

**Ученому секретарю
спеціалізованої вченої ради Д 64.820.01**

61050, м. Харків, пл. Фейєрбаха, 7

**ВІДГУК
офіційного опонента**

доктора технічних наук, професора Козелкова Сергія Вікторовича на дисертацію Штомпеля Миколи Анатолійовича на тему: «Методи декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій для телекомунікаційних систем», поданої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Актуальність теми дисертації.

Перехід до новітніх інформаційних технологій та широке впровадження інтернет-комунікацій потребує постійного удосконалення національної телекомунікаційної інфраструктури. При цьому суттєво зростає роль систем рухомого зв'язку нового покоління, повсюдно застосовуються технології безпроводового доступу та впроваджуються телекомунікаційні мережі на основі стеку протоколів TCP/IP. Наявна тенденція розвитку телекомунікацій полягає в необхідності забезпечення працездатності різноманітних сервісів та контентних інформаційних послуг з поступовим зменшенням об'єму голосових послуг. У результаті цього значним чином зростають вимоги до достовірності передавання інформації, серед якої домінуючу роль відіграють саме дані, а не мовний трафік. Також зростає необхідність у збільшенні енергетичної ефективності систем рухомого зв'язку та засобів безпроводового доступу, заснованих на новітніх

стандартах, технологіях та протоколах. Це обумовлює необхідність пошуку нових більш ефективних методів забезпечення надійного передавання інформації, зокрема, з використанням положень теорії завадостійкого кодування. Однак, класичні методи жорсткого декодування завадостійких кодів характеризуються низькою корегувальною здатністю, а існуючі методи м'якого декодування мають високу обчислювальну складність. Крім того, впровадження випадкових завадостійких кодових конструкцій, що мають високі конструктивні властивості, призводить до необхідності оптимізації їх параметрів для заданих умов передавання інформації. Таким чином, виникає протиріччя між наявними потребами галузі телекомунікацій відносно забезпечення високої достовірності передавання різних видів інформації у телекомунікаційних мережах та підвищення енергетичної ефективності безпроводових телекомунікаційних систем та класичними положеннями та методами теорії завадостійкого кодування. Отже, тема дисертації Штомпеля М.А. безсумнівно є актуальною, а сформульована науково-прикладна проблема, що пов'язана із забезпеченням високонадійного передавання інформації у різноманітній телекомунікаційній інфраструктурі шляхом покращання характеристик завадостійких кодових конструкцій та методів їх декодування, потребує невідкладного вирішення.

Оцінка змісту та загального рівня роботи.

Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків, повний обсяг дисертації становить 361 сторінку, з них 288 сторінок основного тексту.

У першому розділі дисертації проаналізовано тенденції розвитку теорії завадостійкого кодування, представлено основні види завадостійких кодових конструкцій, розглянуто методи жорсткого та м'якого декодування, наведено формальне представлення базових завадостійких кодів та математичних моделей каналів зв'язку, запропоновано узагальнене представлення проблеми декодування (оптимізації) завадостійких кодових конструкцій у

вигляді оптимізаційної задачі та обґрунтовано доцільність застосування біоінспірованого підходу до вирішення даної задачі, а також обрано напрям досліджень та здійснено постановку завдань досліджень.

Другий розділ дисертації присвячено удосконаленню методів декодування двійкових лінійних блокових кодів. У розділі проаналізовані обмеження існуючих методів декодування даних кодів, представлено задачі декодування для кодів з різною швидкістю кодування у вигляді відповідних оптимізаційних задач, запропоновано підхід до вирішення сформульованих оптимізаційних задач шляхом розробки біоінспірованих методів декодування даних кодів з використанням інформації про найбільш (найменш) надійний базис породжувальної (перевірочної) матриці та проведено дослідження ефективності представлених методів декодування.

У третьому розділі дисертації представлено біоінспіровані методи оптимізації та декодування окремого класу блокових кодів – кодів з малою щільністю перевірок на парність. Проаналізовано обчислювальну складність методів кодування та декодування даних кодів, наведено формальне представлення проблем оптимізації (декодування) цих кодів з використанням положень теорії оптимізації, на основі методології біоінспірованого підходу запропоновано метод оптимізації відносно коротких нерегулярних кодів даного класу, методи ітеративного та комбінованого декодування даних кодів та метод оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми, а також досліджено характеристики та обмеження розроблених методів.

У четвертому розділі дисертації запропоновані методи м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодів та відповідних кодів перемежування, що засновані на біоінспірованому пошуку та додаткових обчислювальних процедурах. Представлено принципи побудови та існуючі підходи до жорсткого декодування даного класу згорткових кодів, наведено сутність розроблених методів декодування та досліджено особливості їх

застосування у каналах зв'язку з випадковими помилками та за умови групування помилок.

У п'ятому розділі дисертації наведено біоінспірований підхід до оптимізації кодів Лабі зменшеної складності. Наведено особливості методів кодування та декодування даних кодів, проаналізовано солітонноподібні розподіли, що суттєво впливають на характеристики даного класу кодів, сформульовано задачі однокритеріальної та багатокритеріальної оптимізації кодів Лабі та запропоновано методи для їх вирішення, а також здійснено дослідження представлених біоінспірованих методів оптимізації даних кодів.

Також дисертація містить ґрунтовні висновки, список використаних джерел з 210 найменувань та додатки, у яких наведено список наукових праць здобувача за темою дисертації та відомості про впровадження результатів дисертації.

Таким чином, обсяг дисертаційної роботи відповідає нормам, встановленим для докторських дисертацій з технічних наук.

Автореферат містить усі основні положення, наукові та практичні результати, отримані автором, та необхідною мірою відображає зміст дисертації.

Новизна наукових результатів, що одержані у дисертації.

У рамках сформульованої науково-прикладної проблеми автором визначено десять наукових завдань дослідження, рішення яких висвітлено у відповідних розділах дисертації. При цьому викладення матеріалів дисертаційного дослідження здійснюється з дотриманням суворого та логічного взаємозв'язку окремих складових роботи, що забезпечує добре сприйняття отриманих автором результатів. Позитивне враження від дисертації викликає широке застосування наочних схем запропонованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодів, а також представлені результати математичного моделювання, що дозволяє достатньо повно оцінити ефективність даних методів. Сформульовані у дисертації висновки та

рекомендації є коректними та науково обґрунтованими, що свідчить про достатню повноту вирішення науково-прикладної проблеми та досягнення мети дисертаційної роботи.

Наукові результаті, отримані у ході дисертаційного дослідження, автором розділено на відповідні групи за класами завадостійких кодових конструкцій, що значно покращує їх сприйняття.

До першої групи результатів відносяться удосконалені 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 дозволяє зменшити обчислювальну складність декодування та підвищити енергетичну ефективність від кодування.

Друга група об'єднує результати, що дозволяють покращити характеристики та підвищити ефективність декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. До цієї групи наукових результатів можна віднести наступні:

- отримав 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 степенів символічних вершин графу Таннера, що відповідає обраному коду, що дозволяє підвищити ефективність синтезу даних кодових конструкцій;

- удосконалено 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, заснований на модифікованому правилі кореляційного декодування, що дозволяє підвищити ефективність декодування даних кодів;

- вперше запропоновано 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 дозволяє збільшити достовірність передачі інформації у телекомунікаційних системах;
- отримав подальший розвиток метод оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми кодів з малою щільністю перевірок на парність, який відрізняється від існуючих спільним застосуванням процедур еволюції щільності та біоінспірованих процедур зменшеної складності для обраної моделі каналу зв'язку та параметрів коду, що дозволяє прискорити визначення покращених коефіцієнтів нормалізації.

До третьої групи відносяться результати, спрямовані на підвищення енергетичної ефективності від кодування при застосуванні алгебраїчних згорткових кодових конструкцій для різних моделей каналу зв'язку.

Вперше запропоновано:

- 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 дозволяє 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 даних кодів, отриманої в результаті адаптивного розповсюдження довіри, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації у каналах зв'язку з пам'яттю.

Насамкінець, науковий результат, пов'язаний із застосуванням окремого класу новітніх кодів без фіксованої швидкості кодування, полягає у

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

Отримані у дисертації наукові результати повністю відповідають паспорту спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Обґрунтованість та достовірність результатів сумнівів не викликає, оскільки автор у своїх дослідженнях спирається на загальноприйняті положення теорії завадостійкого кодування, теорії кінцевих полів, теорії графів, теорії оптимізації, теорії математичного програмування, а також науково обґрунтовано використовує методи біоінспірованої пошукової оптимізації. Крім того, автором у необхідній мірі застосовуються методи математичного моделювання при проведенні експериментальних досліджень.

Основні результати дисертації з достатньою повнотою викладення матеріалів опубліковані у 60 наукових працях, серед них 28 статей у наукових виданнях та 32 тези доповідей (матеріалів) наукових конференцій. Отримані у роботі результати були обговорені та схвалені на науково-практичних та науково-технічних конференціях різних рівнів, отримали позитивні відгуки провідних науковців та компетентних фахівців у даній галузі.

Обґрунтованість наукових результатів, отриманих автором, заснована на узгодженості експериментальних даних і науково обґрунтованих положень, представлених у дисертації. Достовірність наукових результатів роботи підтверджується коректним використанням теоретичних та експериментальних методів досліджень при розробці та удосконаленні методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій, формулюванні висновків і рекомендацій. Достовірність результатів

моделювання забезпечується використанням сучасних засобів і методик проведення досліджень.

Недоліки та зауваження до дисертації.

1. У першому розділі дисертації наведено формальне представлення математичних моделей каналів зв'язку та здійснено дослідження їх основних характеристик. Зокрема, розглянуто модель каналу зв'язку з адитивним білим гауссовим шумом та модель каналу зі стираннями, що в подальшому використовуються автором при проведенні математичного моделювання та оцінці ефективності запропонованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодів. Однак, на жаль, у даному розділі не представлено особливості моделі каналу Релея, для якої у дисертації було розроблено метод м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодів перемежування.

2. В дисертаційній роботі показано, що удосконалені методи декодування лінійних блокових кодів, засновані на використанні узагальненого біоінспірованого пошуку спільно з використанням інформації про надійність прийнятих з каналу зв'язку символів, дозволяють забезпечити задану достовірність передавання інформації зі зменшеною обчислювальною складністю. Однак, у роботі наведено результати моделювання лише для кодів БЧХ, що мають алгебраїчну структуру, доцільно було б здійснити експериментальні дослідження для випадкових блокових кодів, для яких практично відсутні ефективні методи декодування.

3. Як слідує з матеріалів дисертаційної роботи, запропоновані біоінспіровані методи декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність дозволяють збільшити достовірність передавання інформації у телекомунікаційних системах та підвищити ефективність декодування даних кодів, але при цьому, як зазначає автор, вони мають більшу обчислювальну складність у порівнянні з існуючими методами. При цьому у роботі не наведено графіків для ілюстрації збіжності представлених методів декодування при знаходженні екстремуму відповідних цільових функцій, що

дозволило б більш повно оцінити їх обмеження.

4. Запропонований у роботі метод оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної кодів з малою щільністю перевірок на парність передбачає спільне використання узагальнених біоінспірованих процедур та специфічної процедури «density evolution», що має значну обчислювальну складність та ряд інших обмежень. Не зрозуміло, чому автор не використав підхід на основі комп’ютерного моделювання передачі інформації замість даної процедури за аналогією з підрозділом 3.2.

5. У дисертації при розробці методів м’якого декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій для каналів з випадковими та згрупованими помилками доцільно було б навести порівняння їх ефективності з класичними методами декодування згорткових кодів, наприклад, з алгоритмом Вітербі, що знаходить широке застосування на практиці.

6. У роботі детально представлено та досліджено біоінспірований підхід до оптимізації кодів Лабі для різної кількості інформаційних символів за критерієм надмірності, що відіграє ключову роль у більшості практичних випадків. Водночас, відомо, що при використанні даних кодів у якості складової каскадних кодових конструкцій типу «Raptor» більш важливими параметрами є частота відмов або імовірність відмови. На жаль, у дисертаційній роботі не проведено дослідження оптимізації даних параметрів з використанням розробленого підходу.

7. У дисертації розглянуто проблему декодування та оптимізації лише стосовно двійкових завадостійких кодів, хоча відомо, що застосування недвійкових кодових конструкцій (наприклад, кодів Ріда-Соломона, недвійкових кодів з малою щільністю перевірок на парність тощо) дозволяє значно підвищити ефективність від кодування при побудові сучасних телекомунікаційних систем та мереж, особливо на базі безпроводових технологій.

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

Незважаючи на вищезазначені недоліки та зауваження, можна зробити висновок про те, що дисертаційна робота Штомпеля Миколи Анатолійовича на тему «Методи декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій для телекомунікаційних систем» є завершеним науковим дослідженням, що присвячене вирішенню актуальної науково-прикладної проблеми. Результати дисертаційної роботи в сукупності є суттєвими для розвитку теорії завадостійкого кодування та підвищення достовірності передавання інформації у телекомунікаційних системах та мережах. Дисертація відповідає вимогам, сформульованим у пунктах 9, 10, 12–14 постанови Кабінету Міністрів України № 567 «Про затвердження Порядку присудження наукових ступенів» від 24.07.2013 р., що висуваються до докторських дисертацій, а здобувач заслуговує присудження наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі.

Офіційний опонент,
директор Навчально-наукового інституту телекомунікацій та інформатизації
Державного університету телекомунікацій,
доктор технічних наук, професор

С.В. Козелков



О.В. Попов