

## ВІДГУК

офіційного опонента

професора кафедри комп'ютерної інженерії та програмування Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»,  
доктора технічних наук, професора Кучука Георгія Анатолійовича  
на дисертаційну роботу Яреценка Владислава Валерійовича  
на тему “Методи побудови кодів одиначної відстані для енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем”,  
подану на здобуття наукового ступеня доктора філософії,  
галузь знань 17 «Електроніка та телекомунікації»,  
спеціальність 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

**Ступінь актуальності теми дисертаційної роботи.** Актуальність теми дисертаційної роботи Яреценка В. В. “Методи побудови кодів одиначної відстані для енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем” обумовлена стрімким зростанням обсягів інформації, підвищенням вимог до швидкодії, відмовостійкості та масштабованості мереж, а також впровадженням концепцій Fog/Edge Computing та Інтернету речей (IoT), які вимагають мінімізації затримок, балансування навантаження та ефективного використання обчислювальних ресурсів. Зокрема, таке питання є вкрай суттєвим для систем високощільного IoT, що використовує мобільні пристрої на граничному та туманному шарах власної екосистеми.

Отже, за таких умов особливої ваги набувають питання підвищення швидкодії, енергоефективності та надійності функціонування відповідного обладнання. Водночас процеси передачі та обробки інформації супроводжуються впливом різноманітних завад, що призводить до виникнення помилок і зниження достовірності переданих даних. Одним із ефективних підходів до підвищення надійності є використання кодів виявлення та виправлення помилок, зокрема кодів Грея. У сучасних багатоядерних мікропроцесорних системах та системах на кристалі (SoC) для організації обміну даними широко застосовуються мережі на кристалі (NoC). Відомо, що значна частка енергоспоживання таких мереж зумовлена комутаційною активністю бітів на лініях зв'язку. При цьому використання класичного коду Грея, який забезпечує однібітову зміну між послідовними кодовими словами, не усуває проблему концентрації перемикачів в окремих розрядах, що може призводити до локального зростання енергоспоживання та теплових навантажень.

Актуальність зазначеної проблематики посилюється розвитком перспективних технологій енергонезалежної пам'яті з довільним доступом (NVRAM), для яких характерні обмежений ресурс перезапису та підвищене енергоспоживання операцій запису. Часте оновлення службових даних, зокрема лічильників операцій запису, призводить до локалізації змін у невеликій групі

бітів, що зумовлює нерівномірний розподіл енергетичних і теплових навантажень та може негативно впливати на надійність пристроїв.

У зв'язку з цим перспективним напрямом є застосування збалансованих кодів одиначної відстані, які зберігають властивість однобітових переходів між послідовними кодовими словами та забезпечують більш рівномірний розподіл перемикачів між розрядами кодових слів. Використання таких кодів дозволяє зменшити пікову комутаційну активність і підвищити енергоефективність телекомунікаційних систем.

З огляду на викладене, наукова задача, пов'язана з розробленням і вдосконаленням моделей та методів побудови і класифікації кодів одиначної відстані з покращеними характеристиками збалансованості, є актуальною та має важливе значення для підвищення ефективності та надійності обробки інформації в енергоефективному телекомунікаційному обладнанні, а тема дисертаційного дослідження «Методи побудови кодів одиначної відстані для енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем» є **актуальною**.

**Ступінь обґрунтованості та достовірності наукових положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі.** Ґрунтовно проаналізувавши дисертаційну роботу можна відмітити, що наукові положення, висновки та рекомендації, що висвітлені в роботі, є достатніми, повними, а також належними чином повністю обґрунтованими. Для їх отримання та підтвердження автором було проведено як теоретичні, так і емпіричні, експериментальні дослідження, при цьому використовувалися вітчизняні та міжнародні вузькопрофільні та актуальні джерела. Достовірність положень і висновків зроблених автором підтверджується використанням класичних і сучасних методів досліджень, зокрема глибокого логічного аналізу літературних джерел, коректністю поставлених актуальних завдань, що потребують розв'язання та вирішення, методів теорії інформації і кодування. Результати експериментальних та теоретичних досліджень доповідались та обговорювались на міжнародних науково-технічних конференціях, а також опубліковані в наукових фахових виданнях. Крім того, про достовірність отриманих результатів свідчить їх взаємоузгодженість, відповідність літературним даним і позитивні результати впровадження. У результаті проведення дисертаційного дослідження дисертанту вдалось розкрити та вирішити в повному обсязі мету та завдання, що були сформовані на початку. До кожного пункту роботи приведені логічні висновки, які дозволяють коротко та повно зрозуміти суть кожного етапу дослідження та практичну значущість отриманих результатів. Наприкінці дисертаційної роботи також наводяться загальні висновки, що в повній мірі відображають та логічно поєднують отримані результати та дають можливість їх використання на практиці.

Вищевикладене свідчить про обґрунтованість та достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій, що викладено у дисертаційній роботі Яреценка Владислава Валерійовича.

**Наукова новизна положень, висновків та рекомендацій, сформульованих у дисертації. Наукова та практична цінність.** Наукова новизна отриманих результатів обумовлена теоретичним узагальненням і новим рішенням важливого наукового завдання, сутність якого полягає в розробці нових та удосконалення існуючих методів, пов'язаних із побудовою та класифікацією кодів одичної відстані, які мають покращені показники збалансованості та дозволяють мінімізувати пікову комутаційну активність, запобігати локальним перевантаженням та підвищувати загальну ефективність обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем. У дисертаційній роботі Ярещенко Владислав Валерійович отримав такі основні науково обґрунтовані результати:

1. Вперше розроблено метод ієрархічної класифікації кодів одичної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності відносно заданої для кожного ієрархічного рівня групи перетворень та визначаються типові представники для кожного класу еквівалентності. Застосування методу ієрархічної класифікації дозволяє спростити аналіз множин кодів, досліджуючи властивості типових представників окремих класів еквівалентності;

2. Вперше розроблено метод конструктивного перерахування кодів одичної відстані, заснований на визначенні інваріантів та генерації системи різних типових представників, що дозволяє формувати коди одичної відстані з заданими властивостями збалансованості без повного перебору варіантів, спрощуючи задачу вибору оптимального кодування;

3. Отримав подальшого розвитку метод побудови кодів одичної відстані, що базується на моделі гіперкуба та пошуку гамільтонового шляху в гіперкубі, який дозволяє формувати множини кодів одичної відстані заданої довжини.

Робота має чітку послідовність постановки задач та отриманих рішень, достатню доказову базу та аргументованість результатів. Використано сучасний математичний апарат для реалізації сформованої мети. Порівняльні оцінки запропонованих автором нових рішень щодо результатів, які отримані провідними вченими та дослідниками в галузі, достатньо аргументовані та відповідають списку приведених першоджерел. Висновки та рекомендації, які сформульовані в дисертаційній роботі, враховують сутність та актуальність наукового завдання роботи та її мету, вони є придатними для практичного використання.

Отримані здобувачем наукові результати є авторськими та актуальними для розвитку телекомунікаційних систем, оскільки забезпечують підвищення ефективності обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем із застосуванням збалансованих кодів одичної відстані у порівнянні з традиційними підходами. Усі теоретичні розробки дисертації автор довів до конкретних інженерних методик, алгоритмів та програмних продуктів.

**Значення результатів дисертаційної роботи для науки та практики, шляхи використання.** Практичне значення та подальша реалізація результатів

дисертаційної роботи щодо підвищення ефективності обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем із застосуванням збалансованих кодів одиничної відстані, якій присвячені наукові дослідження, дозволяє підвищити загальну ефективність обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем. Зокрема, практичними результатами є розробка алгоритмів та програмних реалізацій запропонованих методів, а саме таких:

– алгоритм та програмна реалізація методу ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності, зменшуючи кількість варіантів, що аналізуються, на 97-99% за рахунок використання тільки типових представників та спрощуючи відбір кодів із заданими властивостями;

– алгоритм та програмна реалізація методу конструктивного перерахування кодів одиничної відстані на основі визначення інваріантів та формування системи типових представників, який дозволяє формувати коди, що мають покращене значення збалансованості у порівнянні з класичним кодом Грея у 2,5-6 разів залежно від розрядності коду;

– алгоритм та програмна реалізація методу побудови кодів одиничної відстані на основі графових моделей гіперкуба, який дозволяє формувати всі можливі коди одиничної відстані довжини  $n$ .

Практичне значення одержаних результатів роботи підтверджується як актами впровадження, що представлені в додатках дисертації у діяльність ДП «Південний державний проєктно-конструкторський та науково-дослідний інститут авіаційної промисловості», ПП «Софтвеа Експерт» і в навчальний процес Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» для студентів спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», так і отриманими здобувачем разом з науковим керівником 4 патентами України на корисну модель та 4 свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір у вигляді комп'ютерних програм.

**Оцінка змісту дисертації, її завершеності й оформлення.** Побудова дисертації відповідає прийнятим для наукового дослідження нормам. Усі положення, винесені на захист, висвітлені в тексті дисертації. Зміст дисертаційної роботи відповідає її назві.

Дисертація написана грамотною науковою мовою та оформлена відповідно до існуючих нормативних документів, текст і графічний матеріал виконані акуратно з використанням комп'ютерної техніки.

Дисертація складається з анотацій, вступу, 4 розділів, висновків, списків використаних джерел і 7 додатків. Обсяг основного тексту дисертації (без анотацій, змісту, списку використаних джерел і додатків) становить 121 сторінку, що відповідає встановленим вимогам.

У вступі автором представлена загальна характеристика роботи, обґрунтована актуальність наукової теми, сформульовані мета і задачі

дослідження, відображено наукову новизну та практичну цінність отриманих результатів і висновків, наведено дані щодо їх апробації та впровадження.

*У першому розділі* дисертації проведений аналіз стану проблеми підвищення ефективності та достовірності обробки інформації в телекомунікаційних системах за рахунок використання кодів Грея. Проведений аналіз показав, що коди такого виду широко застосовуються на практиці завдяки властивості одиничної відстані між суміжними кодовими словами..

*У другому розділі* роботи розглянуто комбінаторне кодування систем цифрової обробки інформації. Виявлено, що попри існування альтернативних кодів Грея, відсутній загальний систематичний підхід до їх побудови та аналізу. Розроблено метод побудови кодів одиничної відстані, що базується на моделі  $n$ -вимірною гіперкуба та алгоритмі пошуку гамільтонового шляху в графі. Досліджено властивості кодів з одиничною відстанню. Визначені властивості множини кодових слів, структура коду, характеристики коду, канонічна форма. Для подальшого дослідження коди одиничної відстані розбиваються на класи еквівалентності щодо заданої групи перетворень та досліджуються властивості представників класів. Розроблено метод ієрархічної класифікації кодів одиничної відстані, у якій множина об'єктів розбивається на класи еквівалентності відносно заданої для кожного ієрархічного рівня групи перетворень та визначаються типові представники для кожного класу еквівалентності. Застосування методу ієрархічної класифікації дозволяє спростити аналіз множин кодів, досліджуючи властивості типових представників окремих класів еквівалентності.

*У третьому розділі* роботи розглянуто метод перерахування кодів одиничної відстані, при якому виникає необхідність розробки конструктивних засобів опису класів комбінаторних множин, що мають необхідні властивості. Показано, що для побудови комбінаторних множин зі складною структурою доцільним є застосування методів теорії перерахування. Розроблено метод конструктивного перерахування кодів одиничної відстані, заснований на визначенні інваріантів та генерації системи різних типових представників, що дозволяє формувати коди одиничної відстані з заданими властивостями збалансованості без повного перебору варіантів, спрощуючи задачу вибору оптимального кодування. Наведено приклади типових представників для кодів одиничної відстані.

*Четвертий розділ* присвячений порівнянню властивостей кодів отриманих в результаті використання запропонованих методів з кодами, що є найбільш поширеними в телекомунікаційних системах. Виявлено, що застосування запропонованих методів для побудови кодів одиничної відстані дозволяє покращити значення збалансованості порівняно з відомими кодами. Запропонований метод ієрархічної класифікації дозволяє суттєво зменшити кількість варіантів кодових послідовностей, що потребують аналізу, при цьому зберігаючи основні властивості кодів одиничної відстані. Розроблено комп'ютерні програми «Інструмент генерації кодів одиничної відстані»,

«Програма формування кодів із заданими властивостями», «System of distinct representatives», «Програма визначення еквівалентності кодів», які є інструментом для розробника інформаційних систем. Програми зареєстровані в Державній організації «Український національний офіс інтелектуальної власності та інновацій». Запропоновано апаратні засоби для автоматизації дослідження й розробки кодів із заданими властивостями «Перетворювач кодів», «Формувач збалансованих кодів», «Генератор еквівалентних кодів», «Аналізатор кодів». На розроблені апаратні засоби отримані патент України на корисну модель.

Висновки роботи повністю відповідають поставленим завданням, а результати дослідження теоретично обґрунтовані і пройшли експериментальну перевірку.

**Повнота викладення наукових і прикладних результатів дисертації в опублікованих працях та дотримання академічної доброчесності.** За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 24 наукові праці, яких 4 статті у фахових виданнях (2 – у виданнях, що включені в міжнародну наукометричну базу Scopus), 12 тез доповідей на наукових конференціях різного рівня, 4 патента України на корисну модель, 4 свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерні програми). Основні результати дисертаційної роботи у цих публікаціях відображено достатньо повно.

Матеріали, наукові положення та висновки викладено послідовно, аргументовано і в доступній формі, з обов'язковими посиланнями на першоджерела, що відповідає принципам академічної доброчесності, підтверджує достовірність дослідження та дає змогу відтворити його результати. Єдиний авторський стиль виконання розділів дисертаційної роботи, наукових статей та тез доповідей дозволяє підтвердити висновок щодо невикористання в роботі засобів штучного інтелекту.

Проведена перевірка дисертації та наукових публікацій здобувача не виявила ознак академічної недоброчесності, зокрема плагіату, самоплагіату, фальсифікації або фабрикування даних, а також будь-яких інших порушень принципів академічної доброчесності.

**Зауваження до дисертаційної роботи.** В процесі ознайомлення з роботою позитивне враження справила практична спрямованість роботи, докладне обґрунтування усіх висунутих у роботі положень, доведення розроблених методів до відповідних алгоритмів і програмних продуктів, що підтверджується патентами України на корисну модель та свідоцтвами про реєстрацію авторського права на твір (комп'ютерні програми)

Але при цьому виникли такі зауваження та недоліки:

1. Постановочна частина дисертації виглядала б краще, якби у першому підрозділі першого розділу більш детально та наглядно (у вигляді діаграм та графіків) були б наведені результати аналітичного огляду існуючих методів підвищення достовірності передачі інформації в інформаційних системах. Це підвищило б ступінь обґрунтованості зробленого автором висновку, що

критичними факторами ефективності сучасних телекомунікаційних систем є енергоспоживання та надійність.

2. У другому розділі роботи при розгляді представлення кодів у вигляді двійкових матриць здобувач обмежується лише загальним описом цього підходу, не приділяючи достатньої уваги його перевагам та обмеженням у порівнянні з іншими можливими способами представлення кодових послідовностей.

3. У другому розділі роботи використано показник збалансованості кодів, однак його визначення подано без достатнього обґрунтування важливості цієї характеристики для практичних застосувань.

4. У третьому розділі запропоновано алгоритм формування системи типових представників кодів одиначної відстані, однак недостатньо детально проаналізовано його обчислювальну складність та ефективність порівняно з існуючими методами перерахування комбінаторних об'єктів.

5. У третьому розділі наведено значну кількість таблиць із результатами перерахування кодів (таблиці 3.1–3.12), однак їх аналітичний розбір подано досить стисло, що ускладнює інтерпретацію отриманих результатів.

6. У роботі не наведено порівняння швидкодії розроблених програм із існуючими аналогами.

7. У таблиці 4.3 наведено значення показника збалансованості для різних кодів, однак не подано статистичного аналізу отриманих результатів.

Зазначені недоліки суттєво не впливають на загальне позитивне враження від роботи, не зменшують наукової новизни, практичної значущості та цінності отриманих результатів дисертаційної роботи Яреценка Владислава Валерійовича, а можуть бути враховані при подальших дослідженнях в даному напрямі.

#### **Відповідність дисертації встановленим вимогам і загальні висновки.**

За змістом, актуальністю, ступенем новизни, обґрунтованістю, науковою та практичною значимістю одержаних результатів дисертаційна робота “Методи побудови кодів одиначної відстані для енергоефективного обладнання телекомунікаційних систем” є завершеним науковим дослідженням, присвяченим актуальним проблемам підвищення ефективності та надійності телекомунікаційних систем, яке містить авторські дослідження, науково обґрунтовані теоретичні положення та практично адаптовані результати, що мають значну цінність для розвитку сучасних телекомунікаційних технологій.

Основним результатом теоретичних і експериментальних досліджень є розробка нових та удосконалення існуючих моделей та методів, пов'язаних із побудовою та класифікацією кодів одиначної відстані, які мають покращені показники збалансованості та дозволяють мінімізувати пікову комутаційну активність, запобігати локальним перевантаженням та підвищувати загальну ефективність обробки інформації в енергоефективному обладнанні телекомунікаційних систем.

Отже, дисертаційна робота Яреценка Владислава Валерійовича відповідає спеціальності 172 «Телекомунікації та радіотехніка», та вимогам п.п. 6–9

«Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії» затвердженої Кабінетом Міністрів України від 12 січня 2022 р (зі змінами, внесеними згідно з Постановами КМ № 341 від 21.03.2022, № 502 від 19.05.2023 та № 507 від 03.05.2024), затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 р. № 44, а автор роботи, Ярещенко Владислав Валерійович, заслуговує на присудження наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Офіційний опонент,  
професор кафедри комп'ютерної  
інженерії та програмування,  
Національного технічного університету  
«Харківський політехнічний інститут»  
доктор технічних наук, професор



Георгій КУЧУК

«01» квітня 2026 р.