

УДК 004.7

**Serhii Zaitsev**<sup>1</sup>, D. S. (Computer science), professor, leading researcher  
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6643-917X> *e-mail*: [szaitsev@tu.kielce.pl](mailto:szaitsev@tu.kielce.pl)

**Vladyslav Vasylenko**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher  
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8156-1894> *e-mail*: [vladvasilenko9@gmail.com](mailto:vladvasilenko9@gmail.com)

**Taras Trysnyuk**<sup>1</sup>, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher  
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3672-8242> *e-mail*: [taras24t@gmail.com](mailto:taras24t@gmail.com)

**Natalya Sokorinska**<sup>2</sup>, Senior Researcher  
ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9713-7289> *e-mail*: [sokor-nata@ukr.net](mailto:sokor-nata@ukr.net)

<sup>1</sup>Institute of Telecommunications and the Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Central Research Institute of the Armed Forces of Ukraine, Kyiv, Ukraine

## **METHOD OF ADAPTATION OF CASCADE CODES TO ENSURE RELIABILITY OF INFORMATION TRANSMISSION OF WIRELESS DATA TRANSMISSION SYSTEMS**

**Abstract.** *The article proposes a method of structural adaptation of cascade codes, designed to ensure the specified reliability of information transmission of wireless data transmission systems in the event of interference, due to the dynamic synthesis of combined structures of cascade codes under conditions of a priori uncertainty. The essence of the method is to identify the internal structure of the code, due to which the structure of the component codes of the turbo code is determined. It was developed using the gradient method due to the implementation of a multi-step iterative procedure for finding optimal system parameters. Implementation of the method allows to ensure the reliability of information transmission of wireless data transmission systems. To check the effectiveness of the method of structural adaptation of cascade codes, a simulation model was developed in the C++ programming language in the Visual Studio 2019 software environment, and wireless data transmission systems were simulated. The simulation results show that the combined structure of building cascade codes together with OFDM technology allows you to independently adapt the coding rate of each of the coding stages depending on the results of the analysis of the reliability of information in this cascade, which leads to the provision of the specified reliability of information transmission, while the BSPD bandwidth is reduced by 4–12% against 20–35% of known results. The use of Reed-Solomon codes in a sequential cascade scheme with turbo codes due to the adaptation of the coding rate of this cascade design allows obtaining an energy gain of 0.5–0.7 dB without increasing the bandwidth of the transmission system compared to systems that use only turbo codes. The obtained results are of significant relevance and can be implemented in the development of information transmission systems to ensure the reliability of data transmission, both in peacetime and in conditions of armed aggression of the Russian Federation against Ukraine.*

**Keywords:** *a priori uncertainty; gradient method; OFDM; Reed-Solomon codes; turbo code; coding rate; simulation.*

С.В. Зайцев<sup>1</sup>, В.М. Василенко<sup>1</sup>, Т.В. Триснюк<sup>1</sup>, Н.В. Сокоринська<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України, м. Київ, Україна

<sup>2</sup>Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, м. Київ, Україна

## МЕТОД АДАПТАЦІЇ КАСКАДНИХ КОДІВ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ БЕЗПРОВОДОВИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

***Анотація.** У статті пропонується метод структурної адаптації каскадних кодів, призначений для забезпечення заданої достовірності передачі інформації безпроводових систем передачі даних при дії завад, за рахунок динамічного синтезу комбінованих структур каскадних кодів в умовах апіорної невизначеності. Сутність методу полягає в ідентифікації внутрішньої структури коду, за рахунок чого визначається структура компонентних кодів турбокоду. Він був розроблений з використанням градієнтного методу за рахунок імплементації багатокрокової ітеративної процедури пошуку оптимальних параметрів системи. Реалізація методу дозволяє забезпечити достовірність передачі інформації безпроводових систем передачі даних. Для перевірки ефективності методу структурної адаптації каскадних кодів була розроблена імітаційна модель на мові програмування C++ у програмному середовищі Visual Studio 2019 та проведено моделювання безпроводових систем передачі даних. Результати моделювання показують, що комбінована структура побудови каскадних кодів разом з технологією OFDM дозволяє незалежно адаптувати швидкість кодування кожного з каскадів кодування залежно від результатів аналізу достовірності інформації в цьому каскаді, що приводить до забезпечення заданої достовірності передачі інформації, при цьому пропускна спроможність БСПД зменшується на 4–12% проти 20–35% відомих результатів. Використання кодів Ріда-Соломона в послідовній каскадній схемі з турбокодами за рахунок адаптації швидкості кодування цієї каскадної конструкції дозволяє одержати енергетичний вираш 0,5–0,7 дБ без збільшення пропускної спроможності системи передачі в порівнянні з системами, які використовують тільки турбокоди. Отримані результати мають суттєву актуальність та можуть бути впроваджені при розробці систем передачі інформації для забезпечення достовірності передачі даних, як у мирний час, так і в умовах збройної агресії Російської Федерації проти України.*

***Ключові слова:** апіорна невизначеність; градієнтний метод; OFDM; коди Ріда-Соломона; турбокод; швидкість кодування; моделювання.*

<https://doi.org/10.32347/2411-4049.2023.3.133-143>

### Вступ

Адаптацією безпроводових систем передачі даних (БСПД) є зміна її параметрів та структури для досягнення очікуваного ефекту в умовах апіорної невизначеності.

Задачею адаптації БСПД є процес пошуку параметрів системи для підтримки його ефективності на заданому рівні. Постійний процес пошуку в умовах апіорної невизначеності потребує введення процедури адаптації для зміни параметрів або структури [1–3].

Цільова функція адаптації БСПД залежить від параметрів та структури системи. Параметричні та структурні властивості виразимо у вигляді вектора  $\vec{y}$ , сукупність управляючих змінних – у вигляді вектора управління  $\vec{u}$ , а сукупність фіксованих параметрів – у вигляді вектора  $\vec{w}$ .

Задача адаптації полягає у пошуку вектора структури та параметрів системи  $\vec{y}$  й управління  $\vec{u}$ , що забезпечують екстремум цільової функції при заданому векторі  $\vec{w}$  та обмеженнях  $g_i$  і  $G_j$ :

$$\left. \begin{aligned} Q &= \underset{\vec{y} \in Y, \vec{u} \in U}{extr} Q(\vec{y}, \vec{u}, \vec{w}) \\ g_i(\vec{y}, \vec{u}, \vec{w}) &= 0, \quad i = \overline{1, N_i}, \quad N_i \leq N_u \\ G_j(\vec{y}, \vec{u}, \vec{w}) &\{ \geq, \leq \}, \quad j = \overline{1, N_j} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $N_u$  – число незалежних компонент  $\vec{u}$ ,  $g_i$  і  $G_j$  – задані функції.

Для рішення задачі (1) необхідно використати аналітичні залежності для розрахунку ймовірності бітової помилки для відповідних кодових конструкцій в умовах впливу навмисних завад.

**Мета роботи.** Розробка методу структурної адаптації каскадних кодів, призначеного для забезпечення заданої достовірності передачі інформації безпроводових систем передачі даних при дії завад, за рахунок динамічного синтезу комбінованих структур каскадних кодів в умовах апріорної невизначеності.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Нехай  $\vec{x}_0$  – деяка початкова точка множини значень  $\Delta_\beta \subseteq \Delta; \Delta^* \subseteq \Delta_\beta$ , в яких досягається екстремум цільової функції  $f_0(\vec{x})$  [1, 4].

Збіжний ітеративний процес пошуку екстремуму – це процес ітеративного розрахунку значень (точок)  $\vec{x}^0, \vec{x}^1, \dots, \vec{x}^k, \vec{x}^{k+1}, \dots$ , що здійснюється завдяки перетворенню [1]:

$$\vec{x}^{k+1} = \Phi^k(\vec{x}^k), \quad (2)$$

і задовольняється вимогою збіжності:

$$\rho(\vec{x}^k, \Delta^*) \rightarrow \Phi^k(\vec{x}^k) \text{ при } k \rightarrow \infty.$$

Прикладом ітеративного процесу є градієнтний спуск, представлений як:

$$\vec{x}^{k+1} = \vec{x}^k - \alpha^k \nabla f(\vec{x}^k), \quad (3)$$

де  $\nabla f(\vec{x}^k)$  – вектор градієнта, який показує напрямок найшвидшого зростання значення цільової функції, а  $\alpha^k$  – кроковий множник, що визначає довжину вектора зміщення –  $\alpha^k \nabla f(\vec{x}^k)$  в напрямку, протилежному градієнту.

Виникає необхідність імплементації багатокрокової процедури, в якій коригується напрямок переміщення, де на кожній ітерації крок корекції повинен зменшуватися, а її частота збільшуватися на границі екстремуму. На рис. 1 показані лінії рівня двох функцій  $f_1(\vec{x})$  і  $f_2(\vec{x})$  траєкторії руху в напрямку екстремуму.

Градiєнтний метод застосуємо лише у випадках пошуку безумовного екстремуму диференційованої функції. У завданнях нелінійного програмування, коли цільова функція задається на безлічі допустимих альтернатив  $\Delta_{\beta}$ , пошук екстремуму ускладнюється, оскільки деяка проміжна точка  $\vec{x}^k$  багатокрокового процесу може виявитися на границі  $\Delta_{\beta}$  і градієнт може бути направлений за межі допустимої області [1].

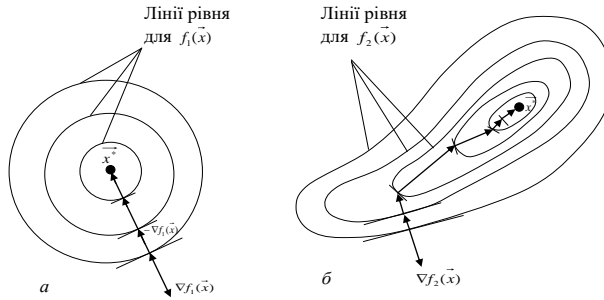


Рис. 1. Лінії рівня двох функцій і траєкторії руху в напрямку екстремуму

В такому випадку для забезпечення вибору можливого напрямку  $\vec{\gamma}^k$  в точці  $\vec{x}^k$ , який відмінний від напрямку градієнта або антиградієнта, використовується модифікований градієнтний метод. Вибір такого напрямку переміщення призводить би до збільшення (зменшення) значення цільової функції  $f(\vec{x})$  і забезпечував би не вихід за межі множини.

У цьому випадку співвідношення (2), яке визначає закон ітеративного процесу, записується в такому вигляді:

$$\vec{x}^k = \vec{x}^k - \alpha^k \vec{\gamma}^k. \tag{4}$$

На рис. 2 представлений пошук екстремуму в задачі без обмежень і з обмеженнями. Безліч допустимих рішень  $\Delta_{\beta}$  представлено заштрихованою областю. Зображені на рисунку лінії рівня відповідають деяким постійним значенням цільової функції  $f(\vec{x})$ , причому  $F_1 > F_2 > \dots > F_0$ .

З даного рисунка випливає, що у разі завдання без обмежень рішення знаходиться в точці  $\vec{x}^*$ , де  $f(\vec{x}^*) = F_0$  (глобальний безумовний мінімум).

З початкової точки, потрібно знаходити такі напрямки руху  $\vec{\gamma}^k$ , які б не порушували обмежень і траєкторія багатокрокового процесу повинна привести в точку, відповідну умовному екстремуму цільової функції (у цьому прикладі це точка  $\vec{x}^{**}$ ).

Завдяки вирішенню допоміжної одновимірної задачі мінімізації на кожному кроці виконується обчислення множника  $\alpha^k$ :

$$\vec{x}^0 = \arg \min_{\alpha \geq 0} f(\vec{x}^k - \alpha \nabla f(\vec{x}^k)). \tag{5}$$

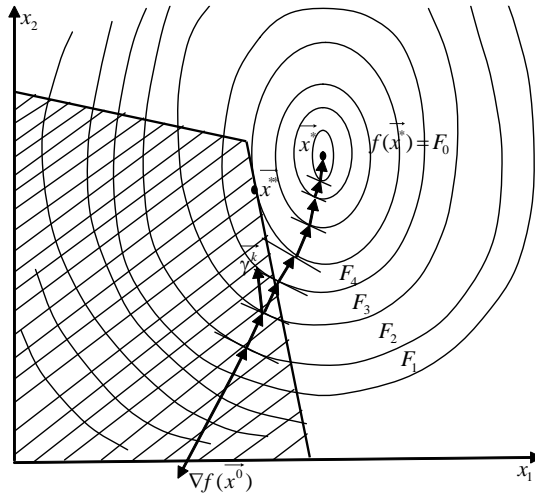


Рис. 2. Пошук екстремуму в задачі без обмежень і з обмеженнями

Відповідно до вимоги досягнення  $f(\vec{x}^k)$  мінімально можливого значення, при русі з точки  $\vec{x}^k$  вздовж напрямку антиградієнта в точці  $\vec{x}^{k+1}$ ,  $\alpha^k$  підіймається. У підсумку, траєкторія спуску, через точки  $\vec{x}^0, \vec{x}^1, \dots, \vec{x}^k, \vec{x}^{k+1}, \dots$ , є зигзагоподібною, причому кожний наступний напрямок руху ортогональний попередньому.

Метод структурної адаптації каскадних кодів призначений для забезпечення заданої достовірності передачі інформації БСПД при дії завад за рахунок динамічного синтезу комбінованих структур каскадних кодів в умовах апріорної невизначеності.

Сутність методу полягає в ідентифікації внутрішньої структури коду, за рахунок чого визначається структура компонентних кодів турбокоду.

Для визначення структури внутрішнього коду задаються початкові характеристики: кількість субканалів та види модуляції сигналу в субканалах сигналу OFDM, кількість каскадів кодування  $L$  та параметри внутрішніх кодів для кожного з  $l$ -го каскаду, де  $l \in \overline{1, L}$ , а саме: кількість біт у блоці  $N$ , види утворюючих поліномів компонентних кодів турбокоду  $(1, g_1/g_0, \dots, g_n/g_0)$ , тип перемежувача, кількість ітерацій декодування  $I$ , швидкість кодування турбокоду  $R_{1l}$ , кількість компонентних кодерів (декодерів), алгоритм декодування турбокоду (Map, Log-Map, Max-Log-Map), параметри зовнішнього коду для кожного з  $l$ -го каскаду,  $l \in \overline{1, L}$ , а саме: загальна кількість біт у блоці  $n$ , кількість інформаційних біт у блоці  $k$ , виправна здатність коду  $t = \left\lfloor \frac{n-k}{2} \right\rfloor$ , кількість біт у символі  $m$ , швидкість кодування  $R_{2l}$ , ймовірність бітової помилки зовнішнього коду  $P_l$ , ймовірність бітової помилки допустима  $P_{\text{пом. доп.}}$ .

Також, приймаються такі обмеження:  $R_{1l} \geq R_{1\text{доп.}}$ ,  $R_{2l} \geq R_{2\text{доп.}}$ ,  $L \leq L_{\text{доп.}}$ ,  $k \in \overline{3, 11}$ ,  $n \in \overline{7, 63}$ ,  $m \in \overline{3, 7}$ ,  $t \in \overline{1, 10}$ .

Виберемо квадрат похибки (відхилення регульованої величини від заданої) за показник оптимальності процесу адаптації:

$$J = e^2,$$

де  $e = P_{\text{пом.}} - P_{\text{пом. доп.}}$ .

Для реалізації принципу самонастроювання в методі застосуємо підхід, відповідно до якого будемо знаходити градієнт, що визначається виразом:

$$\nabla J(\vec{U}) = \left[ \frac{\partial J}{\partial u_1}, \frac{\partial J}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial J}{\partial u_N} \right]. \quad (6)$$

Розв'язання рівняння (4) полягає у пошуку вектора управління:

$$\vec{U}^{k+1} = \vec{U}^k - \alpha^k \nabla f(\vec{U}^k)$$

де  $\alpha$  – скаляр, який визначає величину наступного кроку.

Виберемо такий критерій зупинки ітеративної процедури пошуку екстремуму функціонала  $J(\vec{U})$ :

$$\left\| \nabla J(\vec{U}^k) - \nabla J(\vec{U}^{k+1}) \right\| \leq \varepsilon.$$

Елементами вектора регулюючої дії  $\vec{U}$  є:  $u_1$  – довжина інформаційної послідовності,  $u_2$  – кількість біт у символі  $m$ ,  $u_3$  – довжина кодової комбінації  $n$ .

У випадку, коли обчислення градієнта функціонала  $J(\vec{U})$  потребує значного обчислювального ресурсу, тоді можемо представити процес ітеративної процедури пошуку наступним чином.

Після прийому  $B$  блоків даних розміром  $N$  біт, для кожного  $l$ -го каскаду перевіряється виконання умови:

$$P_{l \text{ пом.}} = \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=1}^{2^m - 1} j \binom{2^m - 1}{j} p_l^j (1 - p_l)^{2^m - 1 - j} \leq P_{\text{пом. доп.}}, \quad (7)$$

де  $p_l$  – ймовірність бітової помилки декодування турбокодів  $l$ -го каскаду.

За умови невиконання виразу (7) для  $l$ -го каскаду, інкрементуємо параметри  $k$ ,  $n$ ,  $m$  зовнішнього коду Ріда-Соломона:  $k = k + 1$ ,  $n = n + 1$ ,  $m = m + 1$ . Це впливає на швидкість кодування  $R_{2l}$ . Якщо в результаті зміни  $R_{2l} < R_{2 \text{ доп.}}$ , то встановлюємо початкові значення для параметрів кодів Ріда-Соломона і вибираємо нове значення швидкості кодування турбокоду  $R_{1l}$ . Далі відбувається відповідна зміна структури компонентних кодів турбокоду.

У табл. 1 представлені параметри кодів Ріда-Соломона для  $l$ -го каскаду, які були отримані за допомогою рішення задачі (7).

Таблиця 1. Параметри кодів Ріда-Соломона

$p_l$	$P_{l\text{ пом.}}$	$m$	$t$	$k$	$n$
$10^{-1}$	$10^{-2}$	4	4	7	15
	$10^{-3}$	4	5	5	15
	$10^{-4}$	5	10	11	31
$10^{-2}$	$10^{-3}$	3	1	5	7
	$10^{-4}$	3	2	3	7
	$10^{-5}$	4	3	9	15
	$10^{-6}$	4	4	7	15

Для перевірки ефективності визначення структури конкатенації кодів проведено імітаційне моделювання БСПД. На рис. 3 представлені характеристики залежності ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада.

При моделюванні використовувався сигнал OFDM-2048, кількість паралельних каскадів кодування  $L = 4$ , внутрішні турбокоди (кількість біт в блоці  $N = 6144$ , псевдовипадковий перемежувач,  $R_{1l} = 4/5$ ,  $R_{1l\text{ доп.}} = 1/2$ , поліноми (1, 13/11), два компонентних кодера (декодера), метод декодування Log-Map, кількість ітерацій декодування  $I = 8$ ) і аналогічні тим, які використовуються в системі 4G LTE-Advanced, та зовнішні коди Ріда-Соломона ( $k \in \overline{3,11}$ ,  $n \in \overline{7,63}$ ,  $m \in \overline{3,7}$ ,  $t \in \overline{1,10}$ ,  $R_{2l} = 4/5$ ,  $R_{2l\text{ доп.}} = 1/2$ ). Відношення сигнал-шум прийнято 9,58 дБ. У першому каскаді кодування діє шумова завада в частині смуги (коефіцієнт перекриття  $\gamma = 0,25$ ), при якій ймовірність бітової помилки декодування дорівнює  $P_{1\text{ пом.}} = 10^{-2}$  для відношення сигнал-завада  $E_b / N_j = 1,15$  дБ. У другому, третьому і четвертому каскадах навмисні завади відсутні –  $P_{2\text{ пом.}} = P_{3\text{ пом.}} = P_{4\text{ пом.}} = 10^{-4}$ .

Допустиме значення ймовірності бітової помилки дорівнює  $P_{\text{ пом. доп.}} = 10^{-4}$ . Таким чином, у першому каналі буде змінюватися швидкість кодування каскадного коду, а швидкості кодування в другому, третьому та четвертому каналах залишаться незмінними, тобто  $R_{2i} = 3/4$ ,  $i \in \overline{2,4}$ . Швидкість кодування зовнішнього коду першого каскаду змінюється з  $R_{21} = 4/5$  (сумарна швидкість кодування становить  $R_\Sigma = 16/25$ ) на  $R_{21} = 3/4$  ( $R_\Sigma = 3/5$ ), а потім на  $R_{21} = 5/8$  ( $R_\Sigma = 1/2$ ). При цьому пропускна здатність зменшується з  $C = 1,279$  біт/символ до  $C = 1,184$  біт/символ. Результати моделювання свідчать, що в подібній ситуації в системі 4G LTE-Advanced швидкість кодування турбокоду змінилась би з  $R = 2/3$  на  $R = 4/9$  (рис. 4), а пропускна здатність зменшилась би з  $C = 1,332$  біт/символ до  $C = 0,888$  біт/символ.

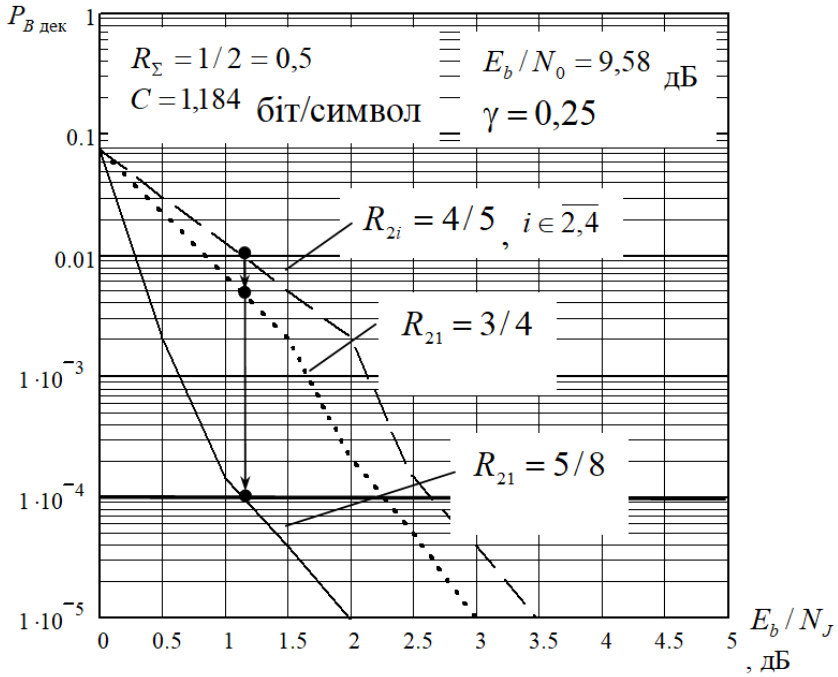


Рис. 3. Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування від відношення сигнал-шум для системи з паралельно-послідовним каскадним кодуванням

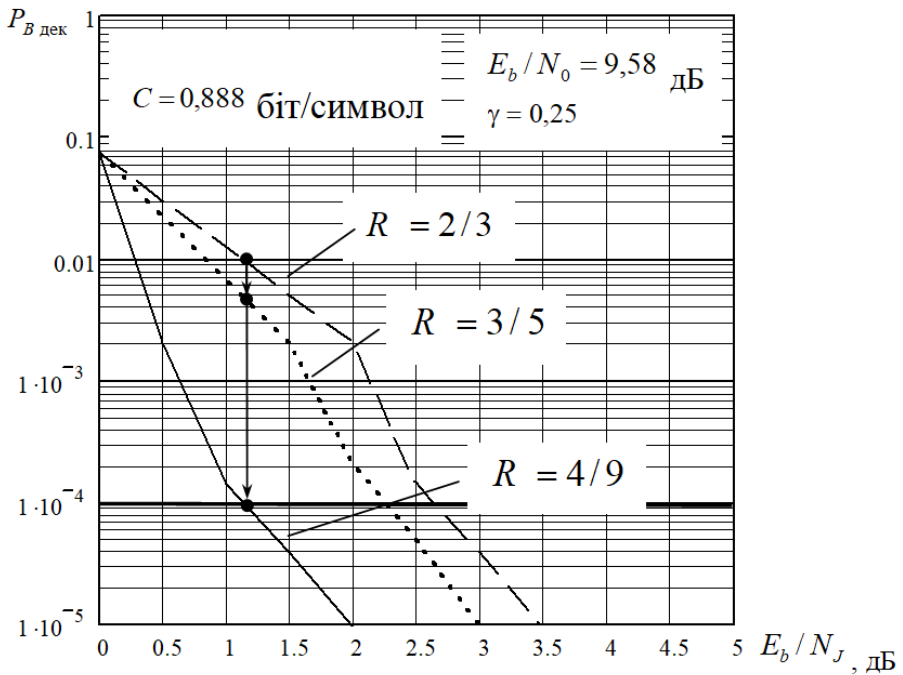


Рис. 4. Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування від відношення сигнал-завада для системи 4G LTE-Advanced



Тому, використання запропонованої схеми структурної адаптації каскадних кодів приводить до забезпечення заданої достовірності передачі інформації, при цьому пропускна спроможність БСПД зменшується на 4–12%, тоді як у системі 4G LTE-Advanced на 20–35%.

Збільшення швидкості кодування в першому каскаді дає змогу підвищити достовірність передачі інформації. На рис. 5 показана залежність ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада, змодельована з параметрами, аналогічними тим, які використовувались для отримання залежностей рис. 3. Видно, що додаткова зміна швидкості кодування до  $R_{21} = 1/3$  приводить до одержання енергетичного виграшу кодування 0,5 дБ, при цьому сумарна пропускна здатність знижується не набагато і дорівнює  $C = 1,12$  біт/символ.

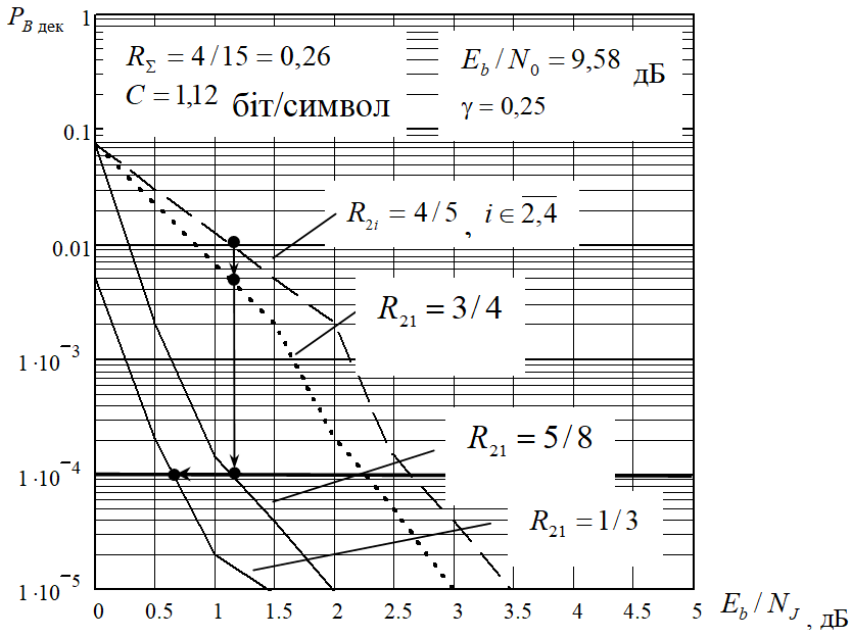


Рис. 5. Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування від відношення сигнал-завада для системи з паралельно-послідовним каскадним кодуванням

Подальша зміна швидкості кодування зовнішнього коду Ріда-Соломона сприятиме підвищенню достовірності передачі інформації. На рис. 6 показано графік залежності середньої ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада під час використання тільки послідовного каскадного кодування та кодування, аналогічного системі 4G LTE-Advanced.

Аналіз графічних залежностей свідчить, що для ймовірностей бітової помилки декодування  $P_{В дек} > 10^{-3}$  кращі характеристики показує схема з одним кодеком, при ймовірностях бітової помилки  $P_{В дек} < 10^{-3}$  кращі характеристики достовірності має каскадна побудова кодеків.

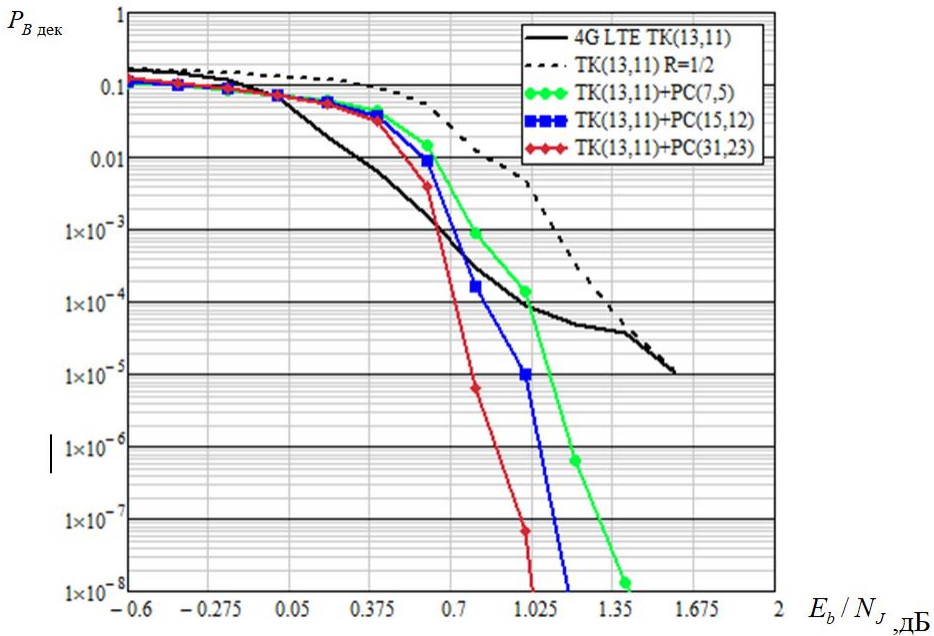


Рис. 6. Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування від відношення сигнал-завада під час використання каскадного кодування

Так, для ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}} = 10^{-5}$  каскадна побудова кодеків забезпечує енергетичний вииграш кодування 0,8 дБ без зміни швидкості кодування, тобто при однаковій пропускній здатності БСПД.

### Висновки

1. У статті пропонується метод структурної адаптації каскадних кодів, призначений для забезпечення заданої достовірності передачі інформації безпроводових систем передачі даних при дії завад за рахунок динамічного синтезу комбінованих структур каскадних кодів в умовах апіорної невизначеності.

2. Комбінована структура побудови каскадних кодів разом з технологією OFDM дозволяє незалежно адаптувати швидкість кодування кожного з каскадів кодування залежно від результатів аналізу достовірності інформації в цьому каскаді, що приводить до забезпечення заданої достовірності передачі інформації, при цьому пропускна спроможність БСПД зменшується на 4–12% проти 20–35% відомих результатів.

3. Використання кодів Ріда-Соломона в послідовній каскадній схемі з турбокодами за рахунок адаптації швидкості кодування цієї каскадної конструкції дозволяє одержати енергетичний вииграш 0,5–0,7 дБ без збільшення пропускної спроможності системи передачі в порівнянні з системами, які використовують тільки турбокоди.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Растрингин Л.А. (1981). Адаптация сложных систем. Рига: Зинатне. 375 с.
2. Zaitsev S.V., Kazymyr V.V. (2017). Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty. *Radioelectronics and Communications Systems*. Vol. 60. P. 18–27.
3. Bae J., Abotabl A., Lin H.P., Song K.B., Lee J. (2019). An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*. P. 1-14. DOI: 10.1017/ATSIP.2019.10.
4. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.Я. (1981). Адаптивное управление динамическими объектами. М. : Наука. 448 с.

*Стаття надійшла до редакції 17.05.2023 і прийнята до друку після рецензування 04.09.2023*

## REFERENCES

1. Rastrigin, L.A. (1981). Adaptation of complex systems. Riga: Zinatne [in Russian].
2. Zaitsev, S.V., & Kazymyr, V.V. (2017). Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty. *Radioelectronics and Communications Systems*, 60, 18–27.
3. Bae, J., Abotabl, A., Lin, H.P., Song, K.B., & Lee, J. (2019). An overview of channel coding for 5G NR cellular communications. *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, 1-14. <https://doi.org/10.1017/ATSIP.2019.10>
4. Fomin, V.N., Fradkov, A.L., & Yakubovich, V.Ya. (1981). Adaptive control of dynamic objects. Moscow: Science [in Russian].

*The article was received 17.05.2023 and was accepted after revision 04.09.2023*

### **Зайцев Сергій Васильович**

доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

**Адреса робоча:** 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-6643-917X> **e-mail:** [szaitsev@tu.kielce.pl](mailto:szaitsev@tu.kielce.pl)

### **Василенко Владислав Михайлович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

**Адреса робоча:** 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-8156-1894> **e-mail:** [vladvasilenko9@gmail.com](mailto:vladvasilenko9@gmail.com)

### **Триснюк Тарас Васильович**

кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту телекомунікацій та глобального інформаційного простору НАН України

**Адреса робоча:** 03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0002-3672-8242> **e-mail:** [taras24t@gmail.com](mailto:taras24t@gmail.com)

### **Сокоринська Наталя Василівна**

старший науковий співробітник Центрального науково-дослідного інституту Збройних Сил України

**Адреса робоча:** 03049, м. Київ, просп. Повітрофлотський, 28 б

ORCID ID: <http://orcid.org/0000-0001-9713-7289> **e-mail:** [sokor-nata@ukr.net](mailto:sokor-nata@ukr.net)