

РЕЦЕНЗІЯ

на дисертаційну роботу Германа Юрія Володимировича
«Синтез вузлів цифрової обробки сигналів засобами високорівневого
проектування
на базі систем на кристалі типу SoC FPGA»
на здобуття ступеня доктора філософії
з галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації
за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка

Актуальність теми дисертаційного дослідження та зв'язок з науковими планами і програмами

Розвиток сучасних телекомунікаційних систем відбувається в напрямі переходу до розподілених, енергоефективних та часово-чутливих архітектур, у яких значна частина обробки переноситься ближче до джерела даних. Такий підхід є особливо важливим для систем радіомоніторингу, програмно-визначеного радіо, автономних сенсорних платформ, мобільних вузлів зв'язку та edge-систем, де необхідно поєднати високу швидкодію, керованість, малу латентність і здатність до швидкої адаптації під змінні умови функціонування.

У цих умовах системи на кристалі типу SoC FPGA є одними з найбільш перспективних технологічних рішень, оскільки дозволяють інтегрувати в межах єдиної платформи процесорну підсистему, програмовану логіку, високошвидкісні інтерфейси та спеціалізовані апаратні прискорювачі. Водночас ефективне використання таких платформ пов'язане з низкою складних задач: вибором раціонального розподілу функцій між програмною та апаратною частинами, забезпеченням стабільних часових характеристик тракту обробки,

побудовою відтворюваного керуючого середовища та скороченням витрат на проєктування.

На вирішення цього комплексу завдань і спрямована дисертаційна робота Ю. В. Германа. Її тема є актуальною як з наукової, так і з практичної точки зору, оскільки стосується побудови методики синтезу вузлів цифрової обробки сигналів на базі SoC FPGA із використанням засобів високорівневого проєктування, що дозволяє поєднати гнучкість програмного керування з перевагами апаратного розвантаження.

Особисто вважаю важливим і те, що в роботі розглядається не ізольований апаратний модуль, а цілісна телекомунікаційна платформа з чітко визначеною логікою масштабування та системної інтеграції.

Дисертаційна робота пов'язана з виконанням науково-дослідної роботи кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича «Методи формування сигнальних конструкцій та інформаційні процеси програмно-апаратної взаємодії широкосмугових телекомунікаційних систем та Інтернету речей» (державний реєстраційний номер 0121U112870). Дослідження, апаратні розробки та експерименти, представлені в дисертаційній роботі, також виконувалися в межах науково-технічних проєктів: проєкту Національного фонду досліджень України за конкурсом «Наука для зміцнення обороноздатності України» «Розробка комплексу для визначення положення та відносної потужності джерел радіовипромінювання та їх візуалізації» (реєстраційний номер проєкту 2023.04/0150); проєкту науково-технічної (експериментальної) розробки молодих вчених «Портативний комплекс для наземного аерозондування вибухових закладок» (державний реєстраційний номер 0123U100679); проєкту «Портативний радіоелектронний комплекс синтезу широкосмугових завад»

(державний реєстраційний номер 0125U000836). Такий зв'язок із науковими програмами і розробками підсилює аргумент про актуальність теми та свідчить про її практичну орієнтованість у контексті сучасних телекомунікаційних систем.

Структура і зміст роботи

Дисертаційна робота є структурованою, логічно побудованою та охоплює всі основні етапи наукового дослідження: від аналізу сучасного стану проблеми до отримання прикладних результатів і їх експериментальної перевірки.

Обсяг дисертації становить 186 сторінок, робота містить 52 рисунки, 17 таблиць, бібліографічний список із 140 джерел та додатки.

У **вступі** коректно сформульовано мету, завдання, об'єкт, предмет та методи дослідження, обґрунтовано актуальність теми, визначено наукову новизну та практичне значення одержаних результатів.

У **першому розділі** виконано огляд сучасних підходів до побудови вузлів цифрової обробки сигналів на базі SoC FPGA. Проаналізовано роль високорівневого синтезу, особливості взаємодії між процесорною підсистемою та програмованою логікою, а також місце вбудованих операційних систем у телекомунікаційних edge-платформах. Автор не обмежується описом технологічних засобів, а підводить аналіз до постановки конкретної науково-прикладної задачі.

У **другому розділі** розроблено архітектуру та методику побудови спеціалізованої програмно-апаратної платформи цифрової обробки сигналів. У межах цього розділу послідовно розглянуто питання побудови вбудованої Linux-системи, конфігурації ядра, структури rootfs, способів інтеграції з апаратними прискорювачами та засобів підвищення відтворюваності й керованості. Суттєвим результатом є введення концепції «Паспорта конфігурації» та

експериментальна перевірка впливу просторової ізоляції ресурсів на часові параметри системи.

У **третьому розділі** подано практичну реалізацію платформи на прикладі системи потокового спектрального моніторингу та автономного сенсорного вузла. Цей розділ є важливим, оскільки демонструє, що запропонована методика є інваріантною щодо прикладної задачі та дозволяє будувати не одну окрему систему, а цілий клас гетерогенних вузлів цифрової обробки сигналів. Окремої уваги заслуговує експериментальне встановлення межі ефективності суто програмної реалізації на рівні 20 MSPS.

У **четвертому розділі** автор переходить до апаратного розвантаження обчислювально критичних функцій і розглядає синтез та інтеграцію криптографічного прискорювача для алгоритму «Струмок». Показано, що застосування гібридного маршруту проектування, в якому критичне ядро реалізується на рівні RTL, а керуючі інтерфейси проектуються на вищому рівні абстракції, дозволяє досягти високої продуктивності, прийнятної ресурсної ефективності та гнучкості реконфігурації.

Загалом дисертація справляє враження завершеної роботи, у якій усі розділи змістовно пов'язані між собою та підпорядковані єдиній науковій ідеї.

Підкреслю також, що в роботі добре простежується мислення рівня платформи, а не окремого вузла чи окремого алгоритму. Для телекомунікаційних систем такий підхід є принципово важливим, оскільки ефективність реального рішення визначається не лише властивостями окремого прискорювача, а й якістю організації всієї архітектури обміну, керування та масштабування.

Наукова новизна

Наукова новизна роботи полягає насамперед у тому, що автором запропоновано цілісну методику синтезу вузлів цифрової обробки сигналів на

базі SoC FPGA, яка поєднує програмну керованість, апаратну продуктивність і контроль часової поведінки системи.

До найбільш вагомих результатів наукової новизни можна віднести:

1. Вперше запропоновано метод конфігурації вузлів цифрової обробки сигналів на базі гетерогенних систем на кристалі, який узгоджує конфігурацію середовища вбудованої ОС із часовими характеристиками радіотехнічного тракту та формалізує апаратні інваріанти, параметри пам'яті й політики виконання.

2. Вперше запропоновано метод просторового виявлення та пеленгації джерел радіовипромінювання з борту БПЛА на основі багатоканального антенно-фідерного тракту з односпрямованими антенами різних частотних діапазонів і двоетапною процедурою пошуку.

3. Удосконалено метод синтезу гетерогенних вузлів цифрової обробки сигналів типу HPS-Centric у системах на кристалі шляхом адаптивного використання ресурсів програмно-апаратної платформи та раціонального розмежування функцій між процесорною підсистемою і програмованою логікою.

4. Набув подальшого розвитку критерій «точки насичення» для вбудованих універсальних процесорів у трактах цифрової обробки сигналів, що формалізує межі ефективної обробки даних і умови доцільності апаратного розвантаження.

5. Вперше запропоновано архітектуру криптографічного вузла телекомунікаційних систем для реалізації алгоритму «Струмок», яка поєднує оптимізований RTL-опис обчислювального ядра з високорівневим описом інтерфейсів керування та підтримує режим швидкої зміни криптографічного контексту.

Зазначені результати є взаємно узгодженими, корелюють із поставленими завданнями дослідження та мають ознаки наукової новизни.

Практична цінність роботи

Практичне значення роботи полягає в орієнтації на реальні програмно-апаратні платформи та прикладні сценарії використання. Автором отримано результати, які можуть бути використані при створенні вузлів радіомоніторингу, вбудованих телекомунікаційних систем, автономних сенсорних вузлів і апаратно-прискорених засобів захисту каналів зв'язку.

Практична цінність результатів дисертаційного дослідження полягає в такому:

1. Розроблено та програмно реалізовано автоматизовану систему збірки вбудованої ОС за принципом Full Custom, що забезпечує відтворюване формування мінімалістичних образів керуючого середовища.
2. Створено уніфіковану програмно-апаратну платформу на базі SoC FPGA Cyclone V, придатну для інтеграції периферії, апаратних прискорювачів та модулів потокової обробки від різнорідних вимірювальних засобів, із механізмами просторової ізоляції ресурсів і прогнозованими часовими характеристиками без переходу до спеціалізованих RTOS.
3. Створено мобільний вузол радіомоніторингу для оброблення та візуалізації широкосмугових сигналів у реальному часі.
4. Створено автономний модуль корисного навантаження для БПЛА з підтримкою архітектурного патерну Store-and-Forward у мережах DTN.
5. Реалізовано апаратне розвантаження телекомунікаційних трактів шляхом інтеграції IP-ядра шифратора ДСТУ 8845:2019 у середовище SoC FPGA із підтримкою високої маневреності ключів.

Важливим є і те, що отримані результати можуть бути використані як основа для розгортання відтворюваних дослідницьких та прикладних стендів, де потрібне поєднання програмної гнучкості, контрольованої часової поведінки та апаратного прискорення окремих функцій.

Обґрунтованість наукових положень, висновків та рекомендацій

Основні положення дисертації є достатньо обґрунтованими. Вони спираються на аналіз сучасного стану проблеми, програмно-апаратну реалізацію запропонованих рішень та результати їх експериментальної перевірки. Показовим є те, що автор пов'язує питання архітектурного проектування з експериментальним дослідженням латентності, джитера, пропускнуої здатності та меж масштабування.

Висновки до окремих розділів та загальні висновки дисертації узгоджуються зі змістом роботи та логічно впливають із отриманих результатів.

Автор подає результати у формі, зручній для перевірки: наводяться як архітектурні аргументи, так і кількісні показники, пов'язані з латентністю, продуктивністю, ресурсоемністю та межами масштабування. Такий стиль викладу полегшує фахову оцінку достовірності одержаних висновків.

Зауваження

Поряд із позитивною оцінкою дисертації, вважаю доцільним висловити окремі зауваження та побажання:

1. У роботі достатньо переконливо показано доцільність застосування SoC FPGA, однак для повнішої аргументації було б корисно навести ще ширше кількісне порівняння запропонованого підходу з альтернативними платформами, зокрема мікропроцесорними та іншими програмно-керованими edge-рішеннями, за критеріями латентності, енергоспоживання та вартості інтеграції.

2. У третьому розділі продемонстровано прикладну універсальність платформи, але для задач телекомунікаційних систем і мереж було б корисно детальніше показати, як запропонована архітектура може масштабуватися в багатовузлових сценаріях обміну даними або в складі ієрархічних edge/fog-конфігурацій.
3. У дисертації аргументується перехід від HPS-centric підходу до апаратного розвантаження для задач широкопasmової обробки, однак було б корисно окремо узагальнити критерії вибору між HPS-centric, гібридною та FPGA-centric організацією вузла для різних класів телекомунікаційного навантаження.
4. Зауваження щодо оформлення графічного матеріалу: на рис. 3.12 (а, б), що демонструють інтерфейс оператора автономного вузла, скріншоти мають занадто дрібний шрифт та низький контраст, що суттєво ускладнює їх аналіз у друкованій версії дисертації.
5. У підрозділі 3.2.1 на фотографіях апаратної реалізації експериментального стенду (рис. 3.4 а, б) відсутні маркери фізичного масштабу (наприклад, лінійка або розмірна сітка). Це дещо ускладнює візуальну оцінку масогабаритних характеристик створеного антенного модуля при читанні друкованої версії роботи.

Наведені зауваження не мають принципового характеру і не знижують загальної позитивної оцінки дисертаційної роботи.

Повнота викладу в опублікованих працях наукових положень, висновків та рекомендацій.

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 9,5 наукових працях, з яких: 1 стаття у міжнародних періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus; 3,5 статті - у наукових фахових виданнях України; 4 праці

апробаційного характеру - у матеріалах і тезах доповідей наукових конференцій; 1 праця, котра додатково відображає наукові результати дисертації. Вони охоплюють питання побудови вбудованих ОС для SoC FPGA, архітектури програмно-апаратної взаємодії, edge-орієнтованих телекомунікаційних платформ, автономних систем збору та обробки даних, а також практичні аспекти використання FPGA у вузлах цифрової обробки сигналів, включно з радіомоніторингом і криптографічним апаратним розвантаженням.

Відсутність академічного плагіату, фабрикації, фальсифікації

Під час ознайомлення з дисертацією та публікаціями автора ознак академічного плагіату, фабрикації чи фальсифікації не виявлено. Використані положення інших авторів супроводжуються належними посиланнями, а особистий внесок здобувача у співавторських працях окреслено коректно.

Загальний висновок

Дисертаційна робота Германа Юрія Володимировича «Синтез вузлів цифрової обробки сигналів засобами високорівневого проектування на базі систем на кристалі типу SoC FPGA» є завершеним, самостійно виконаним науковим дослідженням, у якому розв'язано актуальне науково-прикладне завдання підвищення ефективності функціонування та скорочення часу проектування вузлів цифрової обробки сигналів для телекомунікаційних систем за рахунок застосування методики синтезу гетерогенних платформ SoC FPGA з чітким розмежуванням площин Data Plane і Control Plane.

За змістом, актуальністю, рівнем наукової новизни, практичною значущістю та обґрунтованістю висновків дисертація відповідає вимогам «Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення

разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії», затвердженого Постановою КМУ № 44 від 12.01.2022 р. (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМУ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023 р., № 507 від 03.05.2024 р.), а також «Вимогам до оформлення дисертації», затверджених Наказом Міністерства освіти і науки України № 40 від 12 січня 2017 року (зі змінами від № 759 від 31.05.2019 року). Автор роботи, Герман Юрій Володимирович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» з галузі знань 17 – «Електроніка та телекомунікації».

Рецензент,

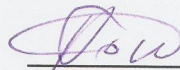
доктор технічних наук, професор,

професор кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки

Чернівецького національного університету

імені Юрія Федьковича

«12» травня 2026 року



Руслан ПОЛТАНСЬКИЙ

Підпис *Політаський Р.*
засвідчує
Учений секретар Чернівецького національного
університету імені Юрія Федьковича
Литовська Н. Савчу
"травня 2026"

