

DOI 10.18372/2310-5461.58.17654

УДК 621.391

**В. В. Козловський**, д-р техн. наук, професор  
Національний авіаційний університет, Київ  
orcid.org/0000-0002-8301-5501  
e-mail: vvkzeos@gmail.com;

**М. А. Штомпель**, д-р техн. наук, професор  
Український державний університет  
залізничного транспорту, Харків  
orcid.org/0000-0003-3132-8335  
e-mail: shtompel.mykola@kart.edu.ua;

**В. П. Лисечко**, д-р техн. наук, доцент  
Український державний університет  
залізничного транспорту, Харків  
orcid.org/0000-0002-1520-9515  
e-mail: lysechko@kart.edu.ua;

**О. М. Комар**, канд. техн. наук, доцент  
Національний авіаційний університет, Київ  
orcid.org/0009-0002-2994-6556  
e-mail: oleksiikomar3@gmail.com;

**В. О. Дробик**  
Національний авіаційний університет, Київ  
orcid.org/0009-0009-3481-2449  
e-mail: v.drobyk@gmail.com

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ДЕКОДУВАННЯ БЛОКОВИХ КОДІВ НА ОСНОВІ ПРОЦЕДУРИ ДИФЕРЕНЦІЙНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ

### Вступ

Впровадження новітніх телекомунікаційних послуг передбачає перехід до технологій радіозв'язку нового покоління. В даних системах радіозв'язку для передавання службових повідомлень передбачається окремий канал зв'язку [1]. При цьому вимоги щодо достовірності передавання повідомлень у даному каналі є досить жорсткими, що вимагає застосування завадостійких кодових конструкцій. На даний момент у більшості використовуваних технологій для цього застосовуються блокові коди [2]. Ефективність застосування блокових кодів у системах радіозв'язку безпосередньо залежить від використовуваного методу декодування. М'яке декодування завадостійких кодів забезпечує високий енергетичний вигравш, але вимагає більших обчислювальних ресурсів [3].

Це обумовлює актуальність і необхідність проведення досліджень у напрямку пошуку ефективних методів м'якого декодування блокових кодів з прийнятною обчислювальною складністю.

### Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Задача м'якого декодування двійкових блокових кодів може бути вирішена з використанням таких підходів – евристичного та оптимізаційного.

Перший підхід передбачає розробку деяких евристичних процедур, що застосовуються в процесі декодування.

Наприклад, у [4] запропоновано механізм подвійного повторного кодування для обчислення кодових слів при декодуванні за алгоритмом Чейза. Проведені у роботі дослідження показали, що даний підхід є ефективним для систематичних блокових кодів спеціальної структури та отримані результати близькі до декодування за максимумом правдоподібності.

В [5] представлено модифікацію методу декодування блокових кодів на основі адаптивного розповсюдження довіри, що додає деяку кількість нестабільних елементів прийнятого слова при обробленні перевіркою матриці. Крім того у роботі запропоновано застосовувати два варіанти планування для додаткового покращення

характеристик декодування порівняно зі стандартним методом.

У [6] запропоновано метод пошуку підмножин при обчисленні синдромів, використання якого дозволяє підвищити ефективність декодування спеціального типу блокових кодів у порівнянні з алгебраїчним декодуванням.

Отже, можна зробити висновок, що даний підхід спрямований на вдосконалення існуючих методів декодування, що суттєво обмежує його можливості.

З іншого боку, при оптимізаційному підході задача м'якого декодування блокових кодів представляється у вигляді оптимізаційної задачі, для вирішення якої застосовуються існуючі процедури пошукової оптимізації.

Зокрема, у [7] розроблено метод декодування двійкових блокових кодів з використанням генетичного алгоритму для різних моделей каналу зв'язку. Показано, що ефективність та обчислювальна складність представленого методу є прийнятною та може додатково регулюватися параметрами декодера.

У [8] даний підхід отримав подальший розвиток шляхом застосування компактного генетичного алгоритму зі збільшеним розміром турніру при здійсненні м'якого декодування блокових кодів. Проведений аналіз обчислювальної складності розроблених методів декодування показав, що представлені модифікації не вносять суттєвих обмежень та значно підвищують ефективність декодування для обраних блокових кодів.

В [9] узагальнено підхід до декодування блокових кодів на основі популяційних процедур пошукової оптимізації, до яких, зокрема, входять генетичні алгоритми. У роботі наведено математичні основи та розглянуто загальні етапи декодування блокових кодів, що дозволило представити єдиний концептуальний підхід до застосування механізмів та процедур біоінспірованої оптимізації в даному напрямку.

Проте в представлених роботах не розглядається можливість застосування для декодування блокових кодів інших ефективних оптимізаційних процедур, зокрема, процедури диференційної еволюції, тому цьому питанню присвячена дана робота.

### **Мета і задачі дослідження**

Метою дослідження є вдосконалення і розробка методу декодування блокових кодів з використанням процедури диференційної еволюції.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

– проаналізовані процедури еволюційної оптимізації та визначено особливості їх реалізації та обмеження;

– запропонована та обґрунтована схема методу м'якого декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції;

– розроблено алгоритм м'якого декодування блокових кодів, заснований на диференційній еволюції.

### **Результати дослідження методу декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції**

#### **Аналіз процедур еволюційної оптимізації**

Двома основними процедурами еволюційної оптимізації є генетичні алгоритми та диференційна еволюція.

Головна ідея генетичних алгоритмів полягає у відтворенні принципів природньої селекції та правила виживання найбільш пристосованих особин. При оптимізації рішення представляються хромосомами. Процедура оптимізації передбачає генерування початкової популяції хромосом та її оновлення шляхом застосування операторів селекції, кросоверу та мутації. Обчислення якості та ранжування хромосом здійснюється ітеративно за обраною фітнес-функцією. Після досягнення заданого критерію (наприклад, кількості ітерацій) визначається найкраща хромосома, що відповідає знайденому рішення.

При диференційній еволюції для представлення можливих рішень застосовуються вектори. За даною оптимізаційною процедурою спочатку формується популяція векторів та обчислюється якість початкових рішень на основі фітнес-функції. Після цього обирається цільовий вектор та відповідно нього генерується пробний вектор з використанням операторів мутації та кросоверу. Селекція вектору для наступної популяції здійснюється шляхом оцінювання якості цільового та пробного векторів. Даний процес виконується ітеративно та завершується формуванням найкращого вектору, який обирається у якості знайденого рішення [10].

Результати порівняльного аналізу даних процедур представлено у таблиці 1.

З аналізу даних у таблиці 1 випливає, що процедура диференційної еволюції має ряд переваг у порівнянні з генетичними алгоритмами, що обумовлює доцільність її застосування в якості пошукового механізму при декодуванні блокових кодів.

Таблиця 1

## Порівняльний аналіз процедур еволюційної оптимізації

Показник ефективності	Генетичні алгоритми	Диференційна еволюція
Необхідність ранжування рішень	так	ні
Вплив розміру популяції на тривалість обчислень	експоненційний	лінійний
Вплив найкращого рішення на популяцію	середній	низький
Погіршення середнього значення фітнес-функції	ні	так
Тенденція передчасної конвергенції	середня	низька
Щільність простору пошуку	менше	більше
Знаходження кращого рішення без локального пошуку	менше	більше
Розмір популяції	високий	низький
Швидкість конвергенції	менше	більше
Точність отриманих рішень	менше	більше
Обчислювальна складність	висока	середня

### Схема декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції

У [9] представлено формалізований підхід до м'якого декодування блокових кодів на основі математичного апарату стохастичної пошукової оптимізації. Показано, що задачу декодування заданого блокового коду доцільно представити у вигляді оптимізаційної задачі з відповідними обмеженнями та цільовою функцією. На основі проведеного аналізу цільової функції визначено, що задача декодування блокового коду є задачею нелінійного програмування. З урахуванням цього була представлена концепція, що дозволяє застосовувати різні процедури пошукової оптимізації для вирішення даної оптимізаційної задачі. При цьому вибір оптимізаційної процедури здійснюється в залежності від наявних умов та існуючих обмежень щодо типу блокового коду, моделі каналу зв'язку, обчислювальної складності реалізації та інших факторів.

Враховуючи наведені вище переваги процедури диференційної еволюції, розглянемо основні етапи розробленого методу м'якого декодування блокових кодів на базі даної оптимізаційної процедури.

*Етап 1.* Формування жорсткого рішення та обчислення синдрому для прийнятого слова.

На даному етапі здійснюється первинна обробка прийнятого з каналу зв'язку сигналу та формування відповідного двійкового прийнятого слова. Після цього для сформованого слова обчислюється синдром на основі перевірконої матриці блокового коду. Якщо синдром дорівнює нулю, то процес декодування завершується та робиться висновок, що прийняте слово є кодовим словом даного блокового коду. У протилежному випадку здійснюється перехід до наступного

етапу декодування, що використовує наявну інформацію про прийнятий сигнал (м'яке рішення).

*Етап 2.* Визначення найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду.

Даний етап передбачає ранжування прийнятих символів за надійністю (чисельним значенням м'якого рішення) та перетворення породжувальної матриці блокового коду у відповідний найбільш надійний базис. В цьому випадку перші позиції модифікованої породжувальної матриці відповідають надійним елементам прийнятого слова, а інші позиції – частині прийнятого слова, що може містити помилки з більш високою імовірністю.

*Етап 3.* Застосування процедури диференційної еволюції для пошуку передбачуваного кодового слова.

На початку цього етапу формується перша популяція векторів рішень, що використовується при старті процедури диференційної еволюції. До складу даної популяції входить найбільш надійне інформаційне повідомлення, що визначається на основі перших позицій відсортованого прийнятого слова, та випадкові інформаційні повідомлення. Після цього формуються можливі кодові слова шляхом множення відповідного інформаційного повідомлення на модифіковану породжувальну матрицю блокового коду. Якість векторів рішень (та відповідних кодових слів) обчислюється на основі фітнес-функції, що відповідає цільовій функції оптимізаційної задачі декодування. Далі згідно процедури диференційної еволюції до векторів рішень застосовуються оператори мутації, кросоверу та селекції в результаті чого формується нова популяція. В подальшому даний процес відбувається ітеративно поки не виконається обраний критерій зупинення обчислень. Кінцевим результатом є знайдене найбільш імовірне інформаційне повідомлення,

що відповідає деякому модифікованому кодовому слову.

*Етап 4.* Формування оцінки переданого кодового слова на основі зворотного перетворення.

Цей етап передбачає визначення оцінки переданого кодового слова заданого блокового коду (та відповідного інформаційного повідомлення) шляхом здійснення зворотного перетворення

знайденого на попередньому етапі модифікованого кодового слова. Це відбувається з урахуванням структури використовуваного найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду.

Для узагальнення представленого підходу до декодування блокових кодів розроблена відповідна схема (рис. 1).

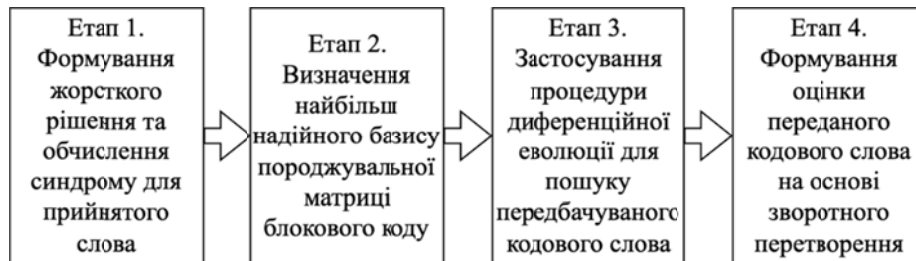


Рис. 1. Схема методу м'якого декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції

Слід зазначити, що у представленому методі декодування блокових кодів ключовим є третій етап декодування, що фактично реалізує запропоновану логіку пошуку переданого кодового слова. Крім того формування найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду на другому етапі дозволяє додатково підвищити ефективність декодування за рахунок формування та оброблення процедурою дифере-

нційної еволюції більш імовірних векторів рішень.

#### Алгоритм м'якого декодування блокових кодів, заснований на диференційній еволюції

З метою технічної реалізації запропонованого методу декодування блокових кодів розроблено відповідний алгоритм (рис. 2).

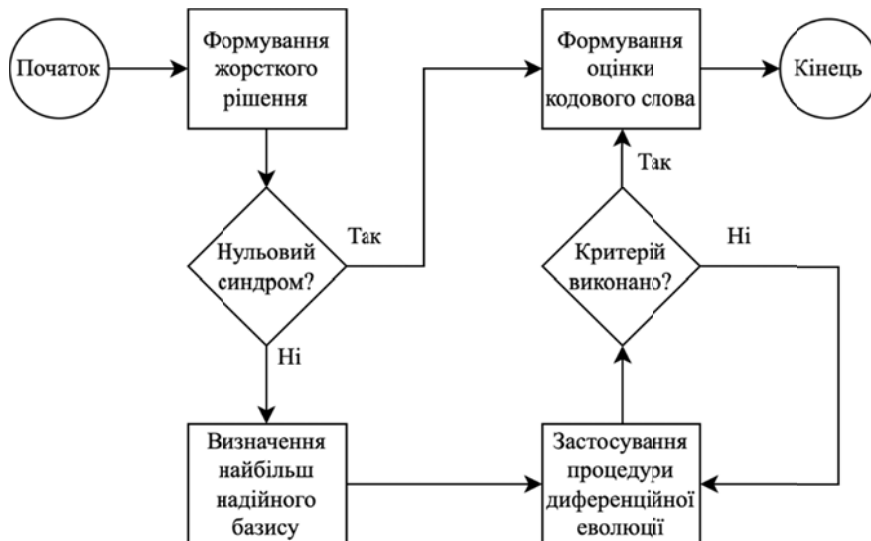


Рис. 2. Схема алгоритму м'якого декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції

В якості вихідних даних для даного алгоритму виступають прийнятий сигнал, модель каналу зв'язку, параметри обраного блокового коду та параметри процедури диференційної еволюції. На основі прийнятого сигналу формується жорстке рішення, для якого обчислюється синдром. У разі нульового синдрому відбувається формування оцінки двійкового кодового слова на осно-

ві жорсткого декодування, в противному випадку – здійснюється перехід до м'якого декодування. Спочатку визначається найбільш надійний базис з використанням м'якої інформації з прийнятого сигналу та перестановок елементів породжувальної матриці породжувальної матриці обраного блокового коду. Після цього застосовується процедура диференційної еволюції для пошуку най-

більш імовірного переданого інформаційного повідомлення та відповідного двійкового кодового слова. Даний пошук здійснюється шляхом ітеративного генерування популяції можливих інформаційних повідомлень з використанням операторів оптимізаційної процедури, формування відповідних кодових слів з використанням визначеного найбільш надійного базису та оцінки їх якості на основі обчислення заданої фітнес-функції. М'яке декодування завершується зворотним перетворенням знайденого найбільш імовірного двійкового кодового слова шляхом перестановки відповідних елементів, зробленої при формуванні найбільш надійного базису. Вихідними даними даного алгоритму є сформована оцінка переданого двійкового кодового слова.

#### **Обговорення результатів дослідження методу декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції**

Представлений метод декодування є частковим результатом узагальненого біоінспірованого підходу до декодування блокових кодів. Ключовою особливістю даного методу декодування є застосування у якості пошукового механізму процедури диференційної еволюції. Розроблена схема та алгоритм декодування блокових кодів ілюструють загальну ідею запропонованого підходу та повинні бути використанні при практичній реалізації. В подальшому доцільно розробити програмну реалізацію та провести експериментальні дослідження ефективності даного методу декодування для заданих типів блокових кодів та обраних моделей каналу зв'язку.

#### **Висновки**

В роботі запропоновано метод м'якого декодування блокових кодів, що заснований на визначенні найбільш надійного базису породжувальної матриці та застосуванні процедури диференційної еволюції. Вибір даної оптимізаційної процедури у якості пошукового механізму обґрунтовано в результаті проведеного аналізу особливостей та наявних обмежень процедур еволюційної оптимізації. Представлена схема та розглянуто сутність основних етапів методу м'якого декодування блокових кодів на основі процедури диференційної еволюції. З метою можливості технічної реалізації даного методу декодування розроблено відповідний алгоритм та наведено основні його кроки.

Результати роботи можуть бути використані при впровадженні технологій радіозв'язку нового покоління для підвищення достовірності передавання службових повідомлень. Також рекомендується використовувати отримані результа-

ти при вирішенні задачі декодування інших завадостійких кодових конструкцій, що використовуються у сучасних телекомунікаційних технологіях.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

- [1] Saad W., Bennis M., Chen M. A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Network*. 2020. Vol. 4, No 3. P. 134–142. doi: <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
- [2] Giordani M., Polese M., Mezzavilla M., Rangan S., Zorzi M. Toward 6G networks: Use cases and technologies. *IEEE Communication Magazine*. 2020. Vol. 58, No 3. P. 55–61. doi: <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900411>
- [3] Ryan W., Lin S. Channel codes: Classical and modern. Cambridge University Press, 2009. 692 p. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511803253>
- [4] Adde P., Toro D. G., Jeco C. Design of an efficient maximum likelihood soft decoder for systematic short block codes. *IEEE Transactions on Signal Processing*. 2012. Vol. 60, No 7. P. 3914 – 3919. doi: <https://doi.org/10.1109/TSP.2012.2193575>
- [5] Deng L., Liu Z., Guan Y. L., Liu X., Aslam C. A., Yu X., Shi Z. Perturbed adaptive belief propagation decoding for high-density parity-check codes. *IEEE Transactions on Communications*. 2021. Vol. 69, No 4. P. 2065–2079. doi: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2020.3047085>
- [6] Li Y., Liu H., Chen Q., Truong T.-K. On decoding of the (73, 37, 13) quadratic residue code. *IEEE Transactions on Communications*. 2014. Vol. 62, No 8. P. 2615–2625. doi: <https://doi.org/10.1109/TCOMM.2014.2333663>
- [7] 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, No 1. P. 35–41.
- [8] Berkani A., Azouaoui A., Belkasmi M., Aylaj B. Improved decoding of linear block codes using compact genetic algorithms with larger tournament size. *International Journal of Computer Science Issues*. 2017. Vol. 14, No 1. P. 15–24. doi: <https://doi.org/10.20943/01201701.1524>
- [9] Жученко А. С., Панченко Н. Г., Панченко С. В., Штомпель Н. А. Метод декодування лінійних блокових кодів на основі популяційних процедур пошукової оптимізації. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 2 (117). С. 25–29. doi: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i2.69000>
- [10] Price K., Storn R. M., Lampinen J. A. Differential evolution: A practical approach to global optimization. Springer, 2005. 539 p. doi: <https://doi.org/10.1007/3-540-31306-0>

## **Козловський В. В., Штомпель М. А., Лисечко В. П., Комар О. М., Дробик В.О. РОЗРОБКА МЕТОДУ ДЕКОДУВАННЯ БЛОКОВИХ КОДІВ НА ОСНОВІ ПРОЦЕДУРИ ДИФЕРЕНЦІЙНОЇ ЕВОЛЮЦІЇ**

*Запропоновано підхід до м'якого декодування блокових кодів, який заснований на визначенні найбільш надійного базису породжувальної матриці та застосуванні процедури диференційної еволюції. Вибір даної процедури пошукової оптимізації здійснено в результаті проведеного аналізу особливостей та наявних обмежень процедур еволюційної оптимізації. Представлено схему та сутність основних етапів розробленого методу м'якого декодування блокових кодів. На першому етапі формується жорстке рішення та обчислюється синдром для прийнятого слова. Після цього здійснюється ранжування прийнятих символів за надійністю та перетворення породжувальної матриці блокового коду у відповідний найбільш надійний базис. Далі застосовується процедура диференційної еволюції для пошуку найбільш імовірного переданого інформаційного повідомлення та відповідного двійкового кодового слова. Декодування завершується зворотним перетворенням знайденого найбільш імовірного двійкового кодового слова шляхом перестановки відповідних елементів. Показано, що ключовим етапом декодування є пошук переданого кодового слова з використанням процедури диференційної еволюції, а формування найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду дозволяє підвищити ефективність декодування. З метою можливості технічної реалізації даного методу декодування розроблено відповідний алгоритм та наведено основні його кроки. Результати роботи можуть бути використані при впровадженні технологій радіозв'язку нового покоління для підвищення достовірності передавання службових повідомлень. Також рекомендується використовувати отримані результати при вирішенні задачі декодування інших завадостійких кодових конструкцій, що використовуються у сучасних телекомунікаційних технологіях.*

**Ключові слова:** радіозв'язок, декодування, блоковий код, оптимізація, диференційна еволюція

## **Kozlovskiy V., Shtompel M., Lysechko V., Komar O., Drobyk V. DEVELOPMENT OF METHOD OF DECODING BLOCK CODES BASED ON DIFFERENTIAL EVOLUTION PROCEDURE**

*The approach of soft decoding of block codes based on determining the most reliable basis of the generator matrix and applying the differential evolution procedure is proposed. The choice of this search optimization procedure was made as a result of the analysis of the features and limitations of evolutionary optimization procedures. The scheme and the essence of the main stages of the developed method of soft decoding of block codes are presented. At the first stage, a hard decision is formed and the received word syndrome is calculated. After that, the received symbols are ranked by reliability and the generator matrix of the block code is transformed into the corresponding most reliable basis. Next, a differential evolution procedure is applied to search for the most probable transmitted information message and a binary codeword. Decoding is completed by inverse transformation of the found most probable binary codeword by rearranging the corresponding elements. It is shown that the key stage of decoding is the search for the transmitted codeword using the differential evolution procedure, and the formation of the most reliable basis of the generator matrix of block code makes it possible to increase the decoding efficiency. In order to be able to technically implement this decoding method, an appropriate algorithm has been developed and its main steps are given. The results of the work can be used for the implementation of new generation radio communication technologies to improve the reliability of the transmission of service messages. It is also recommended to use the obtained results when solving the problem of decoding other error-correcting code structures that are used in modern telecommunication technologies.*

**Keywords:** radio communication, decoding, block code, optimization, differential evolution.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2023 р.

Прийнято до друку 01.06.2023 р.