

**Комар О. М., Дробик В.О.**

*Національний авіаційний університет, Київ*

**Штомпель М. А., Лисечко В. П.**

*Український державний університет залізничного транспорту, Харків*

## **РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ЕВОЛЮЦІЙНОГО ДЕКОДУВАННЯ БЛОКОВИХ КОДІВ**

**Анотація:** Представлено підхід до розробки програмного засобу для еволюційного декодування блокових кодів. Розглянуто ключові етапи процесу проектування даного програмного засобу. Обґрунтовано застосування мови програмування Python при програмній реалізації еволюційного декодування блокових кодів. Визначено, що дана мова програмування забезпечує достатньо просту та функціональну реалізацію обчислень у скінченних полях та процедур еволюційної оптимізації вбудованими компонентами та бібліотеками. Наведено узагальнені етапи еволюційного декодування деякого блокового коду. Показано, що спочатку здійснюється жорстке декодування, а потім виконується еволюційний пошук кодового слова на основі найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду. Запропоновано функціональну діаграму, що заснована на опрацюванні основних етапів декодування блокових кодів з використанням процедур еволюційної оптимізації. Дана діаграма ілюструє запропонований спосіб реалізації програмним засобом необхідних функцій компонентами еволюційного декодера. Розроблена архітектура програмного засобу еволюційного декодування блокових кодів. Пропонована архітектура передбачає використання наявних бібліотек блокових кодів, обчислень у скінченних полях, еволюційної оптимізації та розробленого функціоналу декодера. Розглянуто призначення окремих блоків та програмних модулів даного програмного засобу. Результати роботи доцільно застосовувати для підвищення достовірності передавання інформації у існуючих та перспективних системах радіозв'язку. Також отримані результати можуть бути використані при проведенні експериментальних досліджень характеристик різних типів блокових кодів, що знаходять застосування у сучасних електронних комунікаціях.

**Ключові слова:** радіозв'язок, програмний засіб, декодування, блоковий код, еволюційна оптимізація

**Komar O. M., Drobyk V.O.**

*National Aviation University, Kyiv*

**Shtompel M. A., Lysechko V. P.**

*Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv*

## **DEVELOPMENT OF SOFTWARE TOOL FOR EVOLUTIONARY DECODING OF BLOCK CODES**

**Abstract:** The approach to the development of a software tool for evolutionary decoding of block codes is presented. The key stages of the design process of this software tool are considered. The application of the Python programming language in the software implementation of the evolutionary decoding of block codes is substantiated. It was determined that this programming language provides a sufficiently simple and functional implementation of calculations in finite fields and evolutionary optimization procedures with built-in components and libraries. The generalized stages of evolutionary decoding of some block code are given. It is shown that hard decoding is first performed, and then an evolutionary search of the codeword based on the most reliable basis of the

*generator matrix of the block code is performed. A functional diagram based on processing the main stages of decoding of block codes using evolutionary optimization procedures is proposed. This diagram illustrates the proposed method of software implementation of the necessary functions by the components of the evolutionary decoder. The architecture of the software tool for the evolutionary decoding of block codes has been developed. The proposed architecture involves the use of existing libraries of block codes, computations in finite fields, evolutionary optimization and developed decoder functionality. The purpose of individual blocks and software modules of this software tool is considered. The results of the work should be used to increase the reliability of information transmission in existing and prospective radio communication systems. Also, the obtained results can be used in conducting experimental studies of the characteristics of various types of block codes that are used in modern electronic communications.*

**Keywords:** *radio communication, software tool, decoding, block code, evolutionary optimization*

## 1. Вступ

Системи радіозв'язку відіграють важливу роль у сучасних електронних комунікаціях. При цьому забезпечення якості послуг у даних телекомунікаційних системах є достатньо важким завданням через вплив ряду факторів [1]. Впровадження новітніх послуг та зростання вимог з боку користувачів призводить до необхідності підвищення достовірності передавання інформації у системах радіозв'язку [2]. Для вирішення цієї задачі часто застосовуються різні типи блокових кодів та відповідні методи декодування. При цьому з практичної точки зору необхідно використовувати методи декодування, що мають прийнятну обчислювальну складність з метою їх програмної реалізації. Це пов'язано з тим, що при апаратній реалізації декодера часто накладаються додаткові обмеження та спрощення процедур декодування, в результаті чого погіршується ефективність декодування [3].

Це обумовлює актуальність і необхідність проведення досліджень у напрямку розробки програмного засобу для ефективного декодування різних типів блокових кодів, що застосовуються у системах радіозв'язку.

## 2. Аналіз літературних даних і постановка проблеми

Останнім часом зростає кількість робіт, в яких для вирішення задачі декодування блокових кодів застосовуються різноманітні оптимізаційні процедури.

У [4] представлено принципи застосування процедур математичного програмування для декодування двійкових лінійних кодів, зокрема, блокових кодів. У роботі розглянуто та класифіковано наявні методи декодування, в основі яких лежать процедури лінійного, цілочисельного, нелінійного програмування та інших теоретичних підходів.

Розвитку ідеї декодування кодів на основі процедури лінійного програмування присвячені роботи [5, 6].

У [5] показано, що у методі декодування з використанням лінійного програмування важливу роль відіграють псевдо кодові слова, для аналізу яких доцільно застосовувати графічний підхід. Авторами представлено графічні характеристики псевдо кодових слів для циклічних кодів, що дозволяють отримати нові відомості про ефективність даного типу декодера для різних моделей каналів зв'язку.

В [6] отримано нові результати щодо корегуальної здатності при декодуванні кодів з малою щільністю на парність на основі лінійного програмування. Проаналізовано наявний зв'язок між даним методом декодування та класичним методом декодування на основі обміну рішеннями з використанням первинної лінійної програми.

Суттєвим обмеженням робіт, присвячених методам декодування на основі класичних оптимізаційних процедур, є більшою мірою теоретична спрямованість отриманих результатів. Для усунення даного обмеження для вирішення задачі декодування завадостійких кодів застосовуються процедури еволюційної оптимізації.

У [7] запропоновано підхід до декодування блокових кодів на основі генетичних алгоритмів. Проведені дослідження показали, що застосування даного підходу дозволяє значно підвищити ефективність декодування для обраних каналів зв'язку. При цьому запропонований метод декодування має прийнятну обчислювальну складність при практичній реалізації.

В [8] представлено метод м'якого декодування блокових кодів на основі компактного генетичного алгоритму. Застосування цієї процедури еволюційної оптимізації дозволяє додатково підвищити ефективність декодування заданих типів кодів без значного збільшення обчислювальної складності.

Узагальнення принципів застосування механізмів еволюційної оптимізації при декодуванні блокових кодів представлено у [9]. У роботі визначено концептуальні засади даного підходу та наведено основні етапи декодування із використанням узагальнених процедур біоінспірованої оптимізації.

Проте в представлених роботах практично не розглядаються питання щодо програмної реалізації еволюційного декодування блокових кодів, тому цьому питанню присвячена дана робота.

### **3. Мета і задачі дослідження**

Метою дослідження є розробка програмного засобу для еволюційного декодування блокових кодів, що застосовуються у системах радіозв'язку різного призначення.

Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання:

- проаналізовані можливості мов програмування та бібліотек щодо програмної реалізації методів завадостійкого кодування та процедур еволюційної оптимізації;
- запропонована функціональна діаграма еволюційного декодування блокових кодів;
- розроблена архітектура програмного засобу для еволюційного декодування блокових кодів.

### **4 Результати дослідження програмного засобу для еволюційного декодування блокових кодів**

#### **4.1 Аналіз мов програмування та бібліотек для програмної реалізації методів завадостійкого кодування та процедур еволюційної оптимізації**

Методи завадостійкого кодування характеризуються застосуванням спеціалізованого математичного апарату, заснованого на теорії скінченних полів. Наприклад, формування кодового слова двійкового блокового коду виконується шляхом множення інформаційного повідомлення на відповідну породжувальну матрицю у скінченному полі, що складається з двох елементів (0 та 1) [3]. Аналогічним чином процес декодування блокового коду також передбачає обробку інформації у скінченному полі, наприклад, при обчисленні синдрому, визначенні позицій помилок тощо. Крім того клас блокових кодів є досить широким та на даний момент найбільш вживаними при практичній реалізації технологій радіозв'язку є коди BCH, коди Ріда-Соломона та коди Ріда-Маллера. При цьому самостійна програмна реалізація заданого типу блокового коду є досить витратним та складним процесом, тому що вимагає врахування унікальних принципів побудови та спеціальної алгебраїчної структури.

Застосування процедур еволюційної оптимізації при декодуванні блокових кодів також накладає обмеження щодо використовуваної мови програмування. Це обумовлено тим, що лише ряд з них мають спеціальні бібліотеки та програмні модулі, що реалізують відповідні оптимізаційні процедури – генетичні алгоритми, диференційну еволюцію тощо.

Даний факт призводить до необхідності пошуку мов програмування, які підтримують достатньо просту та функціональну реалізацію обчислень у скінченних полях та процедур еволюційної оптимізації вбудованими компонентами та бібліотеками.

Результати проведеного аналізу серед основних мов програмування для програмної реалізації блокових кодів та процедур еволюційної оптимізації представлено у таблиці 1.

Таблиця 1

Результати аналізу мов програмування для розробки програмного засобу еволюційного декодування блокових кодів

Показник ефективності	Python	C++	MATLAB	Scilab
Наявність бібліотек для реалізації обчислень у скінченних полях	+	+	+	+
Наявність бібліотек для реалізації блокових кодів	+	+	+	–
Наявність бібліотек для реалізації процедур еволюційної оптимізації	+	+	+	–
Простота синтаксису мови програмування	+	–	+	+
Необхідність компіляції коду	–	+	–	–
Можливість безкоштовного використання	+	+	–	+

З відомостей, наведених у таблиці 1, слідує, що бібліотеки для роботи з блоковими кодами та процедурами еволюційної оптимізації наявні у більшості мов програмування, але з точки зору простоти та можливості безкоштовного застосування для розробки програмного засобу для еволюційного декодування блокових кодів доцільно застосовувати мову програмування Python.

#### 4.2 Функціональна діаграма еволюційного декодування блокових кодів

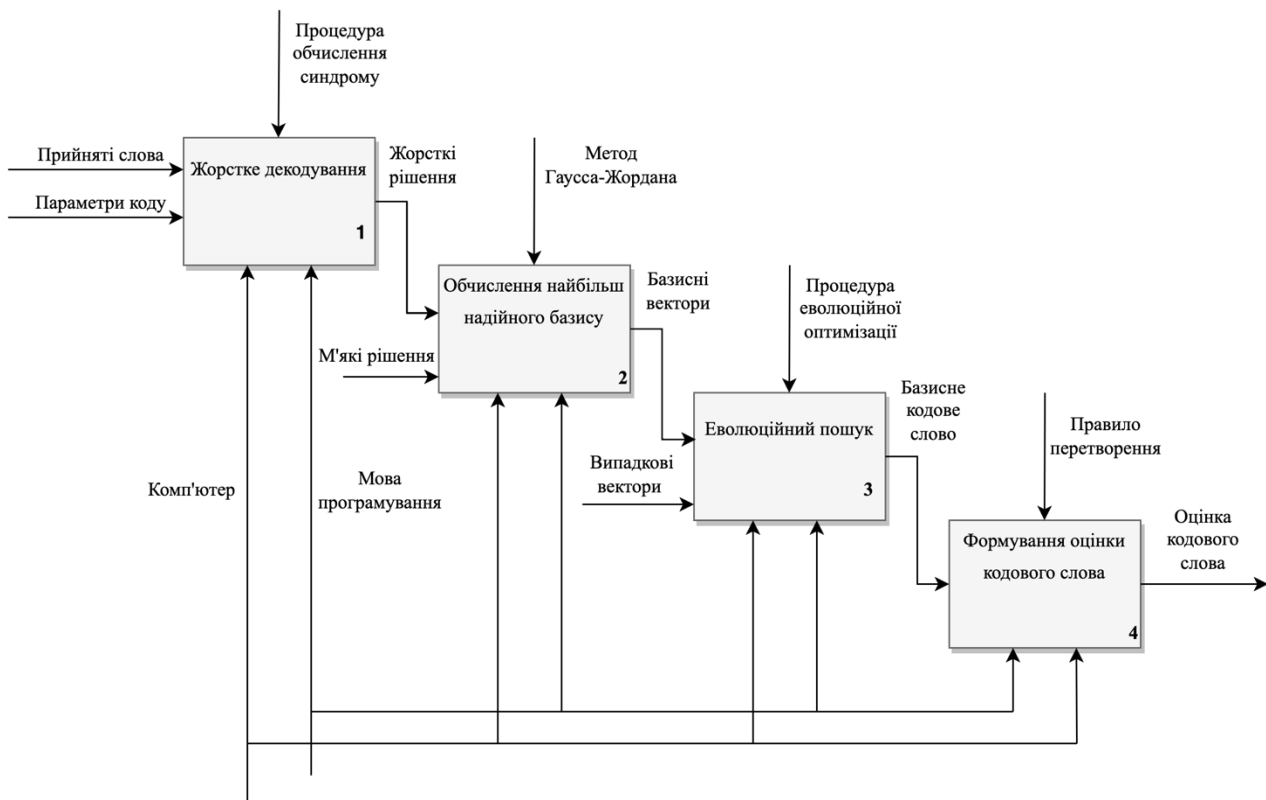


Рис. 1. Функціональна діаграма еволюційного декодування блокових кодів

З урахуванням результатів отриманих у [9], еволюційне декодування обраного типу блокового коду можна представити наступними узагальненими етапами.

Етап 1. Жорстке декодування прийнятого слова.

Етап 2. Обчислення найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду.

Етап 3. Еволюційний пошук базисного кодового слова блокового коду.

Етап 4. Формування оцінки переданого кодового слова блокового коду.

При розробці програмного засобу, що реалізує даний підхід до декодування блокових кодів, необхідно представити його компоненти та відповідні функціональні можливості.

Пропонована функціональна діаграма еволюційного декодування блокових кодів представлена на рис. 1.

З рис. 1 слідує, що вхідними даними для блоку «Жорстке декодування» є прийняті з каналу зв'язку слова та безпосередньо параметри обраного блокового коду (довжина кодового слова та інформаційного повідомлення, мінімальна кодова відстань тощо). У результаті застосування процедури обчислення синдрому для прийнятих слів формуються відповідні жорсткі рішення, що разом з м'якими рішеннями для цих слів надходять до блоку «Обчислення найбільш надійного базису». Даний базис для породжувальної матриці блокового коду формується з використанням типового підходу – методу Гаусса-Жордана. Отриманий базис служить для генерування базисних та випадкових векторів рішень, що служать вхідними даними для блоку «Еволюційний пошук», який виконує ключову роль з точки зору функціональності даного програмного засобу. Фактично знаходження найбільш імовірного переданого кодового слова засновано на використовуваній процедурі еволюційної оптимізації (наприклад, диференційної еволюції) [10]. Отримане базисне кодове слово подається на вхід блоку «Формування оцінки кодового слова» та завдяки застосуванню правила перетворення, що повністю визначається структурою найбільш надійного базису породжувальної матриці блокового коду, остаточно визначається оцінка переданого кодового слова. Реалізація даного програмного засобу ґрунтується на застосуванні обраної мови програмування та обчислювальному ресурсі – комп'ютері.

#### 4.3 Архітектура програмного засобу еволюційного декодування блокових кодів

Виходячи з результатів проведеного аналізу мов програмування, для реалізації програмного засобу еволюційного декодування блокових кодів обрано мову Python. Пропонована архітектура програмного засобу передбачає використання наявних бібліотек блокових кодів, обчислень у скінченних полях, еволюційної оптимізації та розробленого функціоналу декодера (рис. 2).

Представлена архітектура програмного засобу складається з:

- трьох базових блоків, що відповідають обраним спеціалізованим бібліотекам («Block codes block», «Finite field block», «Evolutionary search block»);
- ключового блоку, що містить основну логіку еволюційного декодера («Evolutionary decoder block»);
- допоміжного блоку, що надає інтерфейс для взаємодії з еволюційним декодером («User block»).

Програмні модулі кожного блоку безпосередньо реалізують необхідні функційні можливості:

- «GUI Module» призначений для надання графічного інтерфейсу користувачу;
- «Code parameters Module» забезпечує вибір типу та параметрів блокового коду;
- «Operation Module» реалізує здійснення арифметичних операцій у двійковому скінченному полі;
- «Evolutionary procedures Module» містить типові процедури еволюційної оптимізації;
- «Hard decoder Module» здійснює жорстке декодування на основі обчислення синдрому;
- «Basis Module» обчислює найбільш надійний базис породжувальної матриці для зазначеного блокового коду;

– «Transform Module» трансформує знайдене оптимізаційне рішення в оцінку переданого кодового слова.

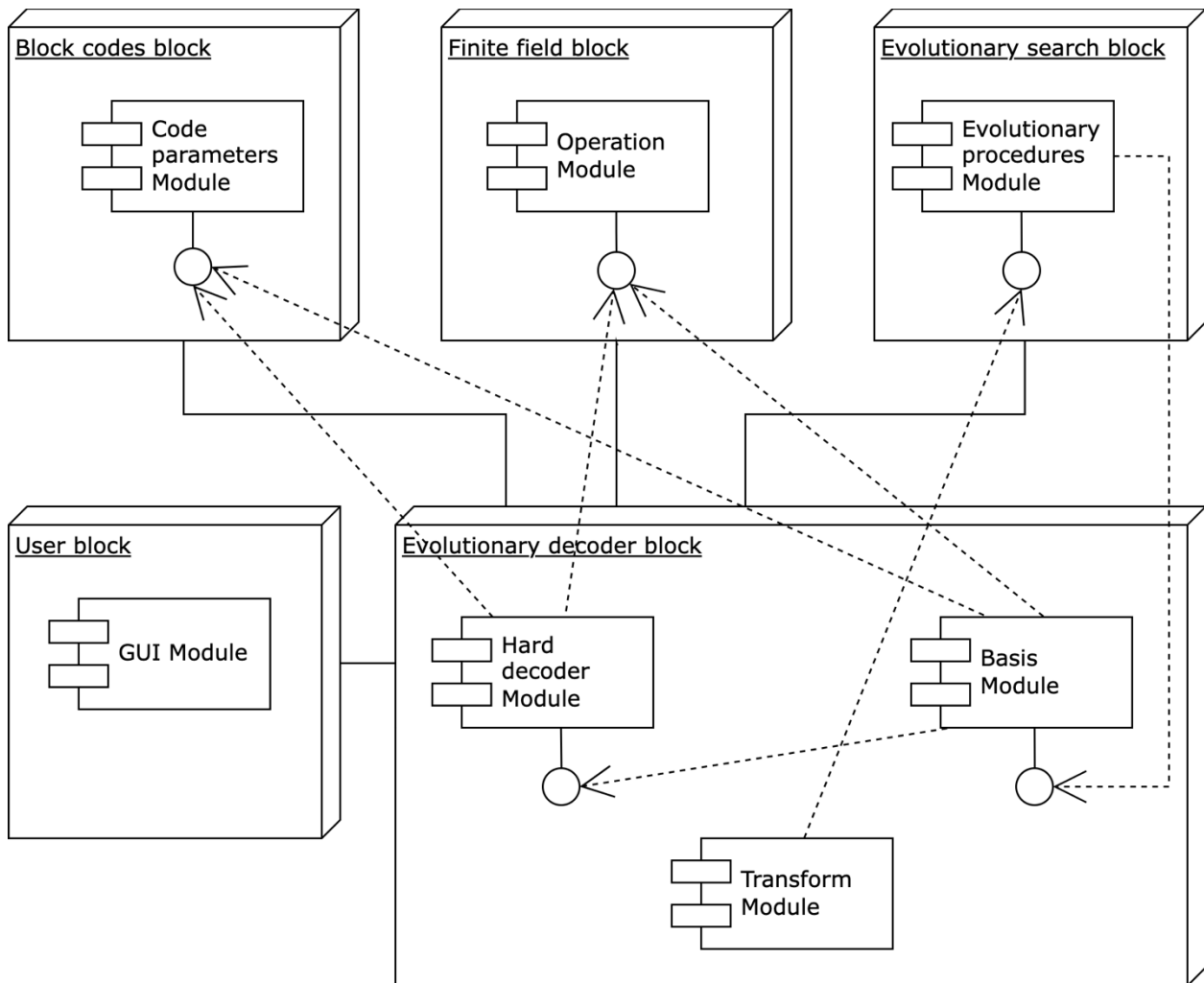


Рис. 2. Схема архітектури програмного засобу еволюційного декодування блокових кодів

Також на представленій схемі наведено взаємозв'язок між блоками та відповідними програмними модулями розробленого програмного засобу еволюційного декодування блокових кодів.

## 5. Обговорення результатів дослідження програмного засобу для еволюційного декодування блокових кодів

Розроблені функціональна діаграма та архітектура програмного засобу дозволяють програмно реалізувати підхід до еволюційного декодування блокових кодів. Відмінною особливістю даного підходу є застосування процедур еволюційної оптимізації для пошуку переданих кодових слів. Використання мови програмування Python обумовлено наявністю ряду спеціалізованих бібліотек, що суттєво спрощують практичну реалізацію пропонованого програмного засобу. Перспективним напрямком подальших досліджень є розширення підтримки додаткових типів блокових кодів та процедур еволюційної оптимізації, а також удосконалення інтерфейсу програмного засобу для еволюційного декодування блокових кодів.

**6. Висновки**

В роботі представлено підхід до розробки програмного засобу для еволюційного декодування блокових кодів, що висвітлює ключові етапи процесу його проєктування. Обґрунтовано застосування мови програмування Python при розробці даного програмного засобу. На основі основних етапів еволюційного декодування блокових кодів запропоновано функціональну діаграму. Дана діаграма ілюструє запропонований спосіб реалізації програмним засобом необхідних функцій компонентами еволюційного декодера. Розроблена схема архітектури програмного засобу еволюційного декодування блокових кодів. Наведено призначення окремих блоків та програмних модулів даної архітектури.

Результати роботи доцільно застосовувати для підвищення достовірності передавання інформації у існуючих та перспективних системах радіозв'язку. Також отримані результати можуть бути використані при проведенні експериментальних досліджень характеристик різних типів блокових кодів, що знаходять застосування у сучасних електронних комунікаціях.

**Список використаної літератури:**

1. Ghosh A., Maeder A., Baker M., Chandramouli D. 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 127639 – 127651. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939938>
2. 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>
3. Ryan W., Lin S. Channel codes: Classical and modern. Cambridge University Press, 2009. 692 p. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511803253>
4. Helmling M., Ruzika S., Tanatmis A. Mathematical programming decoding of binary linear codes: Theory and algorithms. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2012. Vol. 58, No 7. P. 4753 – 4769. doi: <https://doi.org/10.1109/TIT.2012.2191697>
5. Axvig N., Dreher D. Graphical characterizations of linear programming pseudocodewords for cycle codes. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2013. Vol. 59, No 9. P. 5917 – 5934. doi: <https://doi.org/10.1109/TIT.2013.2265693>
6. Arora S., Daskalakis C., Steurer D. Message-passing algorithms and improved LP decoding. *IEEE Transactions on Information Theory*. 2012. Vol. 58, No 12. P. 7260 – 7271. doi: <https://doi.org/10.1109/TIT.2012.2208584>
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 декодирования линейных блоковых кодов на основе популяционных процедур поисковой оптимизации. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2016. Вип. 2 (117). С. 25–29. doi: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i2.69000>
10. Kramer O. Genetic Algorithm Essentials. Springer, 2017. 92 p. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52156-5>

**References:**

1. Ghosh, A., Maeder, A., Baker, M., Chandramouli, D. (2019) 5G evolution: A view on 5G cellular technology beyond 3GPP release 15. *IEEE Access*, 7, 127639 – 127651. doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2939938>

2. Saad, W., Bennis, M., Chen, M. (2020) A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems. *IEEE Network*, 4 (3), 134 – 142. doi: <https://doi.org/10.1109/MNET.001.1900287>
3. Ryan, W., Lin, S. (2009) Channel codes: Classical and modern. Cambridge University Press, 692. doi: <https://doi.org/10.1017/cbo9780511803253>
4. Helmling, M., Ruzika, S., Tanatmis A. (2012) Mathematical programming decoding of binary linear codes: Theory and algorithms. *IEEE Transactions on Information Theory*, 58 (7), 4753 – 4769. doi: <https://doi.org/10.1109/TIT.2012.2191697>
5. Axvig, N., Dreher, D. (2013) Graphical characterizations of linear programming pseudocodewords for cycle codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, 59 (9), 5917 – 5934. doi: <https://doi.org/10.1109/TIT.2013.2265693>
6. Arora, S., Daskalakis, C., Steurer, D. (2012) Message-passing algorithms and improved LP decoding. *IEEE Transactions on Information Theory*, 58 (12), 7260 – 7271. doi: <https://doi.org/10.1109/TIT.2012.2208584>
7. Berbia, H., Elbouanani, F., Romadi, R., Benazza, H., Belkasmi, M. (2011) Genetic algorithm for decoding linear codes over awgn and fading channels. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 30 (1), 35 – 41.
8. Berkani, A., Azouaoui, A., Belkasmi, M., Aylaj, B. (2017) Improved decoding of linear block codes using compact genetic algorithms with larger tournament size. *International Journal of Computer Science Issues*, 14 (1), P. 15 – 24. doi: <https://doi.org/10.20943/01201701.1524>
9. Zhuchenko, A. S., Panchenko, N. H., Panchenko, S. V., Shtompel, N. A. (2016) Metod dekodirovaniya lyneinikh blokovich kodov na osnove populiatsyonnikh protsedur poyskovoi optymizatsyy. *Informatsiino-keruiuchi systemy na zaliznychnomu transporti*, 2 (117), 25 – 29. doi: <https://doi.org/10.18664/iksz.v0i2.69000>
10. Kramer, O. (2017) Genetic Algorithm Essentials. Springer, 92. doi: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-52156-5>