

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерства освіти і науки України

Український державний університет залізничного транспорту
Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

ШТОМПЕЛЬ МИКОЛА АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

МЕТОДИ ДЕКОДУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ ЗАВАДОСТІЙКИХ
КODOBИХ КОНСТРУКЦІЙ ДЛЯ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

05 – технічні науки

Подається на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ М. А. Штомпель

Науковий консультант

Приходько Сергій Іванович
доктор технічних наук, професор

Харків – 2018

ЗМІСТ

<u>ВСТУП.....</u>	<u>35</u>
1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ ТА МЕРЕЖАХ. ПОСТАНОВКА ЗАВДАНЬ ДОСЛІДЖЕННЯ	47
1.1 Тенденції розвитку методів завадостійкого кодування інформації у телекомунікаційних системах та мережах.....	47
1.2 Формальне представлення базових завадостійких кодових конструкцій.....	55
1.3 <u>Аналіз характеристик математичних моделей каналів зв'язку.....</u>	<u>60</u>
1.4 <u>Узагальнений біоінспірований підхід до декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій. Постановка завдань дослідження</u>	<u>69</u>
1.5 <u>Висновки за розділом 1</u>	<u>83</u>
2 БІОІНСПІРОВАНІ МЕТОДИ ДЕКОДУВАННЯ ЛІНІЙНИХ БЛОКОВИХ КОДІВ.....	86
2.1 <u>Принципи побудови та декодування лінійних блокових кодів.....</u>	<u>86</u>
2.2 Біоінспірований метод декодування лінійних блокових кодів з низькою швидкістю кодування	91
2.3 <u>Біоінспірований метод декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів.....</u>	<u>110</u>
2.4 <u>Дослідження ефективності біоінспірованих методів декодування лінійних блокових кодів</u>	<u>123</u>
2.5 <u>Висновки за розділом 2</u>	<u>133</u>
3 МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ ТА ДЕКОДУВАННЯ КОДІВ З МАЛОЮ ЩІЛЬНІСТЮ ПЕРЕВІРОК НА ПАРНІСТЬ НА ОСНОВІ <u>БІОІНСПІРОВАНОГО ПОШУКУ</u>	<u>135</u>
3.1 Принципи побудови кодів з малою щільністю перевірок на парність.....	135

3.2 Біоінспірована оптимізація нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність.....	139
3.3 Дослідження обчислювальної складності методів кодування та декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність.....	158
3.4 Метод ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі узагальнених біоінспірованих процедур.....	170
3.5 Комбінований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність	179
3.6 Біоінспірований пошук коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність	195
3.7 Висновки за розділом 3	207
4 БІОІНСПРОВАНІ МЕТОДИ ДЕКОДУВАННЯ АЛГЕБРАЇЧНИХ ЗГОРТКОВИХ КОДОВИХ КОНСТРУКЦІЙ	210
4.1 Принципи побудови алгебраїчних згорткових кодових конструкцій.....	210
4.2 Метод м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодів на основі біоінспірованих процедур та механізму випадкового зміщення	231
4.3 Адаптивний метод м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодів перемещування	248
4.4 Дослідження ефективності біоінспірованих методів декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій	267
4.5 Висновки за розділом 4	278
5 БІОІНСПРОВАНІЙ МЕТОД ОПТИМІЗАЦІЇ КОДІВ ЛАБІ	281
5.1 Особливості синтезу та декодування кодів Лабі	281
5.2 Біоінспірована оптимізація кодів Лабі за критерієм мінімальної надмірності	294
5.3 Багатокритеріальна оптимізація кодів Лабі на основі узагальненого біоінспірованого пошуку.....	301

5.4 Дослідження ефективності біоінспірованого методу оптимізації кодів Лабі.....	308
5.5 Висновки за розділом 5	315
ВИСНОВКИ	318
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	323
ДОДАТОК А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	346
ДОДАТОК Б. Акти про використання результатів дисертаційної роботи	355

ВСТУП

Актуальність теми. Однією з обов'язкових умов розвитку інформаційної спільноти в Україні є постійне удосконалення національної телекомунікаційної інфраструктури. Для цього при побудові телекомунікаційних систем та мереж різних видів необхідно використовувати сучасні телекомунікаційні технології, стандарти та протоколи, які реалізуються за допомогою цифрового обладнання. Телекомунікаційна інфраструктура держави повинна задовольняти ряду вимог, серед яких важливе значення має забезпечення заданої достовірності передачі інформації. Типовим підходом до вирішення даної задачі є застосування завадостійких кодових конструкцій при технічній реалізації телекомунікаційних систем та мереж. Гетерогенність існуючої телекомунікаційної інфраструктури та відмінність у вимогах до достовірності передачі інформації в залежності від виду телекомунікаційної послуги, характеристик каналу зв'язку та інших чинників призводять до необхідності використання різних класів завадостійких кодових конструкцій та методів декодування прийнятої інформації.

Розвиток методів завадостійкого кодування інформації розпочався зі створення двох фундаментальних класів кодових конструкцій: блокових кодів та згорткових кодів. Найбільш важливі завадостійкі коди першого класу (коди БЧХ, коди Ріда-Соломона) характеризуються наявністю в них алгебраїчної структури, що дозволяє достатньо просто реалізувати алгебраїчне жорстке декодування даних кодів. З іншого боку, декодування випадкових згорткових кодів, засноване на імовірнісних процедурах, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації за рахунок обробки м'яких рішень. На базі алгебраїчних блокових кодів та згорткових кодів було синтезовано послідовні каскадні коди, що дозволило значно покращити ефективність та зменшити обчислювальну складність декодування. Теоретичним та методологічним питанням у сферах теорії телекомунікацій та класичної теорії завадостійкого кодування присвячені праці таких вчених: Berlekamp E.R., Reed I.S., Solomon G., Forney G., Бондаренка О.В., Захарченка М.В., Лосєва Ю.І. та ін. Суттєвим недоліком блокових кодів є висока

складність м'якого декодування, що значно обмежує їх використання у сучасних телекомунікаційних технологіях.

Значним етапом у розвитку теорії завадостійкого кодування було створення паралельних каскадних кодів на основі рекурсивних згорткових кодів (турбокодів) та «перевідкриття» кодів з малою щільністю перевірок на парність, що засновані на ітеративному декодуванні. Найбільш ефективні турбокоди та коди з малою щільністю перевірок на парність мають випадкову структуру, що значно підвищує складність синтезу та декодування даних кодів. У цій галузі теорії завадостійкого кодування можна виділити роботи таких авторів: Berrou C., Gallager R.G., McEliece R.J., MacKay D.J.C., Климаша М.М., Козелкова С.В., Корчинського В.В., Рассомахіна С.Г. та ін. Однак важливим питанням залишається зменшення складності синтезу нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність з покращеними властивостями та підвищення ефективності м'якого декодування кодів даного класу.

Також важливим напрямом є створення алгебраїчно заданих згорткових кодових конструкцій, що засновані на узагальненні положень теорії блокових кодів. Дані коди мають високі конструктивні кодові характеристики та покращені властивості у порівнянні з випадковими згортковими кодами та турбокодами. Було розроблено ряд методів жорсткого декодування даних кодів, що враховують їх алгебраїчну структуру. Проблематиці алгебраїчної теорії згорткових кодів присвячені роботи Massey J. L., Lin S., Costello D. J., Приходька С.І., Кузнецова О.О. та ін. Цьому напрямку теорії завадостійкого кодування також присвячені роботи автора при написанні кандидатської дисертації. Однак у даних роботах не розглядалась можливість м'якого декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій у каналах зв'язку з випадковими помилками та групуванням помилок.

Наведені вище методи завадостійкого кодування інформації використовуються на фізичному рівні моделі взаємодії відкритих систем. Новим оригінальним підходом до відновлення даних в телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів є використання кодів без фіксованої швидкості кодування (фонтанних кодів) спільно з ітеративним декодуванням на верхніх рівнях моделі

взаємодії відкритих систем. Найбільш популярними представниками кодів даного класу є коди Лабі та послідовні каскадні фонтанні коди «Raptor». До авторів, що працюють у даному напрямку, відносяться Luby M., Shokrollahi A., Tirkonen T. та ін. При цьому підвищення ефективності кодів Лабі при пакетній передачі інформації потребує подальшої оптимізації їх параметрів в залежності від числа інформаційних символів та області застосування.

Вище зазначені чинники призводять до виникнення протиріччя між вимогами до достовірності передачі інформації та необхідності покращення енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах і мережах та існуючими положеннями теорії завадостійкого кодування, а також можливостями щодо технічної реалізації методів завадостійкого кодування інформації.

Таким чином, вирішення важливої науково-прикладної проблеми, яка полягає у підвищенні достовірності передачі інформації та збільшенні енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах і мережах шляхом розробки методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій різних класів, обумовлює актуальність теми дисертаційних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дослідження в дисертаційній роботі безпосередньо пов'язані з положеннями «Концепції розвитку телекомунікацій в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні» та рекомендаціями щодо «Реформ галузі інформаційно-комунікаційних технологій та розвитку інформаційного простору України». Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри транспортного зв'язку Українського державного університету залізничного транспорту. Результати дисертаційної роботи використані в ході виконання науково-дослідних робіт: «Науково-технічні засади організації та впровадження інтегральної системи технологічного зв'язку для забезпечення високошвидкісного руху поїздів» (№ держреєстрації 0114U004329); «Теоретичні основи організації мережі оперативно-технологічного зв'язку та синтезу систем забезпечення швидкісного руху поїздів» (№ держреєстрації 0115U000280), у яких

здобувач виступав виконавцем.

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення достовірності передачі інформації та збільшення енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах та мережах на основі розробки та удосконалення методів завадостійкого кодування інформації з використанням принципів біоінспірованої пошукової оптимізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні наукові завдання:

1. Дослідити проблему підвищення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах та мережах та обґрунтувати напрями досліджень.

2. Удосконалити методи декодування двійкових лінійних блокових кодів з метою забезпечення меншої обчислювальної складності реалізації декодеру та підвищення енергетичної ефективності від кодування.

3. Забезпечити подальший розвиток методу оптимізації відносно коротких нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність для зменшення обчислювальної складності та підвищення ефективності синтезу даних кодових конструкцій.

4. Удосконалити метод ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність шляхом застосування узагальнених біоінспірованих процедур для уникнення потрапляння у локальні мінімуми цільової функції.

5. Розробити комбінований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність для збільшення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах.

6. Забезпечити подальший розвиток методу оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми кодів з малою щільністю перевірок на парність для обраної моделі каналу зв'язку та параметрів коду.

7. Розробити метод декодування алгебраїчних згорткових кодів з метою зменшення ймовірності помилки декодування при передачі інформації у каналах зв'язку з випадковими помилками.

8. Розробити адаптивний метод декодування алгебраїчних згорткових кодів

перемежування для підвищення достовірності передачі інформації у каналах зв'язку з пам'яттю.

9. Забезпечити подальший розвиток методу оптимізації кодів Лабі з метою зменшення обчислювальної складності синтезу даних кодів відповідно до заданих критеріїв для телекомунікаційних мереж з комутацією пакетів.

10. Розробити алгоритми та псевдокоди для програмної реалізації даних методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій і дослідити їх ефективність.

Об'єкт дослідження: процеси підвищення достовірності передачі інформації та збільшення енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах та мережах.

Предмет дослідження: методи декодування та оптимізації лінійних завадостійких кодових конструкцій різних класів для телекомунікаційних систем та мереж.

Методи дослідження. Проведені дослідження ґрунтуються на методах теорії завадостійкого кодування, теорії графів, теорії математичного програмування, біоінспірованому підході – при розробці комбінованого методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, методу декодування алгебраїчних згорткових кодів та адаптивного методу декодування алгебраїчних згорткових кодів перемежування; методах теорії кінцевих полів, теорії математичного програмування, теорії завадостійкого кодування, біоінспірованому підході – при удосконаленні методів декодування двійкових лінійних блокових кодів та методу ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність; методах теорії завадостійкого кодування, теорії графів, теорії оптимізації, біоінспірованому підході – при забезпеченні подальшого розвитку методу оптимізації відносно коротких нерегулярних кодів з малою щільністю перевірок на парність, методу оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми кодів з малою щільністю перевірок на парність та методу оптимізації кодів Лабі. Основні практичні результати отримано з використанням методів теорії алгоритмів, теорії інформації, теорії телекомунікацій, теорії ймовірності, методів математичного

моделювання, математичної статистики, математичного аналізу та синтезу.

Наукова новизна отриманих результатів обумовлена новим вирішенням важливої науково-прикладної проблеми, що полягає у підвищенні достовірності передачі інформації та збільшенні енергетичної ефективності від кодування у телекомунікаційних системах та мережах шляхом розробки удосконалених методів декодування завадостійких кодових конструкцій з прийнятною обчислювальною складністю, а також оптимізації параметрів окремих класів завадостійких кодових конструкцій для різних моделей каналів зв'язку.

Отримано такі наукові результати.

1. **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 дозволяє зменшити обчислювальну складність декодування та підвищити енергетичну ефективність від кодування.

2. **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.

3. **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 мінімуми цільової функції, заснованій на модифікованому правилі кореляційного декодування, що дозволяє підвищити ефективність декодування даних кодів.

4. **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.

5. **Отримав подальший розвиток** 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.

6. **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.

7. **Вперше** запропоновано адаптивний метод декодування алгебраїчних згорткових кодів перемешування, новизна якого полягає у ітеративному застосуванні біоінспірованих процедур до модифікованої перевіркової матриці даних кодів, отриманої в результаті адаптивного розповсюдження довіри, що дозволяє підвищити достовірність передачі інформації у каналах зв'язку з пам'яттю.

8. **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.

Наукове значення роботи. Отримані наукові результати в сукупності є розвитком теорії завадостійкого кодування та спрямовані на підвищення достовірності передачі інформації у телекомунікаційних системах та мережах, а також зменшення обчислювальної складності синтезу та декодування завадостійких кодових конструкцій різних класів.

Достовірність отриманих результатів підтверджується відсутністю

протиріч з основними положеннями теорії інформації, теорії завадостійкого кодування, теорії оптимізації, теорії математичного програмування, а також збіжністю отриманих результатів із даними експериментальних досліджень та результатами математичного моделювання.

Практичне значення отриманих результатів досліджень полягає в наступному.

1. Розроблено алгоритми та псевдокоди, що лежать в основі програмної реалізації запропонованих методів декодування та оптимізації завадостійких кодових конструкцій, та досліджено ефективність даних методів для певних моделей каналу зв'язку та умов передачі інформації.

2. В залежності від параметрів алгебраїчного блокового коду БЧХ декодування на основі біоінспірованого підходу забезпечує у порівнянні з двійковою фазовою модуляцією енергетичний вигравш від кодування 3-6 дБ при коефіцієнті помилок 10^{-4} . При цьому у порівнянні з існуючим методом декодування на основі впорядкованих статистик різних порядків можливе отримання додаткового енергетичного вигравшу від кодування до 0,6 дБ при меншій обчислювальній складності біоінспірованого методу декодування.

3. Запропонований біоінспірований метод оптимізації дозволяє отримати нерегулярні коди з малою щільністю перевірок на парність, що забезпечують енергетичний вигравш від кодування близько 0,5 дБ у порівнянні з регулярними кодами такої ж довжини при коефіцієнті помилок 10^{-3} . При цьому у отриманих кодах відсутній ефект «error floor» на відміну від існуючих випадкових нерегулярних кодів.

4. Запропоновані методи дозволяють підвищити ефективність декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. Біоінспірований метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність дозволяє забезпечити меншу ймовірність помилки декодування у порівнянні з існуючим методом декодування на основі градієнтного спуску, наприклад, для регулярного (1008, 504) коду при відношенні сигнал-шум 6 дБ ймовірність помилки

декодування становить 10^{-7} (зменшується на порядок), але для нерегулярного коду з такими ж параметрами ефективність декодування знижується. Запропонований комбінований метод декодування даних кодів дозволяє підвищити достовірність передачі інформації в порівнянні зі стандартним методом декодування на основі розповсюдження довіри, зокрема, при відношенні сигнал/шум 2 дБ для (504, 252) коду виграш становить більше одного порядку, але при зростанні довжини коду виграш знижується. Запропонований метод оптимізації коефіцієнтів нормалізації при декодуванні мінімальної суми забезпечує виграш за обчислювальною складністю близько 30% у порівнянні з методом диференційної еволюції, що дозволяє застосувати даний підхід до більш довгих кодів за рахунок прискорення визначення покращених коефіцієнтів нормалізації.

5. Запропоновані біоінспіровані методи декодування алгебраїчних згорткових кодових конструкцій дозволяють підвищити ефективність від кодування для каналу з адитивним білим гауссовим шумом (АБГШ) на 2-3 дБ та для каналу Релея порядку 6 дБ при коефіцієнті помилок 10^{-4} у порівнянні з існуючими алгебраїчними методами декодування.

6. Запропонований біоінспірований метод оптимізації кодів Лабі забезпечує більш швидке знаходження покращених розподілів степенів кодових вершин відповідних графів Таннера у порівнянні з існуючими методами. При цьому характеристики даних кодів (надмірність, частота відмов, імовірність відмови, обчислювальна складність кодування (декодування) тощо) залишаються на прийнятному з практичної точки зору рівні. Наприклад, погіршення надмірності для кодів Лабі із заданим числом інформаційних символів у порівнянні з відомим розподілом не перевищує 3%, а при багатокритеріальній оптимізації коду Лабі з довжиною інформаційних символів 100 досягнення близьких до оптимальних значень обраних параметрів коду потребує на 50 ітерацій менше у порівнянні з існуючим методом оптимізації.

Отримані в роботі результати знайшли практичне впровадження та використання:

- у ТОВ «НВП «САТЕП» при дослідженні підходів до підвищення достовірності передачі інформації у системах керування та контролю залізничного транспорту, що побудовані на базі провідних та безпроводних телекомунікаційних технологій;

- при здійсненні професійної, науково-технічної та дослідницько-інноваційної діяльності щодо побудови та впровадження систем керування та оперативно-технологічного зв'язку залізничного транспорту у ТОВ НВП «СТАЛЬЕНЕРГО»;

- у навчальному процесі кафедри транспортного зв'язку та Інституту перепідготовки та підвищення кваліфікації кадрів Українського державного університету залізничного транспорту.

Особистий внесок здобувача. Всі результати, викладені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно. У роботах, виконаних у співавторстві і опублікованих у наукових фахових виданнях України та виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз, особистий внесок автора полягає у наступному: у [1] запропоновано наукове обґрунтування аналітичного виразу для модифікації узагальненого породжувального багаточлену алгебраїчних згорткових кодів; у [2] досліджено процес розподілу згрупованої помилки на незалежні складові при декодуванні алгебраїчних згорткових кодів перемешування; у [3] досліджено властивості завадостійких кодів, що виправляють згруповані помилки; у [4] досліджено особливості формування обмежених кодових слів алгебраїчних згорткових кодів перемешування, заданих породжувальним багаточленом коду Ріда-Соломона; у [8] досліджено принцип розділення кодової послідовності деякого алгебраїчного згорткового коду перемешування на окремі складові; у [9] запропоновано підхід до формування кодових слів несистематичних алгебраїчних згорткових кодів перемешування з довільною швидкістю кодування; у [10] розроблено математичну модель системи передачі інформації для оцінки ефективності алгебраїчних згорткових кодів перемешування; у [11] досліджено характеристики моделей каналів зв'язку шляхом математичного моделювання; у [12] досліджено особливості класичних розподілів ймовірностей при формуванні

кодових символів коду Лабі; у [13] запропоновано основні етапи методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі модифікованого правила кореляційного декодування; у [14] розроблено програмну реалізацію методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність, заснованому на процедурі летучих мишей, та досліджено його характеристики; у [15] науково обґрунтовано вибір цільової функції при м'якому декодуванні лінійних блокових кодів та запропоновано основні етапи відповідного методу декодування; у [16] досліджено особливості реалізації основних етапів методу м'якого декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі розповсюдження довіри; у [28] розроблено алгоритм біоінспірованого м'якого декодування лінійних блокових кодів на основі породжувальної матриці.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертації доповідалися та були схвалені на наступних наукових конференціях: науково-практичні конференції «Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку» (Харків, 2012–2014, 2016, 2017); 67-ма науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (Одеса, 2012); 75-та Міжнародна науково-технічна конференція кафедр академії, інженерно-технічних працівників залізниць, підприємств та організацій України та інших країн (Харків, 2013); 26-та Міжнародна науково-практична конференція «Внедрение перспективных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и средств телекоммуникаций на базе цифровизации» (Алушта, 2013); XLIII науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки» (Київ, 2013); 76-та, 77-ма, 78-ма, 79-та Міжнародні науково-технічні конференції «Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті» (Харків, 2014–2017); 27-ма, 28-ма, 29-та, 30-та Міжнародні науково-практичні конференції «Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті» (Алушта, Харків, 2014–2017); XLIV науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів «Сучасні проблеми залізничного транспорту» (Київ, 2014); IX, X Міжнародні науково-практичні

конференції «Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті» (Київ, Одеса, 2014, 2015); Міжнародні науково-практичні конференції молодих учених і студентів «Політ. Сучасні проблеми науки» (Київ, 2015, 2016); I, II Міжнародні науково-технічні конференції «Актуальні проблеми розвитку науки і техніки» (Київ, 2015); Міжнародна науково-технічна конференція «Современные информационно-телекоммуникационные технологии» (Київ, 2015); Міжрегіональні науково-практичні конференції молодих учених «ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерно-інтегровані технології (Красноармійськ, Покровськ, 2015, 2016); XXI Міжнародна науково-технічна конференція «Современные средства связи» (Мінськ, 2016); Міжнародна науково-практична конференція «Прикладні науково-технічні дослідження» (Івано-Франківськ, 2017); восьма та дев'ята Міжнародні науково-технічні конференції «Проблеми інформатизації» (Київ, Полтава, Катовице, Париж, Вільнюс, Харків, Мінськ, 2017).

Публікації. Результати дисертаційної роботи опубліковані у 60 наукових працях (з них 32 одноосібні), у тому числі у 28 наукових статтях у наукових фахових виданнях України та виданнях України, що входять до наукометричних баз, (з них 14 без співавторів, 1 у електронному виданні), у 32 тезах доповідей та матеріалах наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновку та додатків. Повний обсяг дисертації складає 361 сторінку, у тому числі 288 сторінок основного тексту, 87 рисунків, 2 таблиці, список використаних джерел з 210 найменувань на 23 сторінках, 2 додатки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ільченко М. Ю., Кравчук С. О. Сучасні телекомунікаційні системи. К.: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України». 2008. 328 с.
2. Воробієнко П.П., Нікітюк Л. А., Резніченко П. І. Телекомунікаційні та інформаційні мережі: підручник. К: САММІЕ – Книга, 2010. 708с.
3. Вишне夫斯基 В. М., Портной С. Л., Шахнович И. В. Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G. М.: Техносфера, 2009. 472 с.
4. Климаш М. М., Бугиль Б. А. Узагальнений метод оптимізації структур телекомунікаційної мережі за критерієм ефективності розподілу її ресурсів. *Системи обробки інформації*. 2013. № 7 (114). С. 72–78.
5. Dahlman E., Parkvall S., Skold J. 4G, LTE-advanced Pro and the road to 5G: third edition. Academic Press, 2016. 616 p.
6. Starr T., Sorbara M., Cioffi J. M., Silverman P.J. DSL advances. Prentice Hall, 2003. 561 p.
7. Pratt T., Bostian C.W., Allnutt J. E. Satellite communications: 2nd edition. Wiley, 2006. 560 p.
8. Klymash M. M., Lavriv O. A., Kahalo I. O., Koval B. V., Maksymyuk T. A. Improvement of Radio Interface Settings of LTE/HSOPA. *Computer Technologies of Printing*. 2011. No. 26. P. 130–137.
9. Климаш М. М., Лунтовський А. О., Романчук В. І. Сучасні перетворення в архітектурах розподілених систем: монографія. Львів: Коло, 2015. 328 с.
10. Klymash M., Lavriv O., Maksymyuk T., Beshley M. State of the art and further development of information and communication systems. *2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*. 2016. P. 1–6.
11. Бондаренко О. В., Костик Б. Я., Степанов Д. М., Левенберг Е. В. Эксплуатационные показатели качества работы транспортной телекоммуникационной первичной сети Украины. *Научно-технический журнал «Технология и конструирование в электронной аппаратуре»*. 2013. Вып. 6.

С. 37–40.

12. Бондаренко О. В., Костік Б. Я., Кіфороук С. В., Степанов Д. М., Слободянюк І. А. Кількісні показники надійності волоконно-оптичних ліній зв'язку в різних кліматичних умовах. *Наукові праці ОНАЗ ім. О.С. Попова*. 2014. №2, Ч.1. С. 36–43.

13. Олифер В. Г., Олифер Н. А. Компьютерные сети. Принципы, технологии, протоколы: учебник для ВУЗов. 4-е изд. СПб.: Питер, 2010. 944 с.

14. Klymash M., Lavriv O., Buhyl B., Danik Y. Service quality oriented method of multiservice telecommunication networks design. *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science* (Lviv-Slavske, 2012). Lviv-Slavske. P. 235–236.

15. Kythe Dave K., Kythe Prem. K. Algebraic and stochastic coding theory. Boca Raton, London, New York: CRC Press, 2012. 506 p.

16. Штомпель Н. А. Тенденции развития методов помехоустойчивого кодирования информации в телекоммуникациях. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2017. № 1. С. 35–37.

17. Штомпель М. А. Развитие методов завадостійкого кодування у волоконно-оптичних телекомунікаційних системах. *75-та міжнародна науково-технічна конференція кафедр академії, інженерно-технічних працівників залізниць, підприємств та організацій України та інших країн: тези доповідей* (м. Харків, 24–25 квітня 2013 р.). *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2013. № 136. С. 275.

18. Штомпель М. А. Напрями розвитку завадостійкого кодування у телекомунікаціях. *Прикладні науково-технічні дослідження: матеріали Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Івано-Франківськ, 5–7 квітня 2017 р.). Івано-Франківськ, 2017. С. 109.

19. Kumar Vijay P., Win Moe Z., Lu Hsiao-Feng, Georghiadis Costas N. Error-control coding techniques and applications. *Optical fiber telecommunication IV B: Systems and impairments* / edited by Ivan P. Kaminow, Tingye Li. Elsevier Science, 2002. P. 902-964.

20. Djordjevic I. B., Arabaci M., Minkov L. L. Next generation FEC for high-capacity communication in optical transport networks. *Journal of Light-wave Technology*. 2009. vol. 27, № 16. P. 3518-3530.
21. Колесник В. Д. Кодирование при передаче и хранении информации (Алгебраическая теория блоковых кодов): учеб. пособие для вузов. М.: Высш. шк., 2009. 550 с.
22. Blahut R. E. Algebraic codes for data transmission. New York: Cambridge University press, 2003. 482 p.
23. Blahut R. E. Algebraic codes on lines, planes and curves. New York: Cambridge University press, 2008. 543 p.
24. Ryan W., Lin S. Channel codes: classical and modern. New York: Cambridge University Press, 2009. 692 p.
25. Sweeney P. Error control coding: from theory to practice. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2002. 242 p.
26. Морелос-Сарагоса Р. Искусство помехоустойчивого кодирования. Методы, алгоритмы, применение; пер. с англ. В. Б. Афанасьева. М.: Техносфера, 2005. 319 с.
27. Золотарёв В. В., Овечкин Г.В. Помехоустойчивое кодирование. Методы и алгоритмы: справочник / под. ред. чл.-кор. РАН Ю. Б. Зубарева. М.: Горячая линия - Телеком, 2004. 126 с.
28. Kabatiansky G., Krouk E., Semenov S. Error correcting coding and security for data networks: Analysis of the superchannel concept. Chichester: John Wiley & Sons, Ltd., 2005. 278 p.
29. Jiang Y. A practical guide to error-control coding using MATLAB. Artech house, 2010. 293 p.
30. Divsalar D., Benedetto S., Pollara F., Montorsi G. Turbo codes: Principles and applications. *Lecture Notes*. October 1997. P. 42–51.
31. Moon Todd K. Error correction coding: mathematical methods and algorithms. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2005. 804 p.
32. Козелков С. В., Пашков Д. П., Коробчинський М. В. Шляхи підвищення

завадостійкості в радіомережі передачі інформації. *Системи озброєння і військова техніка*. 2005. № 2 (2). С. 32–34.

33. Толубко В. Б., Беркман Л. Н., Козелков С. В., Дищук А. С. Метод синтезу систем з постійними параметрами, інваріантних до адитивних завад. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2016. №3. С. 5–13.

34. Козелков С. В., Пашков Д. П., Коробчинський М. В. Шляхи підвищення завадостійкості в радіомережі передачі інформації. *Системи озброєння і військова техніка*. 2005. № 2 (2). С. 32–34.

35. Климаш М. М., Горбатий І. В. Теоретичні дослідження ймовірності помилки в телекомунікаційних системах та мережах при використанні фазової або амплітудно-фазової модуляції сигналу. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. №1. С. 23–30.

36. Захарченко Н. В., Корчинський В. В., Радзимовський Б. К. Метод формування сигнальних конструкцій на основі хаотических и таймерних сигналів в системах передачі конфіденціальної інформації. *Зб. наук. праць ОНАЗ*. 2011. № 2. С. 3–7.

37. О целесообразности исправления части ошибок в системах с РОС при использовании избыточных таймерных сигнальных конструкций. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація*. 2007. Вип. 12 (118). С. 36–42.

38. Корчинський В. В., Кільдишев В. Й., Хомич С. В., Белова Ю. В. Ефективність j -кратного повторення надлишкових таймерних сигнальних конструкцій. *Вестник НТУ «ХПИ»*. 2012. Вип. 26. С. 36–38.

39. Корчинський В. В., Казакова Н. Ф., Тринтіна Н. А. Аналіз статистики помилок в системах передачі даних зі змінними параметрами. *Наукові праці ОНАЗ*. 2002. № 1. С. 85–94.

40. Arıkan E. Channel polarization: a method for constructing capacity-achieving codes for symmetric binary-input memoryless channels. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2009. Vol. 55, No. 7. July. P. 3051-3073.

41. Moreira J. C., Farrell P. G. Essentials of error-control coding. Chichester:

John Wiley & Sons, Ltd., 2006. 361 p.

42. Johannesson R., Zigangirov K. Sh. Fundamentals of convolutional coding. New Jersey: IEEE Press, Inc, 1999. 428 p.

43. Hagenauer J., Offer E., Papke L. Iterative decoding of binary block and convolutional codes. *IEEE Transactions On Information Theory*. 1996. Vol. 42. P. 429–445.

44. Прокис Дж. Цифровая связь; пер. с англ. Д. Д. Кловский, Б. И. Николаев / под ред. Д. Д. Кловского. М: Радио и связь, 2000. 800 с.

45. Вернер М. Основы кодирования: учебник для ВУЗов; пер. с нем. Д. К. Зигангиров. М.: Техносфера, 2004. 288 с.

46. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение; пер. с англ. Е. Г. Гроза, В. В. Марченко, А. В. Назаренко, О. М. Ядренко / под. ред. А. В. Назаренко. М.: Издат. дом «Вильямс», 2003. 1104 с.

47. Кудряшов Б. Д. Теория информации: учебник для вузов. СПб.: Питер, 2009. 320 с.

48. Козелков С. В., Столбов В. Ф. Модели квитирования и сигнальнокодовых конструкций в многоспутниковых сетевых потоках передачи информации. *Системи обробки інформації*. 2001. № 6 (16). С. 261–263.

49. Козелков С. В., Столбов В. Ф. Модели квитирования и сигнальнокодовых конструкций в многоспутниковых сетевых потоках передачи информации. *Системи обробки інформації*. 2001. № 6 (16). С. 261–263.

50. Chung S. Y., Forney G. David, Richardson T. J., Urbanke R. On the design of low-density parity-check codes within 0.0045 dB of the Shannon limit. *IEEE Communications Letters*. 2001. Vol. 5, No. 2. P. 58-60.

51. Kou Y., Lin S., Fossorier M. P. C. Low-density parity-check codes based on finite geometries: a rediscovery and new results. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2001. Vol. 47, No. 7. P. 2711-2736.

52. Davey M. C., MacKay D. J. C. Low density parity check codes over GF(q). *1998 Information Theory Workshop* (Killarney, Ireland, 1998). 1998. P. 70-71.

53. Штомпель Н. А. Методы мягкого декодирования кодов с малой

плотностью проверок на четность. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»*. 2013. № 27 (1000). С. 163–168.

54. Штомпель Н. А. Оценка вычислительной сложности методов кодирования кодами с малой плотностью проверок на четность. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2013. Вип. 4 (101). С. 69–71.

55. Штомпель Н. А. Вычислительная сложность методов декодирования кодов с малой плотностью проверок на четность. *Системи обробки інформації*. 2013. Вип. 6 (113). С. 177–180.

56. Приходько С. І., Штомпель М. А. Методи ітеративного декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 3 (118). С. 11–14.

57. Luby M. LT codes. *IEEE Computer Society: Proceedings of the 43rd Symposium on Foundations of Computer Science*. 2002. P. 271–280.

58. MacKay D. J. C. Fountain codes. *IEEE Proceedings Communications*. 2005. vol. 152, № 6. P. 1062-1068.

59. Shokrollahi A. Raptor codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2006. vol. 52, № 6. P. 2551-2567.

60. Варгаузин В. Помехоустойчивое кодирование в пакетных сетях. *ТелеМультиМедиа*. 2005. №3. С. 10–16.

61. Шинкаренко К. В., Кориков А. М. Помехоустойчивое кодирование мультимедиа данных в компьютерных сетях. *Известия Томского политехнического университета*. 2008. Т. 313, №5. С. 37–41.

62. Штомпель М. А. Біоінспіровані методи оптимізації новітніх завадостійких кодів. *Проблеми інформатизації: тези доповідей дев'ятої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, м. Полтава, м. Катовице, м. Париж, м. Вільнюс, м. Харків, м. Мінськ, 12–13 грудня 2017 р.)*. Київ, 2017. С. 44.

63. Федоренко С. В. Сложность декодирования линейных блочных кодов. *Проблемы передачи информации*. 1993. Т.29, №4. С. 18-23.

64. Федоренко С.В. Метод вычисления дискретного преобразования Фурье над конечным полем. *Проблемы передачи информации*. 2006. Т. 42, № 2. С. 81-93.

65. Costa E. , Fedorenko S. V., Trifonov P. V. On computing the syndrome polynomial in Reed-Solomon decoder. *European transactions on telecommunications*. 2004. Vol. 15, № 4. P. 337-342.
66. Fedorenko S. V., Trifonov P. V. Finding roots of polynomials over finite fields. *IEEE Transactions on Communications*. 2002. Vol. 50, № 11. P. 1709-1711.
67. Федоренко С. В. Методы быстрого декодирования линейных блочных кодов: монография. СПб.: ГУАП, 2008. 199 с.
68. Choomchuay S. Fast transform techniques for RS codes. *Ladkrabang Engineering Journal*. 1995. V. 12, № 1. P. 32–41.
69. Алгебраические сверточные коды: учебное пособие / Н. И. Данько, С. П. Евсеев, А. А. Кузнецов и др. Харьков: УкрГАЗТ, 2007. 238 с.
70. Приходько С. И., Штомпель Н. А. Фурье-преобразование сверточных кодов. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2008. №4. С. 66–68.
71. Штомпель М. А. Метод алгебраїчного декодування згорткових кодів у частотній області. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2008. Вип. 98. С. 104–111.
72. Приходько С. И., Штомпель Н. А., Бушримас А. В. Метод блокового частотного декодирования сверточных кодов. *Системи обробки інформації*. 2008. Вип. 7 (74). С. 109–111.
73. Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод сверточного кодирования на основе быстрых алгоритмов. *Радиотехника: всеукр. межвед. науч.-техн. сб.* – 2009. Вып. 159. С. 283–287.
74. Штомпель М. А. Згорткове кодування з використанням ШПФ Винограда. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2010. Вип. 114. С. 46–49.
75. Штомпель М. А. Обчислювальна складність методу частотного декодування згорткових кодів. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту*. 2010. Вип. 116. С. 106–110.
76. Приходько С. И. Алгебраическое представление сверточных кодов.

Вестник международного славянского университета. 1998. Вып. 3. С.72-75.

77. Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод алгебраического декодирования сверточных кодов в частотной области. *Проблеми інформатики та моделювання: матеріали дев'ятої Міжнародної науково-технічної конференції.* Харків, 2009. С. 48.

78. Приходько С. И. Алгебраические сверточные коды. *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте.* 1999. №2(17). С. 62-63.

79. Приходько С. И., Гусев С. А., Кужель И. Е. Алгебраическое построение несистематических сверточных кодов. *Системи обробки інформації.* 2004. Вып. 8(36). С. 170-175.

80. Приходько С. И., Гусев С. А., Кужель И. Е. Алгебраический метод сверточного кодирования. *Комп'ютерні системи та інформаційні технології.* 2005. №1. С.35-43.

81. Тимочко А. И., Приходько С. И., Постольный А. С. Алгебраический метод построения сверточных кодов в систематическом виде. *Східно-Європейський журнал передових технологій.* 2005. № 2/2 (14). С. 118-123.

82. Тимочко А. И., Приходько С. И., Постольный А. С. Алгебраический метод построения рекурсивных сверточных кодов для стандартов космической связи. *Авиационно-космическая техника и технология.* 2005. №1 (17). С. 78-86.

83. Тимочко А. И., Приходько С. И., Постольный А. С. Алгебраические рекурсивные сверточные коды и схемы турбокодирования. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2005. №1-2. С. 59-65.

84. Приходько С. И., Гусев С. А., Постольный А. С., Жученко А. С. Алгебраическое декодирование сверточных кодов. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2005. №6. С. 29-37.

85. Приходько С. И., Гусев С. А., Постольный А. С., Жученко А. С. Комбинированный метод декодирования алгебраических сверточных кодов. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2006. №2 (58). С. 8-15.

86. Приходько С. И. Оценка нижней границы свободного кодового

расстояния алгебраически заданных сверточных кодов. *Системы обработки інформації*. 2007. Вып. 5(65). С. 120–124.

87. Приходько С. И. Метод декодирования алгебраических сверточных кодов. *Системы обработки інформації*. 2008. Вып. 2(69). С. 93–96.

88. Feldman J., Wainwright M. J., Karger D. R. Using linear programming to decode binary linear codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2005. vol. 51, № 3. P. 954-972.

89. Wadayama T., Nakamura K., Yagita M., Funahashi Y., Usami S., Takumi I. Gradient descent bit flipping algorithms for decoding LDPC codes. *Proceedings of the International Symposium on Information Theory and its Applications (ISITA '08) (December, 2008)*. 2008. P. 1-6.

90. Рассомахин С. Г. Линейное целочисленное декодирование псевдослучайных кодов на основе метода отсечений Гомори. *Системы обработки інформації*. 2011. Вып. 5. С. 93–98.

91. Wadayama T., Nakamura K., Yagita M., Funahashi Y., Usami S., Takumi I. Gradient descent bit flipping algorithms for decoding LDPC codes. *IEEE Transactions on Communications*. 2010. Vol. 58, № 6. June. P. 1610–1614.

92. Cardoso F. A. C. M., Arantes D. S. Genetic decoding of linear block codes. *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Washington, DC, USA, 1999)*. Vol. 3. 1999. P. 2302-2309.

93. Maini H., Mehrotra K., Mohan C., Ranka S. Genetic algorithms for soft-decision decoding of linear block codes. *Evolutionary Computation*. 1994. Vol. 2, № 2. P. 145-164.

94. Azouaoui A., Belkasmi M. A new genetic decoding of linear block codes. *2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems (Tangier, 2012)*. 2012. P. 1176-1182.

95. Chana I., Allouch H., Belkasmi M. An efficient new soft-decision decoding algorithm for binary cyclic codes. *2011 International Conference on Multimedia Computing and Systems (Ouarzazate, 2011)*. 2011. P. 1-6.

96. Рассомахин С. Г., Лавровская Т. В. Математические модели случайных

и псевдослучайных кодов. *Системи обробки інформації*. 2016. № 9 (146). С. 55–61.

97. Рассомахин С. Г. Технология псевдослучайного кодирования в сетевых коммуникационных протоколах канального уровня. *Системи обробки інформації*. 2012. № 3 (101). С. 206–211.

98. Richardson T. J., Shokrollahi M. A., Urbanke R. L. Design of capacity-approaching irregular low-density parity check codes. *IEEE Transaction on Information Theory*. 2001. vol. 47, №2. February. P. 599-618.

99. Hou Jilei, Siegel P. H., Milstein L. B. Performance analysis and code optimization of low density parity-check codes on Rayleigh fading channels. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2001. Vol. 19, No. 5, May. P. 924-934.

100. Durand N., Alliot J., Bartolome B. Turbo codes optimization using genetic algorithms. *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99* (Washington, DC, USA, 1999). Vol. 2. 1999. P. 816-822.

101. Hebbes L., Malyan R. R., Lenaghan A. P. Genetic algorithms for turbo codes. *EUROCON 2005 - The International Conference on "Computer as a Tool"* (Belgrade, 2005). 2005. P. 478-481.

102. Chen C. M., Chen Y. P., Shen T. C., Zao, J. K. On the optimization of degree distributions in LT code with covariance matrix adaptation evolution strategy. *IEEE Congress on Evolutionary Computation*. 2010. July. P. 1–8.

103. Zao J. K., Hornansky M., Diao P. Design of optimal short-length LT codes using evolution strategies. *IEEE Congress on Evolutionary Computation* (10–15 June, 2012), Brisbane, QLD. 2012. P. 1–9.

104. Chen C. M., Chen Y. P., Shen T. C., Zao J. K. Optimizing degree distributions in LT codes by using the multiobjective evolutionary algorithm based on decomposition. *IEEE Congress on Evolutionary Computation* (Barcelona, 18–23 July, 2010). 2010. P. 1–8.

105. Belkasmi M., Berbia H., Bouanani F. E. Iterative decoding of product block codes based on the genetic algorithms. *7th International ITG Conference on Source and Channel Coding* (Ulm, Germany, 2008). 2008. P. 1-6.

106. Berbia H., Elbouanani F., Romadi R., Benazza H., Belkasmi M. Genetic

algorithm for decoding linear codes over AWGN and fading channels. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2011. Vol. 30, № 1. P. 35–41.

107. Shakeel I. GA-based soft-decision decoding of linear block codes. *Proceedings of the International Conference on Telecommunications Congress on Evolutionary Computation* (April, 2010). 2010. P. 13-17.

108. Berkani A., Belkasmi M. A reduced complexity decoder using compact genetic algorithm for linear block codes. *2016 International Conference on Advanced Communication Systems and Information Security (ACOSIS)* (Marrakesh, 2016). 2016. P. 1-6.

109. Berbia H., Elbouanani F., Belkasmi M., Romadi R. An enhanced genetic algorithm based decoder for linear codes. *2008 3rd International Conference on Information and Communication Technologies: From Theory to Applications* (Damascus, 2008). 2008. P. 1-5.

110. Berkani A., Azouaoui A., Belkasmi M., Aylaj B. Compact genetic algorithms with larger tournament size for soft-decision decoding. *2015 15th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)* (Marrakech, 2015). 2015. P. 623-628.

111. Berkani A., Azouaoui A., Belkasmi M. Soft-decision decoding by a compact genetic algorithm using higher selection pressure. *2015 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM)* (Marrakech, 2015). 2015. P. 1-6.

112. Boualame H., Tahiri N., Chana I., Azouaoui A., Belkasmi M. An efficient soft decision decoding algorithm using cyclic permutations and compact genetic algorithm. *2016 International Conference on Advanced Communication Systems and Information Security (ACOSIS)* (Marrakesh, 2016). 2016. P. 1-6.

113. Azouaoui A., Belkasmi M., Farchane A. Efficient dual domain decoding of linear block codes using genetic algorithms. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2012. Vol. 2012. P. 1-12.

114. Addi S., Berkani A., Azouaoui A., Belkasmi M. New hard decision decoder of LDPC codes using single bit flipping algorithm. *2017 International Conference on*

Wireless Networks and Mobile Communications (WINCOM) (Rabat, 2017). 2017. P. 1-5.

115. Berbia H., Belkasmi M., Elbouanani F., Ayoub F. On the decoding of convolutional codes using genetic algorithms. *2008 International Conference on Computer and Communication Engineering* (Kuala Lumpur, 2008). 2008. P. 667-671.

116. Штомпель Н. А. Оптимизация каскадных блоковых кодов на основе популяционных методов. *Актуальні проблеми розвитку науки і техніки: збірник тез I Міжнародної науково-технічної конференції* (м. Київ, 22 жовтня 2015 р.). Київ, 2015. С. 88–89.

117. Xu H. Optimization of LDPC Codes for Turbo Equalization Based on PSO-EXIT Algorithm. *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing* (Shanghai, 2007). Shanghai. 2007. P. 1398-1401.

118. Ho Chia-Lu. Particle swarm optimization applied to designing LDPC codes for wireless communications. *International Conference on Advanced Infocom Technology 2011 (ICAIT 2011)* (Wuhan, China, 2011). Wuhan. 2011. P. 1-5.

119. Azmi M. H., Yuan J., Ning J., Huynh H. Q. Improved bilayer LDPC codes using irregular check node degree distribution. *2008 IEEE International Symposium on Information Theory* (Toronto, ON, 2008). Toronto. 2008. P. 141-145.

120. Зяблов В. В., Коробков Д. Л., Портной С. Л. Высокоскоростная передача сообщений в реальных каналах. М.: Радио и связь, 1991. 288 с.

121. Штомпель Н. А. Функциональное представление линейных помехоустойчивых кодов. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2017. № 1. С. 120–122.

122. Асауленко І. О., Штомпель М. А. Дослідження характеристик телекомунікаційних систем з використанням програмних реалізацій каналів зв'язку. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. № 1. С. 34–41.

123. Farrell K., Rudolph L., Hartmann C., Nielsen L. Decoding by local optimization. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1983. Vol. 29, No. 5. September. P. 740-743.

124. Han Y. S., Hartmann C. R. P., Chen C.-C. Efficient Maximum-Likelihood Soft-Decision Decoding of Linear Block Codes Using Algorithm A". *Electrical Engineering and Computer Science Technical Reports*. 134. 1991. 50 p.
125. Jin Q., Wang P., Xu S., Yang H., Rashvand H. F. Efficient construction of irregular LDPC codes with midterm block length and nearly optimal performance. *IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2009)* (Shanghai, China, 2009). Shanghai. 2009. P. 40-43.
126. Xu Hua, Xu Cheng-qi, Zheng Xiao-chuan. Optimization of irregular LDPC codes on Rician channel. *Proceedings. 2005 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2005* (Wuhan, China, 2005). Wuhan, 2005. P. 381-383.
127. Xie F., Lin X. Design of Fountain Codes with Differential Evolution. *2010 6th International Conference on Wireless Communications Networking and Mobile Computing (WiCOM)* (Chengdu, 2010). Chengdu. 2010. P. 1-4.
128. Hornansky M., Zao J. K. Customizing short-length LT codes with evolution strategies for video streaming protection. *Journal Multimedia Tools and Applications*. 2017. Volume 76, Issue 14. July. P. 15221-15250.
129. An J., Kang Qi, Wang Lei, Wu Qidi. A turbo codes optimization method using particle swarm algorithm. *2008 IEEE International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence)* (Hong Kong, 2008). Hong Kong. 2008. P. 3814-3819.
130. Карпенко А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой: учебное пособие. Москва: издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. 446 с.
131. Griva I., Nash S.G., Sofer A. *Linear and Nonlinear Optimization*. 2 edition. New York: Society for Industrial Mathematics. 764 p.
132. Dehuri S., Jagadev A.K., Panda M. *Multi-objective Swarm Intelligence: Theoretical Advances and Applications*. Springer, 2015. 209 p.
133. Chiong R. *Nature-Inspired Algorithms for Optimisation*. New York: Springer, 2009. 523p.

134. Price Kenneth, Storn Rainer M., Lampinen Jouni A. *Differential Evolution: A Practical Approach to Global Optimization (Natural Computing Series)*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg. 2005. 539 p.
135. Kennedy J., Eberhart R. Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks* (Perth, WA, Australia, 1995) vol.4. 1995. P. 1942-1948.
136. Marichelvam M. K., Prabaharan T., Yang X. S. A discrete firefly algorithm for the multi-objective hybrid flowshop scheduling problems. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2014. Vol. 18, No. 2, April. P. 301-305.
137. Fister I., Fister I., Yang X., Fong S., Zhuang Y. Bat algorithm: recent advances. *2014 IEEE 15th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI)* (Budapest, 2014). 2014. P. 163-167.
138. He X., Li N., Yang X. Non-dominated sorting cuckoo search for multiobjective optimization. *2014 IEEE Symposium on Swarm Intelligence* (Orlando, FL, 2014). 2014. P. 1-7.
139. Ouaraab A., Ahiod B., Yang X., Abbad M. Discrete cuckoo search algorithm for job shop scheduling problem. *2014 IEEE International Symposium on Intelligent Control (ISIC)* (Juan Les Pins, 2014). 2014. P. 1872-1876.
140. Yang X., Deb S., Fong S., He X., Zhao Y. Swarm intelligence: today and tomorrow. *2016 3rd International Conference on Soft Computing & Machine Intelligence (ISCFMI)* (Dubai, 2016). 2016. P. 219-223.
141. Yang X., Deb Suash Cuckoo search via lévy flights. *2009 World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC)* (Coimbatore, 2009). 2009. P. 210-214.
142. Yang X., Deb S., Fong S., He X., Zhao Y. From swarm intelligence to metaheuristics: nature-inspired optimization algorithms. *Computer*. 2016. Vol. 49, No. 9, Sept., P. 52-59.
143. Fossorier M. P. C., Lin S. Soft-decision decoding of linear block codes based on ordered statistics. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1995. Vol. 41, № 5. September. P. 1379–1396.

144. Fossorier M. P. C., Lin S., Snyders J. Reliability-based syndrome decoding of linear block codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 1998. Vol. 44, № 1. P. 388-398.
145. Jin W., Fossorier M. P. C. Reliability-based soft-decision decoding with multiple biases. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2007. Vol. 53, № 1, January. P. 105–120.
146. Штомпель Н. А. Метод неалгебраического декодирования двоичных кодов БЧХ. *Информационно-управляющие системы на железнодорожном транспорте*: матеріали стендових доповідей та виступів учасників конференції 27 Міжнародної науково-практичної конференції (м. Алушта, вересень 2014 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: додаток. 2014. №4. С. 47.
147. Штомпель Н. А. Метод мягкого декодирования двоичных линейных блоковых кодов. *Сучасні проблеми залізничного транспорту*: тези доповідей XLIV науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, частина 1 (м. Київ, 27 листопада 2014 р.). Київ, 2014. С. 182–183.
148. Жученко А. С., Панченко С. В., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Биоинспирированные методы декодирования помехоустойчивых кодов. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: матеріали стендових доповідей та виступів учасників 30-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 26–27 жовтня 2017 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: додаток. 2017. Вип. 4. С. 3–4.
149. Жученко А. С., Панченко Н. Г., Панченко С. В., Штомпель Н.А. Метод декодирования линейных блоковых кодов на основе популяционных процедур поисковой оптимизации. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 2 (117). С. 25–29.
150. Штомпель Н. А. Адаптивный метод мягкого декодирования блоковых кодов. *Залізничний транспорт: сучасні проблеми науки*: тези доповідей XLIII науково-практичної конференції молодих учених, аспірантів і студентів, частина 1 (м. Київ, 12 грудня 2013 р.). Київ, 2013. С. 178–179.

151. Приходько С. И., Штомпель Н. А. Декодирование двоичных блоковых кодов на основе методов стохастической оптимизации. *Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті*: матеріали X ювілейної Міжнародної науково-практичної конференції (м. Одеса, 30 червня–1 липня 2015 р.). Київ, 2015. С. 126.
152. Жученко А. С., Штомпель Н. А. Метод декодирования блоковых кодов на основе процедур природных вычислений. *Актуальні проблеми розвитку науки і техніки*: збірник тез II Міжнародної науково-технічної конференції (м. Київ, 20 грудня 2015 р.). Київ, 2015. С. 7.
153. Штомпель Н. А. Декодирование блоковых кодов на основе биоинспирированных процедур оптимизации. *Современные средства связи*: материалы XXI Международной научно-технической конференции (г. Минск, Республика Беларусь, 20–21 октября 2016 года). Минск, 2016. С. 17–18.
154. Жученко О. С., Приходько С. И., Штомпель М. А. Біоінспірований метод м'якого декодування лінійних блокових кодів. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті*: тези доповідей 79-ої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 25–27 квітня 2017 р.). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*: додаток. 2017. № 169. С. 14–16.
155. Жученко О. С., Приходько С. И., Штомпель М. А. Особливості програмної реалізації біоінспірованого методу м'якого декодування лінійних блокових кодів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. Вип. 2 (123). С. 26–30.
156. Штомпель Н. А. Мягкое декодирование высокоскоростных блоковых кодов на основе популяционных процедур поисковой оптимизации. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 4 (119). С. 15–19.
157. Штомпель М. А. Принципи програмної реалізації біоінспірованого методу декодування високошвидкісних лінійних блокових кодів. *Системи обробки інформації*. 2017. № 3. С. 72–75.
158. MacKay D. J. C. Good error correcting codes based on very sparse matrices.

IEEE Transaction on Information Theory. 1999. vol. 45, №2. March. P. 399-432.

159. MacKay D. J. C., Wilson S. T., Davey M. C. Comparison of constructions of irregular Gallager codes. *IEEE Transactions on Communications*. 1999. Vol. 47, No. 10, Oct. P. 1449-1454.

160. Richardson T. J., Urbanke R. L. The capacity of low-density parity-check codes under message-passing decoding. *IEEE transactions on information theory*. 2001. Vol. 47, № 2, February. P. 599–618.

161. Hu X. Y., Eleftheriou E., Arnold D. M. Regular and irregular progressive edge-growth Tanner graphs. *IEEE transactions on information theory*. 2005. Vol. 51, № 1, January. P. 386–398.

162. Штомпель Н. А. Методы построения проверочных матриц кодов с малой плотностью проверок на четность. *Внедрение перспективных микропроцессорных систем железнодорожной автоматики и средств телекоммуникаций на базе цифровизации: материалы стендовых доповідей та виступів учасників 26-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Алушта, 23–28 вересня 2013 р.)*. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті. 2013. Вип. 4 (101). С. 65–66.

163. Штомпель Н. А. Построение кодов с малой плотностью проверок на четность на основе природных вычислений. *Современные информационно-телекоммуникационные технологии: материалы Міжнародної науково-технічної конференції, том III. Розвиток інформаційних технологій (м. Київ, 17–20 листопада 2015 р.)*. Київ, 2015. С. 53–54.

164. Жученко А. С., Панченко С. В., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Биоинспирированный подход к построению кодов с малой плотностью проверок на четность. *Информационно-керуючі системи на залізничному транспорті: матеріали стендовых доповідей та виступів учасників 29-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 27–29 вересня 2016 р.)*. Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: додаток. 2016. Вип. 4 (119). С. 5–6.

165. Штомпель Н. А. Метод оптимизации нерегулярных кодов с малой плотностью проверок на четность. *Політ. Сучасні проблеми науки: тези доповідей*

XV Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених і студентів (м. Київ, 8–9 квітня 2015 р.). Київ, 2015. – С. 34.

166. Штомпель Н. А. Оптимизация нерегулярных кодов с малой плотностью проверок на четность на основе природных вычислений. *Радиотехника: всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* 2016. Вип. 186. С. 207–210.

167. Haley D., Grant A., Buetefer J. Iterative encoding of low-density parity-check codes. *IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM): Proceedings.* November, 2002, vol. 2. 2002. P. 1289-1293.

168. Штомпель М. А. Методи кодування кодами з малою щільністю перевірок на парність. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: тези доповідей 76-ої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, квітень 2014 р.). Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту.* 2014. № 143. С. 226.

169. Zhang J., Fossorier M. P. C. A modified weighted bit-flipping decoding of low-density parity-check codes. *IEEE Communications Letters.* 2004. Vol. 8, No. 3. P. 165-167.

170. Fossorier M., Mihaljevic M., Imai H. Reduced complexity iterative decoding of low-density parity check codes based on belief propagation. *IEEE transactions on information theory.* 1999. Vol. 47, № 5, May. P. 673–680.

171. Асауленко И. А. Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод итеративного декодирования линейных блоковых кодов на основе стохастической оптимизации. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: матеріали стендових доповідей та виступів учасників 28-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 24–25 вересня 2015 р.). Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: додаток.* 2015. Вип. 4 (113). С. 27–28.

172. Асауленко І. О., Приходько С. І., Штомпель М. А. Метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі популяційних процедур пошукової оптимізації. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: збірник тез доповідей науково-практичної конференції (м. Харків, 17–18 березня 2016 р.).* Харків, 2016. С. 41–42.

173. Асауленко І. О., Приходько С. І., Штомпель М. А. Метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі стохастичної оптимізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. Вип. 5 (114). С. 61–65.
174. Асауленко І. О., Жученко О. С., Приходько С. І., Штомпель М. А. Дослідження характеристик методу декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі стохастичної оптимізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 1 (116). С. 33–40.
175. Штомпель М. А. Субоптимальний метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: тези доповідей 77-ої Міжнародної науково-технічної конференції (м. Харків, 21 – 23 квітня 2015 р.)*. Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту. 2015. № 151 (1). С. 48.
176. Асауленко І. О., Штомпель М. А. Декодування кодів з малою щільністю перевірок на парність на основі природних обчислень. *«ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерного-інтегровані технології: збірка доповідей Міжрегіональної науково-практичної конференції молодих учених (м. Красноармійськ, 16–17 листопада 2015 р.)*. Красноармійськ, 2015. С. 9–11.
177. Fossorier M. P. C. Iterative reliability-based decoding of low-density parity check codes. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2001. Vol. 19, № 5. May. P. 908–917.
178. Штомпель Н. А. Метод комбінированного декодування кодів з малою щільністю перевірок на четність. *Проблеми телекомунікацій*. 2016. № 2 (19). С. 35–43. URL: http://pt.journal.kh.ua/2016/2/1/162_shtompel_decoding.pdf.
179. Штомпель Н. А. Комбінированный метод декодування кодів з малою щільністю перевірок на четність. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: збірник тез доповідей науково-практичної конференції (м. Харків, 12 – 13 березня 2014 р.)*. Харків, 2014. С. 96–97.
180. Zhang J., Fossorier M., Gu D., Zhang J. Improved min-sum decoding of

LDPC codes using 2-dimensional normalization. *IEEE Global telecommunications conference*. Vol. 3. 2005. P. 1187–1192.

181. Штомпель Н. А. Биоинспирированный подход к оптимизации декодирования кодов с малой плотностью проверок на четность. *Радиотехніка: всеукр. міжвід. наук.-техн. зб.* 2016. Вип. 187. С. 34–37.

182. Боцул А. В., Зубенко В. А., Волков А. С., Штомпель Н. А. Свойства алгебраических сверточных кодов перемежения. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2013. Вип. 5 (102). С. 16–22.

183. Wachter-Zeh A., Zeh A., Bossert M. Decoding interleaved Reed–Solomon codes beyond their joint error–correcting capability. *Designs, Codes and Cryptography*. 24 July 2012. P. 1–21.

184. Приходько С. И., Штомпель Н. А., Боцул А. В. Анализ методов помехоустойчивого кодирования информации в каналах с памятью. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: збірник тез доповідей науково-практичної конференції Академії внутрішніх військ МВС України (м. Харків, 21-22 березня 2012 р.).* Харків, 2012. С. 55.

185. Приходько С. И., Бабаев М. М., Волков А. С., Штомпель Н. А., Боцул А. В. Метод модификации обобщенного порождающего многочлена алгебраических сверточных кодов. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2012. №6. С. 30–35.

186. Боцул А. В., Волков А. С., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод построения алгебраических сверточных кодов перемежения. *Збірник наукових праць Української державної академії залізничного транспорту.* 2013. № 136. С. 232–235.

187. Боцул А. В., Волков А. С., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод построения алгебраических несистематических сверточных кодов перемежения с произвольной скоростью кодирования. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті.* 2014. Вип. 2 (105). С. 8–11.

188. Боцул А.В., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Принципы построения алгебраических сверточных кодов перемежения. *67-ма науково-технічна*

конференція професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів: матеріали, ч. 1 (м. Одеса, 5-7 грудня 2012 р.). Одеса, 2012. С. 17–18.

189. Боцул А. В., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Особенности построения алгебраических сверточных кодов для каналов с памятью. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: тези доповідей науково-практичної конференції Академії внутрішніх військ МВС України* (м. Харків, 20–21 березня 2013 р.). Харків, 2013. С. 32–33.

190. Штомпель Н. А. Мягкое декодирование алгебраических сверточных кодов на основе природных вычислений. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 5 (120). С. 14–18.

191. Штомпель Н. А. Декодирование алгебраических сверточных кодов на основе бионических процедур. *«ТАК»: телекомунікації, автоматика, комп'ютерного-інтегровані технології: збірка доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених* (м. Покровськ, 29–30 листопада 2016 р.). Покровськ, 2016. С. 19–21.

192. Боцул А. В., Волков А. С., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Метод декодирования алгебраических сверточных кодов перемежения. *Системи обробки інформації*. 2012. Вип. 7(105). С. 172–176.

193. Боцул А. В., Волков А. С., Приходько С. И., Штомпель Н. А., Билал Хамзе Особенности метода декодирования алгебраических сверточных кодов перемежения. *Системи обробки інформації*. 2013. Вип. 2 (109). С. 146–149.

194. Волков А. С., Зубенко В. А., Приходько С. И., Штомпель Н. А. Исследование характеристик алгебраических несистематических сверточных кодов перемежения. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2014. Вип. 6 (109). С. 13–19.

195. Kothiyal A., Takeshita O. Y. A comparison of adaptive belief propagation and the best graph algorithm for the decoding of linear block codes. *Proceedings International Symposium on Information Theory* (4–9 September, 2005). 2005. P. 724–728.

196. Штомпель Н. А. Адаптивное декодирование алгебраических сверточных кодов перемещения. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 6 (121). С. 18–22.
197. Асауленко І. О., Приходько С. І., Штомпель М. А. Аналіз методів відновлення даних у телекомунікаційних мережах з комутацією пакетів. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2015. Вип. 4 (113). С. 27–38.
198. Асауленко І. О., Штомпель М. А. Аналіз підходів до підвищення вірогідності передачі даних у інформаційній інфраструктурі залізничного транспорту. *Проблеми економіки та управління на залізничному транспорті: матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції (м. Київ, 17 листопада – 14 грудня 2014 р.)*. Київ, 2014. – С. 164.
199. Bodine E. A., Cheng M. K. Characterization of Luby transform codes with small message size for low-latency decoding. *IEEE International Conference on Communications (ICC '08)*. 2008. P. 1195–1199.
200. Huytia E., Tirronen T., Virtamo J. Optimal degree distribution for LT codes with small message length. *INFOCOM 2007: Proceedings of the 26th IEEE International Conference on Computer Communications*. 2007. P. 2576–2580.
201. Huytia E., Tirronen T., Virtamo J. Optimal Degree Distribution for LT Codes with Small Message Length. *IEEE INFOCOM 2007 - 26th IEEE International Conference on Computer Communications (Barcelona, 2007)*. 2007. P. 2576–2580.
202. Tirronen T., Virtamo J. Finding fountain codes for real-time data by fixed point method. *2008 International Symposium on Information Theory and Its Applications (Auckland, 2008)*. 2008. P. 1–6.
203. Yen K., Liao Y., Chen C., Chang H. Modified Robust Soliton Distribution (MRSD) with Improved Ripple Size for LT Codes. *IEEE Communications Letters*. 2013. Vol. 17, No. 5. May. P. 976–979.
204. Штомпель Н. А. Биоинспирированный метод оптимизации кодов на основе преобразования Лаби. *Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка*. 2016.

№ 2 (23). С. 153–157.

205. Панченко Н. Г., Штомпель М. А., Жученко О. С. Оптимізація стираючих кодів без фіксованої швидкості на основі природних обчислень. *Розвиток наукової та інноваційної діяльності на транспорті: тези доповідей 78-ої Міжнародної науково-технічної конференції* (м. Харків, 26–28 квітня 2016 р.). *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*: додаток. 2016. № 160. С. 9–10.

206. Штомпель Н. А. Повышение эффективности кодов без фиксированной скорости на основе природных вычислений. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті: матеріали стендових доповідей та виступів учасників 29-ої Міжнародної науково-практичної конференції* (м. Харків, 27–29 вересня 2016 р.). *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*: додаток. 2016. Вип. 4 (119). С. 26.

207. Штомпель М. А. Метод оптимізації фонтанних кодів на основі популяційних процедур пошукової оптимізації. *Політ. Сучасні проблеми науки: тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції молодих учених і студентів* (м. Київ, 6–8 квітня 2016 р.). Київ, 2016. – С. 126.

208. Приходько С. І., Жученко О. С., Штомпель М. А. Біоінспірований метод оптимізації кодів Лабі. *Проблеми інформатизації: тези доповідей восьмої Міжнародної науково-технічної конференції* (м. Київ, 11–12 квітня 2017 р.). Київ, 2017. С. 198.

209. Штомпель Н. А. Многокритериальная оптимизация кодов Лабі на основе природных вычислений. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2017. Вип. 1 (122). С. 24–27.

210. Штомпель Н. А. Биоинспирированная многокритериальная оптимизация кодов Лабі. *Застосування інформаційних технологій у підготовці та діяльності сил охорони правопорядку: збірник тез доповідей науково-практичної конференції* (м. Харків, 15–16 березня 2017 р.). Харків, 2017. С. 76.

