

РЕЦЕНЗІЯ

**доктора технічних наук, професора,
професора кафедри комп'ютерних наук
навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича**

УГРИНА Дмитра Ілліча

на дисертаційне дослідження Кирилюка Тараса Петровича

«Синтез відмовостійких зворотних логічних пристроїв

методами штучного інтелекту»»,

подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю

121 – Інженерія програмного забезпечення,

галузь знань 12 – Інформаційні технології

Актуальність дисертаційного дослідження

Варто відзначити, що характерною рисою сучасного етапу розвитку інформаційних технологій є широке впровадження методів штучного інтелекту, зокрема еволюційних обчислень, для розв'язання надскладних оптимізаційних задач у різних галузях. Разом з тим, нагальна потреба практичного створення та масштабування квантових комп'ютерів, які за своєю природою є фізично і логічно зворотними системами, вимагає принципово нових підходів до моделювання їх базових елементів. Теоретичною та практичною основою таких досліджень цілком закономірно стають інтелектуальні методи синтезу та аналізу, що дозволяють ефективно оперувати концептами зворотності та енергоефективності.

Кирилюк Т. П. слушно зауважує, що попри наявність класичних аналітичних та діаграмних методів, таких як бінарні діаграми прийняття рішень чи таблиці істинності, їхнім критичним недоліком залишається експоненційне зростання обчислювальної складності пропорційно до збільшення простору рішень. Крім того, в сучасній науковій літературі залишаються недостатньо висвітленими питання апаратного забезпечення надійності квантових обчислень, зокрема автоматизованого синтезу логічних схем, що є стійкими до відмов.

З огляду на зазначене, розробка та вдосконалення методів оптимального синтезу зворотних відмовостійких логічних пристроїв із застосуванням методів еволюційного пошуку є своєчасною, науково обґрунтованою та безперечно актуальною задачею, що повністю відповідає викликам сучасної комп'ютерної інженерії.

Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами

Дисертаційна робота Кирилюка Т. П. виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Дослідження, що складають основу дисертації, безпосередньо пов'язані з виконанням планових наукових тем кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, зокрема в межах виконання науково-дослідної роботи за темою: «Дослідження, моделювання та розробка програмного забезпечення складних динамічних систем» (Державний реєстраційний номер 0121U109232).

У межах виконання зазначеної наукової програми здобувачем особисто розроблено математичні моделі та алгоритми еволюційного пошуку для структурного синтезу відмовостійких логічних пристроїв на базі узагальнених вентилів Фредкіна, що сприяло успішному виконанню етапів зазначеної теми. Отримані результати є вагомим внеском у реалізацію завдань вказаних програм.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків, рекомендацій, сформульованих у дисертації

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені у дисертації Кирилюка Т. П., характеризуються високим ступенем обґрунтованості, що базується на комплексному використанні сучасного математичного апарату та передових методів інформаційних технологій.

Обґрунтованість результатів дослідження забезпечується:

1. Методологічним фундаментом: автор ефективно поєднує методи штучного інтелекту, зокрема, еволюційні обчислення, з теорією побудови зворотних та квантових схем. Використання об'єктно-орієнтованого

представлення хромосом та адаптивних операторів мутації є логічно виправданим для розв'язання задач структурного синтезу великої розмірності.

2. Достовірністю отриманих даних: основні теоретичні результати підтвержені шляхом комп'ютерного моделювання та верифікації синтезованих схем у спеціалізованому середовищі IBM Qiskit. Додатковим підтвердженням достовірності є програмна реалізація відмовостійкого зворотного шифратора на базі FPGA, що демонструє практичну придатність запропонованих моделей.

3. Глибиною аналізу наукових джерел: дисертація спирається на ґрунтовний аналіз сучасних наукових праць вітчизняних та закордонних фахівців у галузі квантових обчислень та еволюційного моделювання.

4. Апробацією результатів: основні положення роботи пройшли належну експертну оцінку на міжнародних наукових конференціях, зокрема у Польщі та Китаї, та опубліковані у провідних наукових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз.

Таким чином, висновки дисертації не викликають сумнівів і логічно випливають із проведених теоретичних та експериментальних досліджень.

Структура дисертації

Дисертаційна робота Кирилюка Т. П. має традиційну для таких робіт академічну структуру, яка логічно зумовлена метою та завданнями дослідження.

Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 245 сторінок, з яких основний текст займає 189 сторінок. Текст дисертації органічно доповнено 38 рисунками та 11 таблицями, які сприяють кращому сприйняттю запропонованих моделей та алгоритмів. Список використаних джерел налічує 115 найменувань.

Варто відзначити, що побудова роботи є чіткою та послідовною:

1. У вступі грамотно сформульовано науковий апарат дослідження.
2. У першому розділі подано ґрунтовний аналіз стану проблеми синтезу відмовостійких зворотних та квантових схем.

3. Другий та третій розділи присвячені безпосередньо теоретичним розробкам: створенню математичних моделей, розширенню базису вентилів Фредкіна та розробці модифікованого генетичного алгоритму.

4. У четвертому розділі описано програмну і апаратну (як елемент верифікації) складові, а також результати експериментальних досліджень та верифікації в IBM Qiskit.

5. У висновках лаконічно та повно підбито підсумки роботи, що повністю корелюють із поставленими на початку завданнями.

Зміст дисертації, її обсяг та оформлення повністю відповідають нормативним вимогам МОН України щодо оформлення дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Наукова новизна

Наукова новизна дисертаційного дослідження Кирилюка Т. П. полягає у розробці та вдосконаленні теоретико-методологічних основ синтезу відмовостійких зворотних логічних схем із використанням інтелектуальних методів еволюційного пошуку.

Найважливішими результатами, що визначають наукову новизну роботи, є:

1. Вперше розроблено математичну модель структурного синтезу відмовостійких зворотних пристроїв на основі узагальнених вентилів Фредкіна. На відміну від існуючих підходів, дана модель враховує властивість збереження парності сигналів, що дозволяє виявляти помилки безпосередньо на логічному рівні без значного збільшення обчислювальних витрат.

2. Удосконалено генетичний метод синтезу оптимальної топології зворотних схем за рахунок впровадження об'єктно-орієнтованого представлення хромосоми та адаптивних операторів мутації. Це дозволило істотно скоротити простір пошуку рішень та підвищити ймовірність знаходження глобального оптимуму для схем великої розмірності.

3. Дістало подальший розвиток використання базису реконфігурованих вентилів Фредкіна для побудови складних функціональних вузлів. Автор

розширив можливості існуючих бібліотек елементів, що дозволило зменшити загальну квантову вартість синтезованих пристроїв.

4. Запропоновано підхід до інтегрованої верифікації синтезованих відмовостійких схем через автоматизовану трансляцію у формат OpenQASM. Це забезпечило можливість прямого тестування результатів на реальних квантових процесорах або симуляторах середовища IBM Qiskit.

Сформульовані наукові положення є вагомим внеском у розвиток теорії та практики автоматизованого проєктування енергоефективних та надійних комп'ютерних систем.

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення одержаних результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що розроблені здобувачем теоретичні моделі та алгоритми доведені до рівня конкретних програмно-апаратних рішень, які можуть бути безпосередньо впроваджені у практику автоматизованого проєктування сучасних обчислювальних систем.

Серед найбільш вагомих практичних результатів варто відзначити такі:

1. Створення програмного комплексу автоматизованого синтезу, який є дієвим інструментом для проєктування відмовостійких зворотних логічних пристроїв із мінімальною квантовою вартістю.

2. Розробка модуля трансляції схем у формат OpenQASM, що разом із запропонованими підходами до інтеграції з середовищем IBM Qiskit забезпечує інженерам та дослідникам можливість зручної верифікації складних квантових алгоритмів.

3. Апаратна реалізація відмовостійкого зворотного шифратора на базі FPGA з використанням узагальнених вентилів Фредкіна. Дане рішення становить значний інтерес для індустрії та може використовуватися для створення надійних та енергоефективних компонентів систем на кристалі, а також апаратних модулів криптографічних систем.

4. Крім того, результати досліджень мають дидактичну цінність і можуть бути інтегровані в освітній процес, наприклад, на кафедрах програмного забезпечення комп'ютерних систем та комп'ютерних систем і мереж, під час викладання дисциплін, пов'язаних з теорією алгоритмів, архітектурою комп'ютерних систем та квантовими обчисленнями.

Загалом, практична реалізація підтверджує життєздатність та високу ефективність запропонованих у дисертації теоретичних концепцій.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу Кирилюка Т. П. за її наукову новизну та практичну спрямованість, водночас вважаю за доцільне висловити деякі дискусійні положення та зауваження:

1. У першому розділі, присвячених аналізу сучасного стану зворотних та квантових обчислень, автор детально розглядає існуючі підходи до синтезу зворотних схем і методи забезпечення відмовостійкості. Водночас недостатньо уваги приділено аналізу практичних обмежень сучасних квантових апаратних платформ, зокрема впливу декогеренції, квантового шуму та обмеженої кількості фізичних кубітів на реалізацію складних схем. Доповнення огляду такими аспектами дозволило б повніше обґрунтувати актуальність задачі оптимізації квантових і зворотних схем.

2. У роботі автор використовує цільову функцію, що включає декілька параметрів: квантову вартість, кількість вентилів та кількість помилок при обчисленні схеми. Проте, у розділі 3 недостатньо детально описано процедуру вибору вагових коефіцієнтів для кожного з цих критеріїв. Було б доцільно уточнити, чи проводився аналіз чутливості результатів синтезу до зміни пріоритетності цих параметрів.

3. У тексті дисертації описано процес трансляції схем у формат OpenQASM. Потребує додаткового роз'яснення питання про те, чи враховує розроблений метод синтезу обмеження «глибини» квантової схеми, що є критичним

параметром для реальних квантових процесорів з обмеженим часом декогеренції кубітів.

4. У підрозділі 4.2.1, присвяченому трансляції синтезованих схем у формат OpenQASM, автор обґрунтовує сумісність із платформами IBM Qiskit, Google Cirq та Rigetti Forest, проте в роботі відсутній аналіз впливу топологічних обмежень реальних квантових процесорів (qubit connectivity) на ефективність отриманих схем. Було б доцільно розглянути, наскільки синтезовані схеми потребують додаткових SWAP-операцій при адаптації до конкретних квантових архітектур, оскільки це може суттєво впливати на глибину схеми та накопичення помилок.

5. У розділі 4 автор успішно реалізував відмовостійкий шифратор на базі FPGA Altera Cyclone IV. Проте, оскільки FPGA за своєю архітектурою є фізично незворотною системою, виникає дискусійне питання: які саме переваги, окрім верифікації логіки, дає використання саме зворотних вентилів у традиційній напівпровідниковій базі, порівняно з класичними відмовостійкими рішеннями?

6. У підрозділі 4.3.4 «Аналіз апаратних витрат та експериментальна верифікація» автор детально аналізує використання логічних ресурсів FPGA та часові характеристики реалізованого шифратора, однак недостатньо уваги приділено питанням енергоспоживання та теплових характеристик системи. Для практичного впровадження відмовостійких криптографічних пристроїв, особливо в системах реального часу, доцільно було б навести оцінки споживаної потужності або порівняння енергоефективності запропонованої архітектури з класичними FPGA-рішеннями.

7. У тексті зустрічаються окремі стилістичні неточності та незначні помилки у термінологічних зворотах (наприклад, поєднання англійських та українських назв параметрів у деяких таблицях), що, втім, не впливає на загальний високий рівень дисертації.

Зазначені зауваження та побажання мають дискусійний характер і не впливають на загальну позитивну оцінку виконаного дослідження.

Загальний висновок

Оцінюючи дисертаційну роботу Кирилюка Тараса Петровича «Синтез відмовостійких зворотних логічних пристроїв методами штучного інтелекту» в цілому, є всі підстави стверджувати, що вона є завершеною, самостійно виконаною науковою працею, яка містить нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності вирішують важливу науково-прикладну задачу підвищення ефективності та надійності автоматизованого проєктування зворотних логічних пристроїв.

За своєю актуальністю, науково-теоретичним рівнем, обґрунтованістю положень, новизною та практичним значенням результатів, дисертація цілком відповідає вимогам пунктів 6, 7, 8, 9 «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України № 44 від 12 січня 2022 року (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від 21.03.2022 р., № 502 від 19.05.2023 р. та № 507 від 03.05.2024 р.).

Автор роботи, Кирилюк Тарас Петрович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення» у галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Рецензент

Доктор технічних наук,
професор кафедри комп'ютерних наук
навчально-наукового інституту фізико-технічних
та комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Дмитро УГРИН

