

Ученому секретарю спеціалізованої  
вченеї ради Д 64.820.01  
61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7

**ВІДГУК  
офіційного опонента**

**доктора технічних наук, професора Климаша Михайла Миколайовича  
на дисертаційну роботу Штомпеля Миколи Анатолійовича на тему  
«Методи декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій для  
телекомунікаційних систем»,  
представлену на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук  
за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі**

**1. Актуальність теми дисертаційної роботи.**

У подальшому розвитку інформаційного суспільства в Україні та світі ключову роль відіграють інформаційні та телекомунікаційні технології, на базі яких створюється єдине інфокомунікаційне середовище. Побудова сучасних телекомунікаційних систем та мереж здійснюється з використанням цифрового обладнання та характеризується планомірним переходом до пакетної передачі інформації на основі стандартизованих мережевих протоколів. Надання новітніх інформаційних та телекомунікаційних послуг, збільшення обсягів інформації, що передається, складна завадова обстановка та обмеженість ресурсів телекомунікаційних мереж обумовлює зростання вимог до достовірності передачі інформації та енергетичної ефективності телекомунікаційних систем. Задоволення цих вимог потребує узагальнення світового досвіду у сфері телекомунікацій та значним чином залежить від впровадження перспективних методів передачі та обробки інформації. Основним підходом до забезпечення заданої достовірності передачі інформації у телекомунікаційній інфраструктурі є застосування методів

завадостійкого кодування інформації, які є обов'язковою складовою більшості мережевих технологій. При цьому існуючі положення та класичний математичний апарат теорії завадостійкого кодування не дають змоги забезпечити зростаючі потреби щодо надійної передачі інформації через проводові та безпровідні канали зв'язку гетерогенної інфокомунікаційної інфраструктури.

Таким чином, тема дисертаційної роботи Штомпеля М.А. є актуальню, оскільки спрямована на розв'язання важливої науково-прикладної проблеми підвищення ефективності захисту інформації від помилок, що виникають у процесі передачі у телекомунікаційних системах та мережах.

## **2. Загальна характеристика дисертаційної роботи.**

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків та додатків. Повний обсяг дисертації складає 361 сторінку, з них 288 сторінок основного тексту, 87 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел з 210 найменувань та 2 додатки.

У першому розділі представлено завдання дослідження щодо аналізу проблеми підвищення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах і мережах, обґрунтовано напрям дисертаційних досліджень та здійснено постановку часткових завдань досліджень.

У другому розділі дисертації в межах сформульованої проблеми дослідження отримано науковий результат, який полягає в удосконаленні методів декодування двійкових лінійних блокових кодів шляхом застосування узагальнених біоінспірованих процедур для пошуку переданого кодового слова з урахуванням інформації про найбільш (найменш) надійний базис породжувальної (перевірочної) матриці цих кодів.

У третьому розділі в рамках розв'язання завдань дисертаційного дослідження отримано наукові результати, пов'язані із забезпеченням подальшого розвитку методів оптимізації нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність та коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми цих кодів, а також удосконаленням методу ітеративного декодування та розробленням комбінованого

методу декодування цього класу кодів.

У четвертому розділі роботи отримано два наукові результати, що відносяться до розроблення біоінспірованих методів м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій для каналів зв'язку з незалежними помилками та згрупованими помилками.

У п'ятому розділі дисертації отримано науковий результат, який полягає у подальшому розвитку методу оптимізації кодів Лабі на основі узагальненого біоінспірованого пошуку для ефективного відновлення втрачених даних у телекомунікаційних мережах із комутацією пакетів.

### **3. Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертаційній роботі.**

Обґрунтованість основних положень дисертаційної роботи визначається аргументованою постановкою мети та завдань досліджень, точним визначенням об'єкту та предмету дослідження, що вказує на системний підхід автора до пошуку шляхів розв'язання сформульованої науково-прикладної проблеми. Постановка і формалізація завдань досліджень виконана з урахуванням вичерпного набору чинників, що впливають на коректність наукових та практичних результатів, отриманих у дисертаційній роботі. Проведені дослідження є досить глибокими та достатньою мірою розкривають проблематику підвищення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах та мережах з використанням класичних та сучасних завадостійких кодових конструкцій. Основні положення дисертаційної роботи є науково обґрунтованими та засновані на методах та фундаментальних аспектах теорії завадостійкого кодування, теорії кінцевих полів, теорії графів, теорії оптимізації, теорії математичного програмування та біоінспірованому підході. Обґрунтованість висновків та рекомендацій, представлених у дисертаційній роботі, обумовлена коректним формулюванням оптимізаційних задач, що, з математичної точки зору, представляють проблеми декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій різних класів, а також доведенням доцільності застосування для їх розв'язання принципів та методів біоінспірованої

пошукової оптимізації. Для підтвердження обґрунтованості наукових результатів і висновків, а також отримання відповідних практичних результатів автором використано методи теорії алгоритмів, теорії ймовірності та методи математичного моделювання, математичної статистики, математичного аналізу та синтезу. Отримані у дисертаційній роботі результати не суперечать фундаментальним положенням теорії телекомуникацій, теорії інформації та теорії завадостійкого кодування.

#### **4. Достовірність і новизна результатів дисертаційної роботи.**

Підтвердженням достовірності отриманих у роботі наукових результатів являється їх збіжність з числовими даними, одержаними у ході значної кількості експериментальних досліджень із використанням запропонованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій та порівнянням їх ефективності з існуючими методами. Для підтвердження достовірності сформульованих висновків автором проведений детальний аналіз відомих результатів та наукових досягнень у обраній предметній області.

Новизна отриманих результатів полягає в розвитку теорії та методології завадостійкого кодування інформації на основі узагальненого біоінспірованого підходу щодо забезпечення подальшого розвитку методів оптимізації випадкових завадостійких кодових конструкцій за заданими критеріями – нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність та кодів Лабі, а також розробки та удосконалення методів м'якого декодування завадостійких кодів різних класів – класичних блокових кодів, кодів з малою щільністю перевірок на парність, алгебраїчних згорткових кодових конструкцій. Запропоновані біоінспіровані методи декодування та оптимізації завадостійких кодів є теоретико-методологічною основою для підвищення достовірності передачі інформації та збільшення енергетичної ефективності від кодування у існуючих та перспективних телекомуникаційних системах та мережах.

Найбільш цінними з точки зору новизни є такі наукові результати.

*Вперше отримано:*

- комбінований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, новизна якого полягає у поєднанні м'якого декодування на основі розповсюдження довіри та декодування на основі біоінспірованих процедур пошукової оптимізації, що дає змогу збільшити достовірність передачі інформації у телекомунікаційних системах;
- метод декодування алгебраїчних згорткових кодів, новизна якого полягає у формуванні найбільш надійного базису породжувальної матриці та застосуванні біоінспірованих процедур пошукової оптимізації для пробних векторів, отриманих у результаті випадкового зміщення, що дає змогу зменшити ймовірність помилки декодування при передачі інформації у каналах зв'язку з випадковими помилками;
- адаптивний метод декодування алгебраїчних згорткових кодів перемежування, новизна якого полягає у ітеративному застосуванні біоінспірованих процедур до модифікованої перевірочної матриці цих кодів, отриманої в результаті адаптивного розповсюдження довіри, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації у каналах зв'язку з пам'яттю.

*Удосконалено:*

- методи декодування двійкових лінійних блокових кодів, які відрізняються від відомих застосуванням узагальнених біоінспірованих процедур пошукової оптимізації для визначення переданого кодового слова після знаходження найбільш (найменш) надійного базису на основі породжувальної (перевірочної) матриці, що дає змогу зменшити обчислювальну складність декодування та підвищити енергетичну ефективність від кодування;
- метод ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, що, на відміну від відомих, застосовує узагальнені біоінспіровані процедури для уникнення потрапляння у локальні мініуми цільової функції, заснованої на модифікованому правилі кореляційного декодування, що дає змогу підвищити ефективність декодування цих кодів.

*Отримали подальший розвиток:*

- метод оптимізації відносно коротких нерегулярних кодів з малою щільністю

перевірок на парність, який, на відміну від існуючих, заснований на біоінспірованому пошуку розподілу серед зменшеного числа ступенів символічних вершин графу Таннера, який відповідає обраному коду, що дає змогу підвищити ефективність синтезу цих кодових конструкцій;

- метод оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми кодів з малою щільністю перевірок на парність, який відрізняється від існуючих спільним застосуванням процедури еволюції щільності та біоінспірованих процедур зменшеної складності для обраної моделі каналу зв'язку та параметрів коду, що дозволяє прискорити визначення покращених коефіцієнтів нормалізації;

- метод оптимізації кодів Лабі, який, на відміну від відомих, заснований на біоінспірованому пошуку зменшеної складності покращених розподілів степенів кодових вершин графів Таннера, які відповідають даним кодам, відповідно до заданих критеріїв, що дає змогу зменшити обчислювальну складність синтезу кодів Лабі для телекомунікаційних мереж з комутацією пакетів.

На основі запропонованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій автором розроблено алгоритми та псевдокоди, що лежать в основі їх програмної реалізації. З використанням розроблених алгоритмів та псевдокодів було досліджено ефективність запропонованих методів для певних моделей каналу зв'язку та умов передавання інформації. Як наслідок, автором було отримано ряд практичних результатів щодо особливостей застосування цих методів при побудові телекомунікаційних систем та мереж різного призначення.

## **5. Повнота викладу наукових результатів дисертаційної роботи у опублікованих працях.**

Основні наукові результати, що отримані у дисертаційній роботі, в належній мірі опубліковано у 60 наукових працях, зокрема – у 28 наукових статтях у наукових фахових виданнях України та виданнях, що входять до наукометричних баз.

Основні результати досліджень доповідалися і були схвалені на 32-ох

науково-практичних та науково-технічних конференціях різних рівнів. Також результати дисертаційної роботи використані при виконанні науково-дослідних робіт, в яких автор виступав виконавцем.

## **6. Відповідність дисертаційної роботи встановленим вимогам.**

Дисертаційна робота написана грамотною науково-технічною мовою, матеріал викладено послідовно, структуровано та логічно. Структура та застосовані правила оформлення дисертації відповідають вимогам наказу Міністерства освіти і науки України № 40 «Про затвердження Вимог до оформлення дисертації» від 12.01.2017 р. та пунктам 9, 10, 12–14 постанови Кабінету Міністрів України № 567 «Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів» від 24.07.2013 р (зі змінами та доповненнями). Зміст роботи та отримані результати відповідають паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Зміст автoreферату, в частині основних положень і результатів, зроблених висновків та запропонованих рекомендацій достатньою мірою відображає зміст дисертації.

Стиль викладу матеріалів досліджень, наукових положень, висновків і рекомендацій забезпечує доступність їх сприйняття.

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

За результатами аналізу дисертаційної роботи можна виділити такі недоліки.

1. У першому розділі дисертаційної роботи обґрунтовано доцільність застосування біоінспірованого підходу до розв'язання проблем оптимізації та декодування завадостійких кодових конструкцій, формально представлених у виді відповідних оптимізаційних задач. Також у висновках до розділу зазначено, що найбільше поширення отримали еволюційні методи та методи, натхненні принципами та процесами, які відбуваються у живій природі, які в подальшому використовуються автором для оцінювання ефективності запропонованих біоінспірованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодів різних

класів. Однак, у роботі не наведено принципи реалізації та особливості оптимізаційних процедур такого типу, що ускладнює оцінку переваг обраних біоінспірованих процедур.

2. У дисертаційній роботі порівняння характеристик запропонованих біоінспірованих методів декодування лінійних блокових кодів здійснено лише з методом декодування на основі впорядкованих статистик різних порядків для каналу з адитивним білим гауссовим шумом. При цьому не наведено аргументів щодо вибору саме цього методу декодування для здійснення порівняльного аналізу. Також доцільно було б навести порівняння з іншими неалгебраїчними методами декодування цих кодів, наприклад, методом декодування Чейза, що характеризується достатньо високою ефективністю.

3. У запропонованому методі оптимізації нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність для побудови графу Таннера, що відповідає коду з заданими параметрами, використано метод «progressive edge-growth» (PEG), який передбачає застосування розподілу для двох послідовно обраних перевірочних вершин цього графу. Однак, в дисертаційній роботі не представлено обраний розподіл перевірочних вершин графу Таннера, який був використаний при проведенні моделювання та знаходженні оптимізованих розподілів символічних вершин.

4. У дисертаційній роботі вперше отримано комбінований метод декодування відносно довгих кодів з малою щільністю перевірок на парність, однією зі стадій якого є м'яке декодування на основі розповсюдження довіри, що засноване на обчисленні відповідних імовірностей  $i$ , внаслідок чого, характеризується значною обчислювальною складністю. Не зрозуміло, чому автор не використав на даній стадії декодування один із підходів до зниження обчислювальної складності ітеративного декодування цього класу кодів, що були визначені у підрозділі 3.3 за результатами проведених досліджень.

5. У четвертому розділі дисертаційної роботи автором запропоновані біоінспіровані методи декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій та досліджено їх ефективність для моделей каналу зв'язку з адитивним білим

гауссовим шумом та релеєвським розсіюванням. За результатами моделювання зроблено висновок, що представлені методи декодування забезпечують значний енергетичний вигравш від кодування у порівнянні з існуючими алгебраїчними методами декодування для обраних моделей каналу зв'язку. Однак, на жаль, автор не здійснив порівняльний аналіз для моделі каналу Райса, що дозволило б більш повно дослідити ефективність запропонованих методів декодування.

6. У роботі обґрунтовано необхідність оптимізації кодів Лабі за різними критеріями в залежності від області їх застосування у телекомунікаційних мережах із комутацією пакетів та сформульовано відповідну багатокритерійну оптимізаційну задачу. Однак, результати моделювання для запропонованого методу оптимізації кодів Лабі наведено лише для двох критеріїв – надмірності коду та обчислюальної складності кодування (декодування).

7. У дисертаційній роботі детально розглянуті питання програмної реалізації запропонованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій шляхом розроблення відповідних алгоритмів та псевдокодів. На жаль, в роботі не наведені практичні рекомендації та обмеження щодо апаратної реалізації представлених методів.

Слід зазначити, що вказані недоліки не знижують загального позитивного враження від дисертаційної роботи.

## **8. Висновки.**

Дисертаційна робота Штомпеля Миколи Анатолійовича на тему: «Методи декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій для телекомунікаційних систем» є завершеним дослідженням, в якому отримані нові науково обґрунтовані результати, що в сукупності розв'язують актуальну науково-прикладну проблему, яка полягає у підвищенні достовірності передавання інформації та збільшенні енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах і мережах.

Результати дисертаційного дослідження в сукупності є істотними для розвитку теорії завадостійкого кодування інформації та практичного застосування

її положень при побудові телекомунікаційних систем та мереж різного призначення.

Дисертаційна робота відповідає паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Автореферат об'єктивно та з достатньою повнотою відображає зміст і основні положення дисертаційної роботи.

Результати дисертаційної роботи належним чином апробовані на конференціях та опубліковані у наукових періодичних виданнях (відповідно до положень чинного наказу №1112 МОН України від 17.10.2012, зокрема п. 2.1).

Розглянута дисертаційна робота відповідає пунктам 9, 10, 12–14 Порядку присудження наукових ступенів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України № 567 від 24.07.2013 р. (зі змінами та доповненнями), а її автор – Штомпель Микола Анатолійович – заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент:

завідувач кафедри телекомунікацій

Національного університету

«Львівська політехніка»,

доктор технічних наук, професор



М. М. Клишаш

Підпис професора Клишаша М. М. засвідчує,

Вчений секретар

Національного університету

«Львівська політехніка»

Р. Б. Брилинський

