

ВІДГУК

**офіційного опонента - кандидата фізико-математичних наук, доцента,
завідувача кафедри системного проектування
Львівського національного університету імені Івана Франка
ШУВАРА Романа Ярославовича
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

Сучасний етап розвитку інформаційних технологій характеризується стрімким впровадженням методів штучного інтелекту, зокрема еволюційних обчислень, для розв'язання складних оптимізаційних задач у науці та техніці. Водночас, нагальна потреба у створенні та масштабуванні квантових комп'ютерів, які за своєю фізичною та логічною природою є зворотними системами, вимагає принципово нових підходів до моделювання їхніх базових компонентів. Варто відзначити, що існуючі аналітичні та діаграмні методи (такі як бінарні діаграми прийняття рішень чи таблиці істинності) мають суттєвий недолік — експоненційне зростання складності при збільшенні простору рішень, що значно обмежує їхнє практичне застосування для проектування схем великої розмірності. Крім того, критично важливим, проте недостатньо дослідженим, залишається питання забезпечення надійності обчислень, зокрема через автоматизований синтез схем, стійких до відмов.

З огляду на це, дисертаційне дослідження Кирилюка Т. П., присвячене розробці та вдосконаленню методів оптимального синтезу зворотних відмовостійких логічних пристроїв на основі еволюційних методів, є актуальним. Робота безпосередньо спрямована на вирішення науково-прикладної задачі підвищення ефективності проектування квантових та зворотних логічних схем, що мають мінімальну квантову вартість та здатність до збереження парності сигналів на базі узагальнених вентилів Фредкіна.

Використання інтелектуальних методів синтезу та аналізу дозволяє оперувати концептами зворотності й енергоефективності на новому рівні, що робить обраний автором напрям дослідження своєчасним та перспективним для галузі інженерії програмного забезпечення та квантових обчислень.

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» (номер державної реєстрації 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. Це сприяло успішному виконанню окремих етапів зазначеної теми, а отримані результати є вагомим внеском у реалізацію завдань вказаної програми, що свідчить про наукову та практичну значущість проведених досліджень у контексті загальнодержавних та університетських планів.

Оцінка обґрунтованості наукових результатів дисертації, їх достовірності та новизни

Аналіз представленої роботи дозволяє стверджувати, що наукові положення, висновки та результати, сформульовані в дисертації, мають високий ступінь обґрунтованості та достовірності. Це підтверджується застосуванням сучасного математичного апарату: теорії графів, булевої алгебри та методів еволюційних

обчислень, а також коректним поєднанням теоретичних досліджень з експериментальною перевіркою у середовищах моделювання та на реальному обладнанні, реалізованому на ПЛІС Altera Cyclone IV

Наукова новизна одержаних результатів полягає у наступному:

1. Вперше розроблено математичну модель структурного синтезу відмовостійких зворотних логічних пристроїв на базі узагальнених вентилів Фредкіна. На відміну від існуючих підходів, запропонована модель дозволяє враховувати вимоги до збереження парності сигналів, що забезпечує можливість виявлення помилок безпосередньо на рівні топології схеми.
2. Вперше запропоновано модифікований генетичний метод для пошуку оптимальних рішень у просторі топологій зворотних схем. Оригінальність методу полягає у використанні об'єктно-орієнтованого представлення хромосоми та впровадженні адаптивних операторів мутації. Це дозволило ефективно вирішити проблему «експоненційного вибуху» складності та забезпечити високу швидкість збіжності алгоритму для схем великої розмірності.
3. Удосконалено інформаційну технологію автоматизованого проектування квантових та зворотних схем завдяки інтеграції розробленого модуля трансляції у формат OpenQASM. Це забезпечило наскрізний цикл проектування: від еволюційного синтезу до верифікації на хмарних квантових процесорах IBM.
4. Дістали подальший розвиток підходи до реалізації енергоефективних обчислювальних компонентів на базі програмованих логічних інтегральних схем – FPGA, що дозволило експериментально підтвердити працездатність синтезованих відмовостійких зворотних пристроїв, зокрема зворотного шифратора.

Достовірність результатів дисертації підтверджується збігом результатів теоретичних розрахунків із даними, отриманими під час моделювання в IBM Qiskit, а також широкою апробацією на міжнародних наукових конференціях та

публікаціями у наукових виданнях, що індексуються наукометричною базою Scopus.

Оцінка змісту дисертації, її завершеність та дотримання принципів академічної доброчесності

Дисертація Кирилюка Т. П. є завершеною науковою працею, виконаною на високому методичному рівні. Робота має логічну структуру, що відповідає поставленій меті та завданням дослідження. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та додатків.

У першому розділі автором проведено ґрунтовний аналіз сучасного стану розвитку теорії зворотних та квантових обчислень. Визначено основні проблеми існуючих методів синтезу, зокрема проблему експоненційного зростання складності та необхідність забезпечення відмовостійкості. Сформульована наукова задача є обґрунтованою та актуальною.

У другому розділі представлено теоретичний базис дослідження. Здобувачем розроблено математичну модель структурного синтезу на основі узагальнених вентилів Фредкіна. Особливої уваги заслуговує підхід до забезпечення контролю парності, що є ключовим фактором для побудови надійних відмовостійких систем.

Третій розділ присвячений розробці модифікованого генетичного методу. Автор обґрунтував переваги використання об'єктно-орієнтованого представлення хромосом, що дозволило значно скоротити простір пошуку оптимальних рішень. Запропоновані адаптивні оператори мутації підвищують ефективність синтезу топологій схем великої розмірності.

У четвертому розділі описано практичну реалізацію розроблених методів у вигляді інформаційної технології. Продемонстровано успішну інтеграцію із сучасними квантовими симуляторами (IBM Qiskit) через розроблений модуль трансляції OpenQASM. Експериментальна верифікація на FPGA підтверджує працездатність синтезованих пристроїв у реальних умовах.

Дисертація характеризується завершеністю та цілісністю. Усі розділи логічно пов'язані між собою, а висновки відповідають поставленим завданням.

Щодо академічної доброчесності: Аналіз дисертаційної роботи, анотації та опублікованих праць свідчить про дотримання здобувачем принципів академічної доброчесності. У роботі відсутні факти плагіату, фабрикації чи фальсифікації даних. Посилання на джерела є коректними, а результати, отримані у співавторстві, чітко розмежовані із особистим внеском автора (що також відображено у публікаціях).

Практичне значення одержаних результатів

Практичне значення дисертаційного дослідження Кирилюка Т. П. визначається спрямованістю розроблених методів на вирішення конкретних інженерних задач у галузі проектування сучасних обчислювальних систем.

До основних практичних результатів роботи слід віднести:

1. **Програмний комплекс автоматизованого синтезу**, який реалізує запропонований модифікований генетичний метод. Цей інструментарій дозволяє розробникам програмного забезпечення та архітекторам комп'ютерних систем автоматично генерувати топології зворотних схем із заданими властивостями відмовостійкості, значно скорочуючи час на проектування складних логічних вузлів.
2. **Спеціалізований модуль трансляції у формат OpenQASM**, що забезпечує сумісність синтезованих рішень із сучасними квантовими хмарними платформами. Це дозволяє проводити верифікацію та запуск розроблених алгоритмів на реальних квантових процесорах (зокрема, IBM Quantum), що є критично важливим для перевірки теоретичних гіпотез у реальних умовах.
3. **Апаратну реалізацію відмовостійкого зворотного шифратора на базі FPGA**. Експериментальне підтвердження працездатності синтезованого пристрою на програмованих логічних інтегральних схемах доводить

ефективність використання узагальнених вентилів Фредкіна для створення енергоефективних та надійних компонентів систем на кристалі.

4. **Впровадження результатів у навчальний процес.** Матеріали дисертаційного дослідження, зокрема підходи до еволюційного моделювання та теорії квантових обчислень, використовуються у Чернівецькому національному університеті імені Юрія Федьковича під час викладання дисциплін «Теорія алгоритмів», «Архітектура комп'ютерних систем» та «Квантові обчислення».

Загалом, результати роботи мають як безпосереднє прикладне значення для розробки спеціалізованого ПЗ, так і методологічну цінність для підготовки фахівців у галузі інженерії програмного забезпечення та комп'ютерних наук.

Мова та стиль викладення результатів

Дисертаційна робота Кирилюка Т. П. написана державною мовою з дотриманням норм сучасного наукового стилю. Виклад матеріалу характеризується логічною послідовністю, чіткістю формулювань та доказовістю висновків.

Варто відзначити наступні позитивні аспекти:

1. **Термінологічна точність** – автор фахово оперує понятійним апаратом у галузі інженерії програмного забезпечення, штучного інтелекту та квантових обчислень. Такі специфічні терміни, як «квантова вартість», «вентиль Фредкіна», «об'єктно-орієнтована хромосома» та «OpenQASM-трансляція», вживаються коректно та в єдиному контексті протягом усієї роботи.
2. **Академічність викладу** – текст дисертації позбавлений надмірних мовних засобів. Кожен розділ завершується стислими, але змістовними висновками, що демонструє високу культуру наукового мислення здобувача.
3. **Якість ілюстративного матеріалу** – графічний матеріал (схеми синтезованих зворотних пристроїв, графіки збіжності генетичного

алгоритму, фрагменти програмного коду) органічно доповнює текстову частину, є зрозумілим та спрощує сприйняття складних математичних моделей.

4. **Відповідність вимогам** – 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 з яких значна частина — англомовні публікації останніх 5 років, що свідчить про глибоке вивчення автором сучасного світового наукового доробку.

Загалом, рівень та стиль викладення результатів відповідають статусу кваліфікаційної наукової праці на здобуття ступеня доктора філософії.

Оприлюднення результатів дисертаційної роботи

Основні теоретичні положення та практичні результати дисертації пройшли належну апробацію та повною мірою висвітлені у наукових публікаціях. За темою дисертації опубліковано 5 робіт, з яких 4 статті — у рецензованих виданнях, проіндексованих у наукометричній базі Scopus.

Апробація результатів:

Основні результати роботи доповідались та обговорювались на наукових семінарах кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем ЧНУ імені Юрія Федьковича, а також на представницьких міжнародних конференціях, зокрема:

1. The 6th International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications (ICCSEEA2023) яка проходила у Варшаві, Польща 17–19 березня 2023 року;

2. Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (ITCM-2023) яка проходила в місті Івано-Франківськ, 6–8 липня 2023 року;

3. The 8th International Conference on Artificial Intelligence, Medical Engineering, Education (AIMEE2024) – Huangshi, China, October 26–27, 2024.

Кількість та якість публікацій повністю відповідають вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії...», а зміст оприлюднених праць адекватно та повно відображає основні наукові результати, викладені у дисертації.

Недоліки та зауваження до дисертаційної роботи

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, вважаю за необхідне висловити наступні зауваження та побажання дискусійного характеру:

1. У другому розділі, при розробці математичної моделі структурного синтезу, автор використовує узагальнені вентиля Фредкіна. Разом з тим, потребує додаткового обґрунтування вибір стратегії розміщення контрольних ліній парності: чи є запропоноване автором розміщення оптимальним з точки зору мінімізації загальної кількості надлишкових ліній, що є критичним для сучасних NISQ-пристроїв.
2. При описі модифікованого генетичного методу (Розділ 3) автор впроваджує адаптивні оператори мутації. Проте, було б доцільно уточнити критерії, за якими відбувається перемикання між різними типами мутацій у процесі еволюції. Чи не призводить надмірна адаптивність до передчасної збіжності алгоритму в локальних екстремумах при синтезі схем із великою кількістю входів/виходів?
3. Запропоноване об'єктно-орієнтоване представлення хромосоми є оригінальним і перспективним. Однак у роботі недостатньо висвітлено питання валідації хромосом після застосування оператора кросинговеру. Зокрема, не до кінця зрозуміло, як саме забезпечується збереження

властивості зворотності (бієктивності) синтезованої функції на рівні генотипу без значних часових витрат на додаткові перевірки.

4. Експериментальна частина (Розділ 4) містить аналіз працездатності синтезованого відмовостійкого шифратора. Варто зауважити, що автор зосередився на моделі одиночних відмов (single bit-flip). Викликає зацікавленість питання: наскільки масштабованими є запропоновані методи синтезу для виявлення та виправлення множинних помилок або помилок фазового зсуву (phase-flip), які є специфічними для квантового середовища?
5. У підрозділах, присвячених інформаційній технології, детально описано архітектуру програмного комплексу. Проте, з точки зору інженерії програмного забезпечення, було б доцільно навести дані щодо модульного тестування (unit testing) розроблених еволюційних операторів, що дозволило б підтвердити надійність самого програмного інструментарію синтезу.
6. При порівнянні результатів синтезу з існуючими методами (Розділ 4) автор наводить дані щодо зменшення квантової вартості. Було б корисно побачити в дисертації порівняльний графік залежності часу роботи алгоритму синтезу від розмірності задачі (кількості змінних), щоб оцінити межу практичного застосування розробленої технології для схем понад 10-15 кубітів.
7. При аналізі графічного матеріалу та таблиць виявлено певну неоднорідність у представленні технічних параметрів, що проявляється у змішуванні англійських термінів із їхніми українськими відповідниками. Окрім цього, у роботі трапляються поодинокі стилістичні помилки, які, проте, мають суто технічний характер і не применшують наукову цінність отриманих автором результатів.

Зазначені зауваження не зменшують наукову і практичну цінність дисертаційної роботи, мають характер побажань для подальшої наукової діяльності здобувача та спрямовані на стимулювання фахової дискусії під час захисту.

Висновок про дисертаційну роботу

Підсумовуючи результати аналізу дисертації Кирилюка Тараса Петровича на тему «Синтез відмовостійких зворотних логічних пристроїв методами штучного інтелекту», є всі підстави констатувати, що представлена праця є цілісним, завершеним та самостійним науковим дослідженням. Отримані автором результати характеризуються науковою новизною та в сукупності забезпечують розв'язання значущої науково-прикладної задачі — розробки інтелектуальних засобів для підвищення надійності та ефективності автоматизованого синтезу зворотних логічних структур.

За рівнем актуальності, глибиною теоретичного обґрунтування, новизною положень та практичною цінністю висновків, дисертаційне дослідження повністю відповідає критеріям, визначеним у пунктах 6 – 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.).

З огляду на вищевикладене, автор роботи Кирилюк Тарас Петрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії (PhD) у галузі знань 12 – «Інформаційні технології» за спеціальністю 121 – «Інженерія програмного забезпечення».

Офіційний опонент:

Кандидат фізико-математичних наук, доцент,
завідувач кафедри системного проектування
Львівського національного університету
імені Івана Франка

Роман ШУВАР

Підпис Романа ШУВАРА засвідчую

Вчений секретар
Львівського національного університету
імені Івана Франка

Ольга ГРАБОВЕЦЬКА

