

ВІДГУК

офіційного опонента – доктора технічних наук, професора,
професора кафедри систем штучного інтелекту
Національного університету «Львівська політехніка»

ВИКЛЮКА Ярослава Ігоровича

на дисертаційну роботу **Кирилюка Тараса Петровича**
на тему «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

Характерною рисою сучасного етапу розвитку інформаційних технологій є стрімке впровадження методів штучного інтелекту, зокрема еволюційних обчислень, для розв'язання складних оптимізаційних задач у науці та техніці. Варто відзначити, що нагальна потреба у практичному 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.

Кирилюк Т. П. слушно зауважує, що існуючі аналітичні та діаграмні методи (такі як бінарні діаграми прийняття рішень або таблиці істинності) мають суттєвий недолік – експоненційне зростання складності при збільшенні простору рішень, що значно обмежує їхнє практичне застосування для розробки складних пристроїв. Крім того, на сьогодні залишаються недостатньо дослідженими питання забезпечення надійності обчислень, зокрема автоматизованого синтезу схем, стійких до відмов.

Зважаючи на вищевикладене, дисертаційне дослідження, спрямоване на розробку та вдосконалення методів оптимального синтезу зворотних відмовостійких логічних пристроїв на підставі використання еволюційних алгоритмів, є надзвичайно актуальним. Робота безпосередньо корелює з

потребами сучасної інженерії програмного забезпечення в частині створення енергоефективних та надійних обчислювальних систем.

Аналіз змісту дисертації та основні результати роботи

Ознайомлення з представленою роботою дозволяє стверджувати, що дисертація Кирилюка Т. П. є цілісним і завершеним науковим дослідженням, виконаним на високому методичному рівні. Логіка викладу матеріалу чітко підпорядкована досягненню поставленої мети, а структура роботи відображає послідовні етапи розв'язання наукової задачі. 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.

Розгортаючи дослідження, автор розпочинає з ґрунтовного аналізу теоретичного підґрунтя зворотних та квантових обчислень. У *першому* розділі дисертант не просто оглядає літературу, а критично виокремлює ключові бар'єри галузі – зокрема, експоненційне зростання складності синтезу та гостру дефіцитність методів забезпечення відмовостійкості. Це створює надійний фундамент для подальших авторських розробок.

Теоретичний пошук логічно продовжується у *другому* розділі, де здобувач пропонує математичну модель структурного синтезу. Важливою знахідкою автора є використання потенціалу узагальнених вентилів Фредкіна. Такий вибір дозволив реалізувати концепцію контролю парності, що, на мою думку, є найбільш раціональним шляхом до побудови надійних систем без надмірного апаратного ускладнення.

Третій розділ присвячений алгоритмічній складовій. Автор відходить від стандартних схем генетичних алгоритмів, впроваджуючи об'єктно-орієнтоване представлення хромосом. Це рішення виглядає цілком виправданим, оскільки воно дозволяє ефективно "стиснути" простір пошуку, а розроблені адаптивні

оператори мутації роблять процес синтезу гнучким та результативним навіть для топологій великої розмірності.

Практична цінність роботи повною мірою розкривається у *четвертому* розділі. Перехід від теоретичних моделей до реальної інформаційної технології підтверджується інтеграцією з інструментарієм IBM Qiskit. Модуль трансляції у формат OpenQASM та успішна верифікація на FPGA-платформах свідчать про те, що отримані результати мають не лише кабінетний характер, а й цілком готові до застосування в реальних інженерних задачах.

Варто окремо підкреслити високу академічну культуру здобувача. Аналіз дисертації та опублікованих праць підтверджує бездоганне дотримання принципів академічної доброчесності. У роботі відсутні будь-які ознаки плагіату чи фальсифікації. Автор коректно працює з джерелами, а у випадку публікацій у співавторстві – чітко розмежовує власний науковий внесок, що свідчить про чесність та професіоналізм дослідника.

Наукова новизна, оцінка обґрунтованості наукових положень дисертаційного дослідження та їх достовірності

Наукова новизна отриманих результатів не викликає сумнівів і полягає у вирішенні важливої прикладної задачі – автоматизації проектування надійних зворотних структур. Аналізуючи матеріали роботи, вважаю за доцільне виділити такі ключові аспекти новизни:

1. Вперше запропоновано математичну модель структурного синтезу відмовостійких зворотних логічних пристроїв. Оригінальність підходу полягає у використанні узагальнених вентилів Фредкіна як базису, що дозволяє ще на етапі логічного проектування забезпечити властивість збереження парності сигналів. Це є вагомим внеском у розвиток теорії синтезу схем із вбудованим контролем помилок.
2. Удосконалено модель еволюційного пошуку для синтезу оптимальних топологій. Завдяки впровадженню об'єктно-орієнтованого представлення хромосом, автору вдалося значно раціоналізувати простір пошуку рішень,

що позитивно вплинуло на обчислювальну складність алгоритму та якість фінальних схем.

3. Дістали подальший розвиток адаптивні оператори генетичного пошуку, зокрема оператори мутації, які були специфіковані під архітектурні особливості зворотних пристроїв. Це дозволило підвищити стійкість алгоритму до потрапляння в локальні екстремуми при роботі зі схемами великої розмірності.
4. Розроблено архітектуру інформаційної технології, яка вперше інтегрує методи штучного інтелекту з інструментами квантового програмування через спеціалізований модуль трансляції у формат OpenQASM, що забезпечує прямий місток між синтезованою моделлю та реальним квантовим залізом.

Обґрунтованість наукових положень дисертації базується на коректному застосуванні перевіреного математичного апарату: теорії множин, теорії графів та методології еволюційних обчислень. Автор демонструє глибоке розуміння фізичних та логічних обмежень квантових обчислень, що робить його теоретичні висновки логічними та послідовними.

Достовірність результатів підтверджується строгістю проведених експериментів. Використання загальновизнаних тестових функцій, порівняльний аналіз із відомими методами та успішна верифікація синтезованих схем у середовищі IBM Qiskit і на FPGA-платах дають підстави повною мірою довіряти отриманим даним. Додатковим підтвердженням достовірності є позитивна оцінка результатів науковою спільнотою на міжнародних конференціях та публікації у виданнях, що входять до наукометричних баз Scopus.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами та темами

Дисертація Кирилюка Т. П. виконана відповідно до планів науково-дослідних робіт Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Дослідження є складовою частиною планової наукової теми кафедри

програмного забезпечення комп'ютерних систем: «Дослідження, моделювання та розробка програмного забезпечення складних динамічних систем» (Державний реєстраційний номер 0121U109232).

Особистий внесок здобувача у виконання зазначеної теми полягає у розробці математичних моделей та алгоритмів еволюційного пошуку для структурного синтезу відмовостійких логічних пристроїв. Отримані результати сприяли успішній реалізації етапів НДР, що підтверджує тісний зв'язок дисертації з науково-технічними програмами університету.

Теоретичне та практичне значення результатів

Наукова значущість дисертаційного дослідження Кирилюка Т. П. полягає у суттєвому поглибленні теоретичної бази автоматизованого проектування енергоефективних обчислювальних систем. Автор запропонував оригінальну математичну модель структурного синтезу, яка розширює теорію зворотних обчислень шляхом інтеграції принципів контролю парності безпосередньо в логічну структуру пристроїв. Фундаментальним внеском є обґрунтування використання реконфігурованих вентилів Фредкіна, що дозволило формалізувати складні топологічні зв'язки та розробити адаптивні оператори еволюційного пошуку для систем великої розмірності.

Практична цінність роботи виявляється у високій ефективності розробленого інструментарію. Завдяки застосуванню створеного програмного комплексу та вдосконаленого генетичного методу, дисертанту вдалося автоматизовано синтезувати 24 нові логічні функції на базі реконфігурованого вентиля Фредкіна. Ці результати відкривають широкі можливості для проектування складних відмовостійких вузлів обробки інформації з оптимізованою квантовою вартістю.

Додатково практичне значення підтверджується розробкою модуля трансляції у формат OpenQASM, що забезпечує повну сумісність авторських рішень із квантовими процесорами на платформі IBM Qiskit. Успішна реалізація синтезованих пристроїв на FPGA-платах доводить їхню життєздатність у складі реальних систем на кристалі. Крім того, результати дослідження інтегровані в

навчальний процес Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича, збагачуючи методичну базу дисциплін з архітектури комп'ютерних систем та квантових обчислень.

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях

Основні наукові положення, теоретичні висновки та практичні результати дисертаційного дослідження достатньою мірою відображені в опублікованих працях здобувача. Загальна кількість публікацій та їхній рівень повністю відповідають встановленим нормам для робіт на здобуття ступеня доктора філософії.

Зокрема, за темою дисертації опубліковано наукові статті у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus (зокрема, у виданнях рівня Q3). Це свідчить про високу якість отриманих результатів та їхнє визнання міжнародною науковою спільнотою. У статтях детально висвітлено питання математичного моделювання відмовостійких пристроїв, особливості об'єктно-орієнтованого кодування генетичних алгоритмів та результати експериментальної верифікації синтезованих схем.

Крім того, результати дослідження пройшли належну апробацію на міжнародних науково-практичних конференціях у Польщі, Китаї та Україні:

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.

Тези доповідей та матеріали конференцій підтверджують послідовність оприлюднення етапів роботи. Зміст опублікованих праць повною мірою розкриває концепцію дисертації, а розмежування внеску у працях, виконаних у

співавторстві, чітко вказує на самостійність виконання основних етапів дослідження Кирилюком Т. П.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження

Позитивно оцінюючи дисертаційну роботу в цілому, вважаю за необхідне висловити низку зауважень та побажань, що мають дискусійний або уточнювальний характер:

1. У роботі запропоновано об'єктно-орієнтоване представлення хромосом, що є цікавим інженерним рішенням. Проте варто було б детальніше обґрунтувати, як такий підхід впливає на обчислювальну складність генетичних операторів порівняно з класичним векторизованим представленням, особливо при масштабуванні кількості вентилів у схемі.
2. Опис програмного комплексу був би повнішим, якби здобувач навів результати профілювання розробленого ПО: які саме етапи генетичного алгоритму є найбільш ресурсоемними та чи потребує запропонована інформаційна технологія паралельних обчислень для обробки схем надвеликої розмірності.
3. Автор обґрунтовано впроваджує адаптивні оператори мутації, але в дисертації не до кінця розкрито питання «генетичного виродження» популяції. Варто пояснити, які саме механізми (окрім мутації) використовуються для підтримки різноманітності рішень у популяції при синтезі пристроїв з великою кількістю вхідних ліній.
4. У роботі потребує більш глибокого висвітлення питання параметричної стійкості та збіжності еволюційного алгоритму при масштабуванні простору пошуку. Зокрема, викликає інтерес те, чи встановлювалися автором критичні межі щодо кількості ліній та глибини схем, і як саме кореляція між довжиною об'єктно-орієнтованої хромосоми та складністю топології впливає на ймовірність потрапляння алгоритму в локальні екстремуми. Було б доцільно почути пояснення щодо динаміки зміни

обчислювальних витрат при переході до синтезу пристроїв надвеликої розмірності.

5. При описі запропонованої інформаційної технології здобувач акцентує увагу на синтезі логічних структур "з нуля". Проте в межах сучасної інженерії програмного забезпечення та теорії еволюційних обчислень актуальним є питання подолання проблеми "холодного старту" генетичного алгоритму. У цьому контексті виникає дискусійне питання: чи розглядалася автором можливість формування початкової популяції не випадковим чином, а шляхом використання бібліотеки попередньо оптимізованих "стандартних блоків" (sub-circuits)? Було б доцільно почути аргументацію автора, як інтеграція таких готових модулів (замість маніпуляції виключно окремими вентилями) вплинула б на швидкість збіжності алгоритму та чи не призвело б це до обмеження генетичного різноманіття при пошуку принципово нових відмовостійких топологій.

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. Дослідження містить нові, науково обґрунтовані результати, які в сукупності вирішують важливу науково-прикладну задачу — підвищення ефективності та надійності автоматизованого проєктування зворотних логічних структур методами еволюційного пошуку.

Дисертація характеризується внутрішньою єдністю, логічною послідовністю викладу та належним рівнем апробації. Наукові положення, висновки та практичні рекомендації, сформульовані здобувачем, є достовірними та достатньою мірою відображені в опублікованих працях, зокрема у виданнях, що індексуються міжнародними наукометричними базами Scopus. Під час аналізу роботи не виявлено порушень принципів академічної доброчесності.

За своєю актуальністю, науково-теоретичним рівнем, обґрунтованістю результатів та практичним значенням, дисертаційне дослідження повністю відповідає вимогам пунктів 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, вважаю, що автор роботи Кирилюк Тарас Петрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії у галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, професор,
професор кафедри систем штучного інтелекту
Національного університету «Львівська політехніка»

Ярослав ВИКЛЮК

Підпис
Вчений секретар



[Handwritten signature]
[Handwritten signature]