

РЕЦЕНЗІЯ

**доктора фізико-математичних наук, професора,
завідувача кафедри комп'ютерних наук
навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук
Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича
УШЕНКА Юрія Олександровича
на дисертаційну роботу 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

Дисертаційна робота Кирилюка Тараса Петровича присвячена розв'язанню задачі підвищення ефективності автоматизованого проєктування зворотних та квантових логічних пристроїв, що є критично важливим для створення сучасних обчислювальних систем. Як правило, використання класичних аналітичних чи діаграмних методів синтезу призводить до експоненційного зростання складності зі збільшенням простору рішень, що обмежує їх практичне застосування. Для проведення досліджень, а саме — оптимального структурного синтезу відмовостійких логічних пристроїв на базі узагальнених вентилів Фредкіна, дисертантом розроблена інформаційна технологія, яка містить математичне забезпечення реконфігурованих компонентів та спеціалізований програмний комплекс. Основні результати роботи отримано за допомогою застосування методів штучного інтелекту, зокрема еволюційних обчислень, теорії графів та об'єктно-орієнтованого проєктування. Автором запропоновано модифікацію генетичного методу з використанням об'єктно-орієнтованої моделі хромосоми, розроблено та обґрунтовано комплексний оператор багатокomпонентної мутації, який інтегрує три типи структурних змін: додавання, видалення та модифікацію параметрів і забезпечує баланс між дослідженням простору рішень та експлуатацією знайдених оптимумів, і

розроблено метод синтезу, що базується на інтеграції метрик надійності безпосередньо у фітнес-функцію алгоритму. Таким чином, кваліфікаційне дослідження Кирилюка Т. П., безперечно, є актуальним.

Зв'язок роботи з державними програмами, планами, темами

Дисертаційне дослідження Кирилюка Т. П. виконано на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича. Дослідження відповідає тематиці науково-дослідної роботи: «Дослідження, моделювання та розробка програмного забезпечення складних динамічних систем» (Державний реєстраційний номер 0121U109232). Тему дисертації затверджено рішенням Науково-технічної ради Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

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

Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені у дисертаційній роботі Кирилюка Т. П., характеризуються високим ступенем обґрунтованості, логічною послідовністю та достовірністю. Автор базує своє дослідження на поєднанні фундаментальних методів булевої алгебри, теорії множин, теорії графів та еволюційних обчислень.

Обґрунтованість положень роботи підтверджується:

- 1. Використанням сучасного математичного апарату:** застосування об'єктно-орієнтованого моделювання хромосом та адаптивних операторів мутації дозволило ефективно розв'язати задачу структурного синтезу складних зворотних схем, що підтверджено коректністю побудованих математичних моделей.
- 2. Верифікацією та експериментальною перевіркою:** достовірність отриманих результатів доведена шляхом трансляції синтезованих структур у формат OpenQASM та їх тестування у середовищі IBM Qiskit. Практична придатність методології підтверджена апаратною

імплементациєю синтезованого шифратора на базі FPGA Altera Cyclone IV, що продемонстрував стабільну роботу на частоті 310 МГц.

- 3. Апробацією та публікаціями:** дисертаційне дослідження є самостійною науковою працею. За темою дисертації опубліковано 5 робіт, з яких 4 статті — у рецензованих виданнях, проіндексованих у наукометричній базі Scopus. Основні результати пройшли широку апробацію на міжнародних конференціях у Польщі (ICCSEEA2023), Китаї (AIMEE2024) та Україні (ITSM-2023).

Усі наукові результати, висновки та запропонована САД-система отримані автором особисто. Загалом, сформульовані положення є переконливими, методологічно вивіреними та мають вагоме практичне значення для розвитку галузі автоматизації проєктування обчислювачів на базі зворотних вентилів.

Структура дисертації

Дисертаційна робота Кирилюка Т. П. складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків до кожного розділу, загальних висновків, переліку використаних джерел (115 найменувань), шести додатків та списку публікацій автора дисертаційного дослідження за темою дисертації. Робота викладена на 245 сторінках, містить 11 таблиць та 38 рисунків.

У вступі обґрунтовано актуальність теми, визначено об'єкт, предмет та мету дослідження, сформульовано задачі, наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, наведено дані про апробацію та публікації.

У *першому* розділі проведено ґрунтовний аналітичний огляд існуючих аналітичних, діаграмних та евристичних методів синтезу логічних схем. Виявлено їхні основні недоліки, зокрема експоненційне зростання складності при збільшенні простору рішень, що обґрунтовує необхідність застосування методів штучного інтелекту.

У *другому* розділі приділено увагу вдосконаленню еволюційних методів синтезу на базі узагальнених вентилів Фредкіна. Автор розробляє підходи до

забезпечення фізичної та логічної зворотності схем, що є фундаментом для створення енергоефективних обчислювальних структур.

У *третьому* розділі описано розроблену еволюційно-орієнтовану методологію та математичні моделі реконфігурованих компонентів. Запропоновано модифікований генетичний алгоритм із об'єктно-орієнтованою моделлю хромосоми та комплексними операторами мутації, що дозволяє оптимізувати топологію схем великої розмірності.

У *четвертому* розділі висвітлено питання практичної реалізації розробленої САД-системи. Проведено верифікацію синтезованих структур шляхом їх трансляції у формат OpenQASM для тестування у середовищі IBM Qiskit. Наведено результати експериментальних досліджень апаратної імплементації зворотного шифратора на базі FPGA Altera Cyclone IV, що підтверджують ефективність запропонованих методів.

Висновки містять підсумкові результати дослідження, що підтверджують виконання поставлених завдань.

Додатки включають акти про впровадження результатів роботи, лістинги програмного коду САД-системи та схеми синтезованих пристроїв.

Наукова новизна

Дисертаційна робота Кирилюка Т. П. містить вагомі наукові результати, що мають суттєву новизну в галузі автоматизації проєктування квантових та зворотних обчислювальних систем. Основні аспекти наукової новизни роботи полягають у наступному:

1. Вперше запропоновано модифікацію генетичного методу для структурного синтезу зворотних логічних схем, яка базується на використанні об'єктно-орієнтованої моделі представлення хромосоми. Це дозволило оперувати складними логічними елементами як об'єктами з набором динамічних властивостей, що значно підвищило ефективність пошуку оптимальних топологій у великих просторах рішень.

2. Вперше розроблено метод синтезу відмовостійких зворотних логічних схем, особливістю якого є інтеграція метрик надійності безпосередньо у фітнес-функцію еволюційного алгоритму. Такий підхід забезпечує автоматичну генерацію пристроїв, що є внутрішньо стійкими до поодиноких несправностей.
3. Вперше запропоновано адаптивний мультикомпонентний оператор мутації, спеціально розроблений для еволюційного пошуку у структурах із логічною зворотністю. Використання декількох стратегій локальних змін дозволяє алгоритму уникати потрапляння у локальні екстремуми та забезпечує стабільну збіжність при синтезі схем великої розмірності.
4. Удосконалено математичні моделі реконфігурованих логічних компонентів на базі вентилів Фредкіна, що характеризуються мінімальною квантовою вартістю. Це дозволило розширити можливості проєктування енергоефективних обчислювальних структур із можливістю динамічної зміни функціонального призначення.
5. Дістала подальший розвиток інформаційна технологія автоматизованого проєктування (CAD-система) через впровадження модулів крос-платформної верифікації. Завдяки розробці засобів трансляції синтезованих схем у формат OpenQASM, стало можливим проведення їх валідації у хмарному середовищі IBM Qiskit, що підтверджує практичну реалізованість запропонованих моделей.

Наукова новизна результатів дисертації підтверджується їх апробацією на міжнародних конференціях (Польща, Китай, Україна) та публікаціями у провідних рецензованих виданнях, що індексуються у базі Scopus.

Практичне значення одержаних результатів

Дисертаційна робота Кирилюка Т. П. має суттєве практичне значення, яке полягає у створенні інструментарію для автоматизації складних етапів проєктування перспективної обчислювальної техніки. Основні аспекти практичної цінності роботи:

1. Розробка спеціалізованої CAD-системи: створено програмний комплекс для автоматизованого структурного синтезу зворотних та квантових схем, що дозволяє значно скоротити час розробки топології логічних пристроїв та мінімізувати кількість необхідних квантових вентилів, базуючись на квантовій вартості, що є критичним для фізичної реалізації квантових процесорів.
2. Забезпечення крос-платформної верифікації: розроблений дисертантом модуль трансляції у формат OpenQASM дозволяє інтегрувати результати синтезу із сучасними квантовими хмарними платформами, зокрема IBM Qiskit. Це забезпечує можливість перевірки теоретичних моделей на реальних квантових пристроях або високопродуктивних симуляторах.
3. Апаратна реалізація та висока продуктивність: практична придатність запропонованих методів підтверджена розробкою та тестуванням відмовостійкого шифратора на базі FPGA Altera Cyclone IV. Отримані результати продемонстрували стабільну роботу пристрою на частоті 310 МГц, що доводить ефективність розробленої архітектури для реальних високошвидкісних систем зв'язку.
4. Впровадження в освітній процес: результати дисертаційного дослідження впроваджені та використовуються у навчальному процесі кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича при викладанні дисциплін «Машинне навчання на .NET» та кафедри комп'ютерних систем та мереж в межах дисципліни «Квантовий комп'ютинг».
5. Методична цінність: розроблені математичні моделі та алгоритми можуть бути використані науково-дослідними установами та ІТ-компаніями, зокрема additiv, SharpMinds та Yukon Software в межах науково-дослідної діяльності.

Практична значущість роботи підтверджується актами впровадження результатів у навчальний процес та відповідними публікаціями у виданнях, що спеціалізуються на прикладних аспектах комп'ютерної інженерії.

Дискусійні положення та зауваження до змісту дисертаційного дослідження

Оцінюючи дисертаційну роботу Кирилюка Т. П. як глибоке та завершене наукове дослідження, необхідно водночас висловити певні зауваження та побажання дискусійного характеру:

1. Побажання щодо функціоналу CAD-системи: У роботі описано модуль трансляції синтезованих схем у формат OpenQASM для верифікації в IBM Qiskit. Проте, з точки зору практичної зручності використання розробленої інформаційної технології, доцільним було б реалізувати пряму інтеграцію із хмарним сервісом IBM Quantum через API-ключ. Це дозволило б здійснювати автоматичне вивантаження та запуск схем на реальному обладнанні безпосередньо з інтерфейсу системи.
2. У роботі приділено недостатньо уваги порівнянню технічних характеристик створеного програмного комплексу з добре відомими аналогами інших авторів, зокрема програма RIMER2 (C.Moraga and F.Hadjam).
3. Технічні неточності в оформленні структури: При аналізі розділу «Перелік використаних джерел» та опису структури роботи у вступі виявлено технічну розбіжність: фактичний обсяг сторінок, відведених під список літератури, на дві сторінки перевищує показник, зазначений автором у формальному описі дисертації.
4. Загальні редакційні зауваження: У тексті дисертації зустрічаються поодинокі стилістичні та граматичні помилки, які, втім, не впливають на змістовну цілісність роботи та сприйняття наукових результатів.

Зазначені зауваження та дискусійні питання не применшують високої наукової та практичної цінності дисертаційного дослідження Кирилюка Тараса

Петровича, не впливають на обґрунтованість сформульованих наукових положень і не заперечують загальну позитивну оцінку роботи.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Кирилюка Тараса Петровича на тему «Синтез відмовостійких зворотних логічних пристроїв методами штучного інтелекту» є завершеним самостійним науковим дослідженням, що розв'язує важливу науково-прикладну задачу автоматизації проєктування енергоефективних та надійних обчислювальних систем. Автор продемонстрував глибоке володіння сучасним математичним апаратом та методологією наукових досліджень, запропонувавши оригінальні підходи до еволюційного синтезу зворотних схем із вбудованим контролем відмовостійкості.

Основні положення та висновки дисертації мають високу наукову новизну, теоретичне та практичне значення. Під час аналізу тексту дисертації порушень академічної доброчесності не виявлено. Результати роботи пройшли належну апробацію на міжнародному рівні та впроваджені в освітній процес.

Дисертаційна робота Кирилюка Т. П. за своєю актуальністю, науково-теоретичним рівнем, обґрунтованістю результатів та обсягом проведених досліджень 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.).

Враховуючи значущість отриманих результатів, вважаю, що Кирилюк Тарас Петрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» у галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Враховуючи значущість отриманих результатів, вважаю, що Кирилук Тарас Петрович заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 121 «Інженерія програмного забезпечення» у галузі знань 12 «Інформаційні технології».

Рецензент –

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

Юрій УШЕНКО

Підпис *Ушенка Ю.* засвідчую
Учений секретар Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
Шуровська І. С.
14 травня 2016

