

ВИСНОВОК

**про наукову новизну, теоретичне та практичне значення результатів
дисертації Кирилюка Тараса Петровича на тему:
“Синтез відмовостійких зворотних логічних пристроїв
методами штучного інтелекту”,
поданої на здобуття ступеня доктора філософії
за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення
з галузі знань 12 – Інформаційні технології**

1. Обґрунтування вибору теми дослідження та її зв'язок із планами наукових робіт Університету.

Характерною рисою сучасного етапу розвитку інформаційних технологій є широке застосування методів штучного інтелекту, а особливо еволюційних обчислень, для розв'язання надскладних задач в різних галузях науки і техніки. Разом з тим, нагальна потреба практичного створення квантових комп'ютерів, які є фізично і логічно зворотними системами, вимагає нових підходів до моделювання їх основних елементів. Теоретичною та практичною основою таких досліджень стають інтелектуальні методи синтезу та аналізу, що дозволяють оперувати поняттями зворотності та енергоефективності.

Не дивлячись на існуючі аналітичні та діаграмні методи (бінарні діаграми прийняття рішень, таблиці істинності), основним недоліком сучасних моделей залишається експоненційне зростання складності зі збільшенням простору рішень. Крім того, залишаються недостатньо дослідженими питання забезпечення надійності обчислень, зокрема автоматизованого синтезу схем, стійких до відмов.

Вибір теми дослідження зумовлений гострою потребою у створенні ефективних інструментів автоматизованого проектування для зворотних відмовостійких систем. Сьогодні провідні вчені активно досліджують методи еволюційного синтезу та оптимізації зворотних схем (T. N. Sasamal, H. M. Gaur,

А. К. Singh A. Mohan та ін.), а також питання відмовостійкості та контролю парності у квантових пристроях (А. Patel, I. Markov). Важливими науковими завданнями залишаються подолання проблеми «локальних мінімумів» у генетичних алгоритмах синтезу та розробка уніфікованих метрик оцінки апаратної складності зворотних пристроїв.

Зважаючи на наведене вище, розробка та вдосконалення методів оптимального синтезу зворотних відмовостійких логічних пристроїв на підставі використання еволюційних методів є актуальною задачею.

Мета і завдання дисертаційного дослідження. Метою дослідження є розробка уніфікованої еволюційно-орієнтованої методології для ефективного синтезу та оптимізації зворотних відмовостійких логічних пристроїв шляхом створення математичних моделей реконфігурованих компонентів, вдосконалення генетичних методів структурного пошуку та побудови апаратно-програмного комплексу для верифікації та моделювання схем з мінімізацією квантової вартості та апаратної складності.

Об'єкт дослідження. Відмовостійкі зворотні логічні пристрої обробки інформації та процеси їх синтезу з використанням методів штучного інтелекту.

Предмет дослідження. Моделі та апаратно-програмні засоби оптимального синтезу зворотних відмовостійких логічних пристроїв на основі алгоритмів еволюційних обчислень.

Методи дослідження. В основу дисертаційної роботи покладені методи штучного інтелекту та комп'ютерного моделювання, а саме: теорія множин та булева алгебра (для формалізації логічних функцій та операцій зворотних вентилів); теорія графів (для моделювання топології схем та маршрутизації сигналів); еволюційні обчислення (для структурної оптимізації схем, мінімізації квантової вартості та забезпечення відмовостійкості); об'єктно-орієнтоване проектування (для розробки архітектури програмного комплексу); методи математичного моделювання (для верифікації синтезованих пристроїв та аналізу їх характеристик).

Дисертаційне дослідження виконано відповідно до планів науково-дослідницьких робіт:

- кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича за держбюджетною тематикою: «Дослідження, моделювання та розробка програмного забезпечення складних динамічних систем» (Державний реєстраційний номер 0121U109232);

2. Формулювання наукового завдання, нове розв'язання якого отримано в дисертації.

Наукові завдання, розв'язання яких отримано у дисертації, полягають у наступному:

- провести аналітичний огляд існуючих аналітичних, діаграмних та евристичних методів синтезу, виявити їх недоліки, пов'язані з експоненційним зростанням складності;

- удосконалити еволюційні методи синтезу, націлені на використання узагальнених вентилів Фредкіна, для забезпечення оптимальності та відмовостійкості зворотних схем;

- розробити математичні моделі та алгоритми для структурного синтезу логічних пристроїв, що враховують фізичну та логічну зворотність;

- створити програмну складову комплексу для автоматизованого моделювання та генерації зворотних схем;

- розробити апаратно-програмну частину комплексу (на базі FPGA) та провести експериментальні дослідження синтезованих пристроїв обробки інформації;

- здійснити порівняльний аналіз розроблених методів з існуючими аналогами та довести їх ефективність.

3. Наукові положення, розроблені особисто дисертантом, та їх новизна.

Дисертант особисто сформулював наукову ідею дослідження, розробив

запропоновані методики, виконав їх програмну реалізацію, організував та провів експериментальні дослідження, здійснив обробку й аналіз отриманих результатів, а також сформулював висновки та основні наукові положення :

Вперше:

- запропоновано модифікацію генетичного методу структурного синтезу, яка базується на розробленій об'єктно-орієнтованій моделі представлення хромосом. На відміну від традиційних бітових рядків, гени представлені як функціональні блоки з інкапсульованими властивостями, що дозволило формалізувати правила комутації та забезпечити скорочення простору пошуку допустимих рішень;
- розроблено метод синтезу відмовостійких зворотних логічних пристроїв, що ґрунтується на інтеграції показників надійності та контролю збереження парності безпосередньо у цільову функцію еволюційного алгоритму. Це забезпечує автоматичне формування схем, стійких до одиничних збоїв, без залучення додаткових етапів пост-синтезної модифікації;
- обґрунтовано комплексний оператор структурної мутації, який поєднує топологічні зміни (додавання, видалення та модифікації вентилів) із параметричною оптимізацією керуючих ліній, що забезпечує вихід із локальних екстремумів при синтезі функцій великої розмірності.

Набуло подальшого розвитку:

- застосування узагальнених вентилів Фредкіна для побудови універсальних логічних елементів, що дозволило реалізовувати 24 нових адаптивних функцій шифрування та комутації без зміни фізичної архітектури зв'язків;
- метод багатокритеріальної оптимізації квантових схем, який, на відміну від аналогів, одночасно мінімізує параметри: логічну похибку та квантову вартість;
- математичне забезпечення автоматизованої верифікації синтезованих структур шляхом їх трансляції у формат квантових інструкцій OpenQASM, що забезпечує інтероперабельність з сучасними квантовими симуляторами такими як IBM Qiskit.

4. Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, які захищаються.

Достовірність та обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджено застосуванням фундаментального апарату теорії зворотних обчислень, матричної алгебри та еволюційного моделювання. Наукова валідність результатів забезпечена:

- методологічною цілісністю: використанням об'єктно-орієнтованого підходу до формалізації правил комутації в еволюційних моделях та застосуванням верифікованого інструментарію (C#, Python, Verilog) для програмної реалізації алгоритмів;
- репрезентативністю експериментальних досліджень: порівняльним аналізом ефективності розробленого алгоритмічного ядра та операторів мутації на базі стандартних наборів тестових функцій зворотної логіки;
- апаратно-програмною верифікацією: повною кореляцією результатів математичного моделювання з даними фізичної апробації синтезованих структур на базі FPGA-архітектур (із використанням мови опису апаратури Verilog);
- зовнішньою валідацією моделей: підтвердженням достовірності отриманих логічних схем шляхом їх успішної інспекції та симуляції у квантовому середовищі IBM Qiskit через механізм трансляції в інструкції формату OpenQASM.

Дисертаційна робота є самостійним науковим дослідженням, що має завершений характер, цілісну структуру та логічну послідовність викладу матеріалу. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків до розділів, загальних висновків, списку використаних джерел та шести додатків. Усі наукові положення, що становлять новизну дослідження, розроблені автором особисто.

Повнота висвітлення результатів підтверджується публікаціями у провідних наукових виданнях: 2 в виданні, включеного до переліку наукових фахових видань України та проіндексовані у наукометричній базі даних SCOPUS(Q3), та 2 – у періодичних наукових виданнях, проіндексованих у

наукометричних базах даних SCOPUS) у наукових журналах за темою дисертації висвітлюють проблематику та основні положення наукової роботи. Апробація основних наукових результатів відбулася у формі доповідей на 1 Міжнародній науково-практичній конференції.

5. Рівень теоретичної підготовки здобувача та рівень його обізнаності з результатами наукових досліджень інших науковців.

Здобувач має високий рівень теоретичної та практичної підготовки в галузі інформаційних технологій та інженерії програмного забезпечення, що дозволяє йому ефективно вирішувати комплексні наукові завдання на стику квантових обчислень та штучного інтелекту. Здобувач продемонстрував глибоку обізнаність із сучасними світовими досягненнями у сфері автоматизованого проектування зворотних схем та еволюційного синтезу. Ґрунтовний аналіз існуючих підходів дозволив автору виявити критичні обмеження класичних генетичних алгоритмів та запропонувати власні вдосконалені рішення для досягнення нових наукових результатів.

Особистий внесок здобувача у розв'язання наукових завдань є визначальним і полягає у наступному:

- дисертант здійснив вибір та обґрунтування методологічного базису – поєднання парадигми зворотних обчислень з об'єктно-орієнтованим еволюційним моделюванням;
- особисто розробив математичні моделі синтезу та архітектуру об'єктно-орієнтованого представлення хромосом, що дозволило значно скоротити простір пошуку допустимих рішень за рахунок інкапсуляції правил комутації в гени-блоки;
- спроектував та реалізував програмне ядро системи автоматизованого синтезу, включаючи розробку оригінального оператора багатокomпонентної мутації;
- створив та інтегрував програмний модуль трансляції синтезованих схем у формат низькорівневих квантових інструкцій OpenQASM, що

забезпечило можливість верифікації результатів на квантових симуляторах та реальних процесорах у середовищі IBM Qiskit;

- самостійно провів серію комп'ютерних експериментів на еталонних функціях, виконав статистичну обробку та аналіз отриманих даних, що підтвердили переваги розроблених методів;
- здійснював теоретичне обґрунтування та доведення основних положень щодо відмовостійкості та функціональної повноти запропонованих реконфігурованих вентилів.

6. Наукове та практичне значення роботи.

Наукове значення дисертації полягає у розвитку теорії автоматизованого проектування зворотних систем шляхом розробки об'єктно-орієнтованої моделі структурного синтезу та вдосконалення генетичного методу оператором багатокомпонентної мутації для виходу з локальних мінімумів. Теоретично обґрунтовано використання розширеного базису реконфігурованих вентилів Фредкіна, що дозволило формалізувати механізми вбудованої відмовостійкості та забезпечити ефективну оптимізацію квантових схем великої розмірності.

Практичне значення отриманих результатів підтверджується створенням програмного комплексу автоматизованого синтезу з модулем трансляції у формат OpenQASM для верифікації в IBM Qiskit. Розроблено та реалізовано на базі FPGA прототип відмовостійкого шифратора, що доводить можливість застосування запропонованих підходів при проектуванні енергоефективних систем на кристалі. Результати роботи впроваджено в навчальний процес Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича при викладанні дисциплін з архітектури комп'ютерних систем та квантових обчислень.

7. Використання результатів роботи.

Запропонований автором програмний комплекс автоматизованого синтезу логічних структур на базі вдосконаленого генетичного методу, а також методи побудови відмовостійких архітектур впроваджені в діяльність ТОВ «ЮКОН»

(Yukon Software) та використовуються для оптимізації проектування складних обчислювальних графів.

Методологія інтелектуального синтезу та результати досліджень у сфері енергоефективних обчислень впроваджені в роботу відділу досліджень та розробок (R&D) компанії ТОВ «ШАРПМАЙНДЗ ЮЕЙ» (SharpMinds) для прототипування високонадійного програмного забезпечення.

Результати оцінки потенціалу методів синтезу логічних схем для задач квантового фінансу та модулі оптимізації інвестиційних портфелів прийняті до впровадження компанією Additiv AG (Швейцарія) та враховуються при формуванні технологічної стратегії розвитку продуктів у секторі WealthTech.

Теоретичні та практичні результати дисертаційного дослідження використовуються у навчальному процесі кафедр програмного забезпечення комп'ютерних систем та комп'ютерних систем та мереж Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича при викладанні дисциплін «Квантовий комп'ютинг» та «Машинне навчання на .NET».

8. Повнота викладу матеріалів дисертації в публікаціях та особистий внесок здобувача в публікації, виконані у співавторстві.

Основні положення та висновки дисертаційної роботи викладені у 5 наукових працях, з яких 4 статті проіндексовані у наукометричній базі даних Scopus (зокрема 2 у виданнях категорії Q3 та фахових виданнях України). Матеріали дослідження також апробовані у тезах доповідей на міжнародних науково-практичних конференціях. Результати дисертації повною мірою висвітлені в зазначених публікаціях.

У працях, виконаних у співавторстві, особистий внесок здобувача є визначальним і полягає у розробці математичних моделей синтезу, архітектури об'єктно-орієнтованого представлення хромосом та програмного ядра еволюційного методу. Автор самостійно реалізував модуль трансляції у формат OpenQASM для верифікації в IBM Qiskit, провів експериментальні дослідження на еталонних бенчмарках та виконав апаратне моделювання відмовостійких

пристроїв на базі FPGA. Здобувач брав безпосередню участь у підготовці рукописів та аналітичній обробці отриманих результатів.

Результати перевірки тексту дисертації за допомогою антиплагіатної системи TURNITIN показали 3% схожості з джерелами з Інтернету, що підтверджує дотримання принципів академічної доброчесності та самостійність виконання наукової праці.

Результати дисертації повною мірою викладені в зазначених публікаціях.

**Наукові праці, в яких опубліковані
основні наукові публікації дисертації:**

***Наукові праці у виданнях, включених до переліку наукових фахових видань
України та проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science
Core Collection та/або Scopus:***

1. Kyryliuk T., Palahuta M., Deibuk V. Using artificial intelligence methods for the optimal synthesis of reversible networks. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. Vol. 2024, no. 4. P. 112–122. URL: <https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.10> (Scopus, Q3)

Внесок авторів: **Кирилюк Т.** – розроблення алгоритму, проведення експериментів, підготовка основного рукопису; **Палагута М.** – розроблення алгоритму, проведення експериментів, підготовка основного рукопису; **Дейбук В.** – рецензування та редагування рукопису.

***Наукові праці у виданнях, проіндексованих у наукометричній базі
даних Scopus:***

2. Deibuk V., Dovhaniuk O., Kyryliuk T. The Extended Fredkin Gates with Reconfiguration in NCT Basis. *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*. 2023. Vol. 181 : Advances in Computer Science for Engineering and Education VI : ICCSEEA 2023 (Warsaw, Poland, 17–19 March 2023). Warsaw, P. 95–105. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-031-36118-0_9 (Scopus)

Внесок авторів **Дейбук В.** – наукове керівництво, концептуальна перевірка, рецензування та редагування рукопису; **Довганюк О.** – написання рукопису,

проведення експериментів та аналіз результатів; **Кирилюк Т.** – проведення експериментів, перевірка результатів та доопрацювання рукопису

3. Dovhaniuk O., Kyryliuk T., Deibuk V. Reversible Fault-Tolerant Encryption Using Extended Fredkin Gate with Reconfiguration. *Advances in Transdisciplinary Engineering*. 2025. Vol. 65 : Artificial Intelligence, Medical Engineering and Education : AIMEE 2024 (Huangshi, China, 26–27 Oct. 2024). Huangshi, P. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.3233/atde250113>. (Scopus).

Внесок авторів: Довганюк О. – проведення експериментів; **Кирилюк Т.** – основне написання рукопису, верифікація експериментів, підготовка презентації; Дейбук В. – рецензування рукопису та наукове керівництво.

***Наукові праці, які засвідчують
апробацію матеріалів дисертації:***

4. Kyryliuk T., Deibuk V., Kyryliuk S. Synthesis of reversible circuits by genetic algorithm with multicomponent mutation. *Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Івано-Франківськ, 6–8 лип. 2023 р.). Івано-Франківськ, 2023. С. 150–151.

Внесок авторів: **Кирилюк Т.** – проведення експериментів, розроблення алгоритму, підготовка основного рукопису; Дейбук В. – наукове керівництво, доопрацювання рукопису; Кирилюк С. – проведення експериментів, фіксація експериментальних результатів

9. Апробація матеріалів дисертації.

Апробація матеріалів дисертації та основних наукових результатів здійснювалася шляхом доповідей та обговорень на міжнародних та всеукраїнських науково-практичних конференціях, а також на профільних наукових семінарах:

- VI International Conference on Computer Science, Engineering and Education Applications (ICCSEEA 2023) (м. Варшава, Польща, 2023 р.);
- Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційні технології та комп'ютерне моделювання» (м. Івано-Франківськ, 2023 р.);

- International Conference on Artificial Intelligence, Medical Engineering and Education (AIMEE 2024) (м. Хуанши, Китай, 2024 р.);
- Наукові семінари кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича (м. Чернівці, 2023–2025 рр.).

10. Оцінка мови і стилю дисертації.

Дисертація написана чіткою мовою, відповідає критеріям науковості, забезпечуючи логічність, послідовність і об'єктивність викладення результатів дослідження. Зазначене свідчить про відповідність вимогам, що висуваються до праць такого рівня.

11. Відповідність змісту дисертації спеціальності з відповідної галузі знань, з якої вона подається до захисту.

Зміст дисертації відповідає чинним вимогам до оформлення дисертації, встановленим освітньо-науковою програмою «Інженерія програмного забезпечення» галузі знань 12 «Інформаційні технології», спеціальності 121 – Інженерія програмного забезпечення.

12. Дотримання нормативних вимог щодо оформлення дисертації.

Нормативні вимоги щодо оформлення дисертації дотримані повністю.

13. Рекомендації дисертації до захисту.

Дисертаційна робота Кирилюка Тараса Петровича «Синтез відмовостійких зворотних логічних пристроїв методами штучного інтелекту», подана на здобуття ступеня доктора філософії (PhD) у галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення, за її актуальністю, науково-технічним рівнем, новизною постановки та розв'язання проблем, практичним значенням отриманих результатів 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 від 12 січня 2022 р. №44 (зі змінами,

внесеними згідно з Постановою Кабінету Міністрів України №507 від 03.05.2024 р.).

За результатами публічної презентації результатів дисертації та їх обговорення на засіданні кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Навчально-наукового інституту фізико-технічних та комп'ютерних наук Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича 13 березня 2026 року дисертацію Кирилюка Тараса Петровича рекомендовано до захисту в разовій спеціалізованій вченій раді для здобуття ступеня доктора філософії (PhD) з галузі знань 12 – Інформаційні технології за спеціальністю 121 – Інженерія програмного забезпечення.

Голова засідання

доктор філософії, доцент,
завідувач кафедри програмного
забезпечення комп'ютерних систем
Чернівецького національного університету
імені Юрія Федьковича

Катерина ГАЗДЮК

Підпис *Гадюк* засвідчує
Учений секретар Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
Гуровська
"16" 03 26

