

## **ВІДГУК**

офіційного опонента, доктора технічних наук, професора,  
начальника науково-дослідного відділу вивчення та впровадження досвіду  
наукового центру Повітряних Сил Харківського національного університету

Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

ЛИСЕЧКА Володимира Петровича

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

### **Актуальність теми дисертації.**

У сучасних телекомунікаційних системах дедалі частіше виникає потреба в поєднанні високошвидкісної потокової обробки даних з гарантованою керованістю та передбачуваністю часових характеристик. Це характерно для вузлів радіомоніторингу, розподілених edge-систем, програмно-визначеного радіо, автономних мобільних платформ і мережевих вузлів, які працюють в умовах обмежених обчислювальних ресурсів та змінних режимів навантаження.

Такі вимоги є особливо актуальними і для інфокомунікаційних систем транспортного та інфраструктурного призначення, де локальні вузли збору, обробки та пересилання даних мають зберігати передбачувану поведінку навіть у разі нестабільності каналу зв'язку, асиметрії навантаження або переходу до автономного режиму функціонування.

Особливої складності набуває задача побудови таких систем на основі універсальних операційних середовищ, коли програмна гнучкість має бути поєднана з мінімальною латентністю, контрольованим джитером і достатньою пропускнуою здатністю для неперервних потоків даних. У цьому сенсі

платформи типу SoC FPGA є одними з найбільш перспективних напрямів розвитку телекомунікаційної апаратури, оскільки дають змогу реалізувати функціональний поділ між площиною даних і площиною керування, а також ефективно застосовувати апаратне розвантаження.

Ці питання становлять зміст дисертаційної роботи Ю. В. Германа. З огляду на сучасний стан розвитку edge computing, високошвидкісних телекомунікаційних вузлів, вбудованих систем керування та апаратно-програмних комплексів цифрової обробки сигналів, обрана тема є своєчасною та актуальною.

Для телекомунікаційної галузі особливо цінним є те, що автор розглядає детермінованість і пропускну здатність не окремо, а як взаємопов'язані властивості єдиної системи.

### **Оцінка змісту та завершеності дисертації.**

Дисертаційна робота побудована логічно і послідовно. Її структура є завершеною та відповідає поставленій меті дослідження.

У **вступі** здобувачем сформульовано мету й завдання, обґрунтовано актуальність теми, наведено наукову новизну, практичне значення роботи, а також визначено об'єкт, предмет і методи дослідження.

**Перший розділ** присвячений аналізу сучасних методів побудови вузлів цифрової обробки сигналів на базі SoC FPGA. У ньому розглянуто проблеми класичного HDL-проектування, можливості високорівневого синтезу, роль вбудованих ОС, механізми HPS-FPGA взаємодії та підходи до побудови сучасних embedded-платформ для edge-задач. Розділ формує теоретичний фундамент роботи.

**Другий розділ** містить результати розроблення архітектури та методики побудови спеціалізованої Linux-орієнтованої програмно-апаратної платформи. Автор докладно розглядає питання bootchain, device tree, організації ядра, rootfs, сервісного шару, інтеграції з апаратними прискорювачами та забезпечення відтворюваності конфігурації. Особливої

уваги заслуговує концепція «Паспорта конфігурації» та експериментальна перевірка часових характеристик у керуючому середовищі.

У **третьому розділі** виконано практичну реалізацію гетерогенних вузлів цифрової обробки сигналів. Здобувач демонструє використання платформи в системі потокового спектрального моніторингу та в автономному сенсорному вузлі просторового моніторингу. Результати цього розділу підтверджують, що запропонований підхід дозволяє створювати стійкі до деградації каналу системи з адаптивним розподілом функцій між програмним та апаратним рівнями.

**Четвертий розділ** присвячено синтезу й інтеграції високопродуктивного апаратного прискорювача для реалізації алгоритму «Струмок». У ньому переконливо показано, що перехід до апаратного розвантаження критичних обчислювальних операцій дозволяє суттєво збільшити пропускну здатність системи, забезпечити стабільність контуру керування та сформувані передумови для масштабування архітектури.

Загалом дисертаційна робота є завершеною, цілісною і добре узгодженою за змістом.

Справляє позитивне враження і те, що в роботі є чіткий перехід від постановки проблеми до її експериментально підтвердженого архітектурного розв'язання.

Для телекомунікаційної тематики цінним є також те, що автор не зводить задачу лише до локальної оптимізації окремого вузла. У роботі простежується розуміння системних компромісів між продуктивністю, керованістю, латентністю, стійкістю до перевантаження та можливістю подальшого масштабування.

З позицій експлуатації сучасних мережевих і транспортно-комунікаційних систем важливим є і те, що автор фактично розглядає вузол не ізольовано, а як елемент ширшого контуру обміну та керування, у якому затримка, стійкість і відтворюваність режимів безпосередньо впливають на загальну функціональну надійність системи.

Ще однією сильною стороною роботи є послідовність переходу від побудови керуючого середовища до практичної перевірки прикладних сценаріїв, а далі до архітектурного висновку про необхідність апаратного розвантаження. Така логіка викладу є переконливою і добре відповідає поставленій меті дослідження.

### **Достовірність та новизна наукових положень.**

Наукові положення дисертації є достатньо обґрунтованими. Вони базуються на поєднанні аналізу наукових джерел, архітектурного проєктування, побудови працездатних програмно-апаратних рішень та експериментальної валідації. Показово, що автор не обмежується якісним описом запропонованих підходів, а наводить кількісні показники, які характеризують латентність, стабільність, пропускну здатність та межі ефективності платформи.

Висновки по розділах та загальні висновки є логічними, послідовними та відповідають змісту роботи. Зв'язок між сформульованими завданнями, одержаними результатами та винесеними на захист положеннями простежується достатньо чітко.

### **Результати наукової новизни дисертації є такими:**

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 антено-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 характеризуються новизною, мають системний характер і становлять інтерес як для телекомунікаційної науки, так і для інженерної практики.

Наведені положення формують узгоджений ланцюг: від стабілізації керуючого середовища до визначення меж ефективності процесорної підсистеми та обґрунтування переходу до апаратного розвантаження. Така внутрішня зв'язаність результатів підсилює враження про зрілість і завершеність дисертаційного дослідження.

**Важливість отриманих результатів для науки і практики, можливі шляхи використання результатів дослідження.**

Практична цінність дисертації полягає у тому, що запропоновані рішення доведені до рівня реальних платформ і прикладних вузлів, а отже можуть бути використані у створенні сучасних телекомунікаційних систем.

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.

Результати роботи можуть бути використані в edge-вузлах телекомунікаційних мереж, програмно визначеному радіо, мобільних радіотехнічних системах, автономних безпілотних і сенсорних платформах.

Іншими словами, робота має не лише локальне прикладне значення, а й добрий потенціал для ширшого використання в сучасних розподілених інфокомунікаційних системах.

Окремий інтерес результати дисертації можуть становити для вузлів транспортного зв'язку, диспетчерських та моніторингових підсистем, де поєднання часової передбачуваності локальної обробки, стійкості до деградації каналу та можливості автономного накопичення даних є практично значущим.

Наукове значення отриманих результатів полягає також у тому, що вони уточнюють межі застосовності універсальних вбудованих процесорів у телекомунікаційних трактах безперервної обробки даних. Для проєктувальників реальних систем це має безпосередньо інженерне значення,

оскільки дозволяє більш обґрунтовано визначати момент переходу від програмної реалізації до апаратно-прискореної.

З практичного погляду робота може бути корисною для побудови крайових обчислювальних вузлів, спеціалізованих платформ SDR, вузлів радіоконтролю, бортових телеметричних модулів і захищених елементів транспортних та інфраструктурних мереж, де поєднання стабільності, гнучкості й продуктивності має вирішальне значення.

### **Методи досліджень, які використані в дисертаційній роботі.**

Для досягнення поставленої мети автором використано комплекс методів, що включає системний аналіз сучасних архітектур SoC FPGA та вбудованих операційних систем, структурно-функціональне проектування гетерогенних вузлів цифрової обробки сигналів, експериментальні дослідження латентності, джитера та пропускну здатності в каналах HPS--FPGA взаємодії, а також синтез і функціональну верифікацію апаратного ядра на рівні RTL. Для підтвердження отриманих результатів застосовано натурні випробування на платформах SoC FPGA Cyclone V, вимірювання часових характеристик керуючого середовища, аналіз поведінки системи під навантаженням, а також оцінювання меж ефективності програмної та апаратної реалізації.

Такий вибір методів видається коректним і достатнім для розв'язання поставлених завдань. Поєднання системотехнічного аналізу, натурального експерименту та апаратно-програмної верифікації дозволило авторові уникнути суто декларативних висновків і надати роботі належного рівня доказовості.

### **Зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалася відповідно до напряму наукових досліджень кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки Чернівецького

національного університету імені Юрія Федьковича в межах фундаментальної науково-дослідної роботи «Методи формування сигнальних конструкцій та інформаційні процеси програмно-апаратної взаємодії широкосмугових телекомунікаційних систем та Інтернету речей» (державний реєстраційний номер 0121U112870).

Також результати, представлені в дисертації, пов'язані з виконанням таких науково-технічних проєктів: - «Розробка комплексу для визначення положення та відносної потужності джерел радіовипромінювання та їх візуалізації» (реєстраційний номер проєкту 2023.04/0150); - «Портативний комплекс для наземного аерозондування вибухових закладок» (державний реєстраційний номер 0123U100679); - «Портативний радіоелектронний комплекс синтезу широкосмугових завад» (державний реєстраційний номер 0125U000836).

Наявність такого зв'язку з виконуваними науковими проєктами є важливою ознакою прикладної затребуваності дисертаційної роботи. Вона свідчить про те, що запропоновані в дисертації рішення виникли не у відриві від практики, а в контексті реальних потреб сучасних телекомунікаційних і радіотехнічних розробок.

З огляду на характер цих проєктів можна зробити висновок, що запропоновані підходи потенційно придатні для систем, у яких важливими є живучість, розподіленість функцій та стійкість до порушень зовнішнього середовища, тобто для класу рішень, близьких до інфраструктурних і транспортних телекомунікаційних застосувань.

### **Публікація та апробація результатів дисертаційної роботи.**

Основні результати дисертаційної роботи опубліковано в 10 наукових працях, з яких: 1 стаття у міжнародних періодичних наукових виданнях, проіндексованих у наукометричних базах даних Web of Science Core Collection та/або Scopus; 4 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.

Основні результати, отримані в дисертаційній роботі, були предметом обговорень на:

- наукових семінарах кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки ЧНУ імені Юрія Федьковича; (очна участь)
- Seventeenth International Conference on Correlation Optics (SPIE) — м. Чернівці, Україна, 8–12 вересня 2025; (онлайн участь)
- Xth International Scientific-Practical Conference «Physical and technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems» — м. Чернівці, Україна, 15–17 травня 2025; (онлайн участь)
- XIV Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми інформатики та комп'ютерної техніки» (ПКТ–2025) — м. Чернівці, Україна, 13–15 листопада, 2025; (онлайн участь)
- XII Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій» — м. Запоріжжя, Україна, 10–12 грудня 2024; (онлайн участь)
- XXIX Міжнародному молодіжному форумі «Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті» — м. Харків, Україна, 16–19 квітня 2025; (онлайн участь)
- Seventh International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2024) — м. Запоріжжя, Україна, 3 травня 2024. (онлайн участь)

#### **Відповідність дисертації встановленим вимогам.**

Дисертаційна робота відповідає встановленим нормативним вимогам до робіт на здобуття ступеня доктора філософії. Вона включає вступ, чотири основні розділи, загальні висновки, список використаних джерел та додатки.

Загальний обсяг роботи становить 186 сторінок, містить 52 рисунки, 17 таблиць та бібліографічний список із 140 джерел.

За структурою, змістом і оформленням робота відповідає Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради, затвердженому постановою Кабінету Міністрів України від 12.01.2022 № 44 у чинній редакції, а також Вимогам до оформлення дисертації, затвердженим наказом Міністерства освіти і науки України від 12.01.2017 № 40 у чинній редакції.

Структурні елементи дисертації подано послідовно, а зміст розділів відповідає заявленій логіці дослідження. Робота має завершений характер, містить чітко сформульовані висновки та достатній ілюстративний і табличний матеріал для сприйняття отриманих результатів.

Термінологія в роботі використовується послідовно, а авторський виклад у цілому є зрозумілим для фахового читача. Дисертація поєднує теоретичні положення, опис архітектурних рішень і результати експериментальної перевірки, що відповідає вимогам до робіт такого науково-прикладного профілю.

З формального погляду важливо і те, що у роботі чітко простежуються взаємозв'язки між метою дослідження, поставленими завданнями, винесеними на захист положеннями та підсумковими висновками. Така внутрішня узгодженість дозволяє оцінити дисертацію як цілісне завершене дослідження.

### **Зауваження до дисертаційної роботи.**

Попри загальну позитивну оцінку, дисертаційна робота викликає окремі зауваження та запитання:

1. У другому та третьому розділах достатньо добре висвітлено внутрішню архітектуру вузла, однак для задач телекомунікаційних систем було б корисно детальніше показати місце запропонованої платформи в ширших edge/fog-сценаріях, зокрема у багатовузлових конфігураціях з ієрархічним розподілом функцій.

2. У роботі обґрунтовано стабільність і керованість локального вузла, однак окремі характеристики якості обслуговування на рівні міжвузлової взаємодії, наприклад, вплив зовнішньої мережевої нестабільності на загальну поведінку системи, могли б бути висвітлені більш детально.

3. У роботі переконливо показано автономність вузла та механізми локального накопичення даних, однак для інфраструктурних телекомунікаційних сценаріїв було б корисно детальніше формалізувати політики міжвузлової буферизації, пріоритизації повідомлень і відновлення обміну після втрати зв'язку.

4. З огляду на можливе використання запропонованих рішень у розподілених edge/fog-системах, варто було б ширше окреслити вимоги до синхронізації часу та узгодження даних між кількома вузлами в умовах нестабільної мережевої інфраструктури.

5. У розділі "Перелік умовних позначень" наведено розшифрування базових термінів, однак відсутні аббревіатури, які активно використовуються здобувачем у тексті дисертації при описі телекомунікаційних сценаріїв та мережевої взаємодії. Зокрема, не розшифровано такі ключові скорочення як QoS (Quality of Service), URLLC (Ultra-Reliable Low-Latency Communication), що дещо ускладнює читання відповідних підрозділів.

Зазначені зауваження не є принциповими та не впливають на загальну позитивну оцінку дисертації.

### **Загальний висновок**

1. Дисертаційна робота Германа Юрія Володимировича на тему «Синтез вузлів цифрової обробки сигналів засобами високорівневого проектування на базі систем на кристалі типу SoC FPGA» є завершеним науковим дослідженням, яке містить нові науково обґрунтовані результати. У сукупності вони розв'язують важливе науково-прикладне завдання побудови ефективних і детермінованих гетерогенних вузлів цифрової обробки сигналів для телекомунікаційних застосувань.

2. Дисертаційна робота 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), а її автор, Герман Юрій Володимирович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка» з галузі знань 17 – Електроніка та телекомунікації.

Офіційний опонент,  
доктор технічних наук, професор,  
начальник науково-дослідного відділу  
вивчення та впровадження досвіду  
наукового центру Повітряних Сил  
Харківського національного університету  
Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

«12» травня 2026 року

Володимир ЛИСЕЧКО

ЗАСВІДЧУЮ

Тимчасово виконуючий обов'язки заступника начальника університету з наукової роботи Харківського національного університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник

Олександр КУРЕНКО

«12» травня 2026 року

М.П.

