Java and platforms: Microsoft Windows, X Window and Macintosh OS X.

The results of the dissertation work are reflected in 22 printed works, among which is 4 chapters in foreign monograph of the publishing house Springer (Scopus science-base); 9 articles (6 – in scientific journals included in the "Perelik Naukovych Fakhovikh Vidany of Ukraine"; 2 articles in international scientific journals abroad; 9 articles in the international scientific and metric database); as well as 9 materials of international scientific conferences (6 of them – in abroad, 3 are included in Scopus scientific and metric database). The applicant has 7 publications in the science-based Scopus database and the Hirsch index  $h = 2$ .

Key words: quantum models, quantum methods, logical X-functions, digital system-on-chip, memory-driven architecture, qubit data structures.

Підписано до друку 27.12.2018. Формат 60x84 1/16. 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