

# ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕКОНОМІЦІ

УДК 621.391

<http://orcid.org/0000-0002-9993-2427>  
<http://orcid.org/0000-0001-6643-917X>

**Б. В. ГОРЛИНСЬКИЙ, С. В. ЗАЙЦЕВ**

## МЕТОД ПІДГОТОВКИ ПЕРВИННОЇ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ АДАПТИВНИХ БЕЗПРОВОДОВИХ ЗАСОБІВ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ

***Анотація.** Запропоновано метод підготовки первинної інформації для адаптивних безпроводових засобів передачі даних для забезпечення заданих показників достовірності інформації та підвищення їх ефективності.*

***Ключові слова:** достовірність інформації, безпроводові засоби передачі даних, завадостійкі коди, турбо код, адаптація, алгоритми декодування, завади.*

**DOI: 10.35350/2409-8876-2019-17-4-5-15**

### Вступ

Безпроводові засоби передачі даних (БЗПД) забезпечують обмін даними між абонентами, що можуть виконувати єдине завдання в умовах активного радіоелектронного впливу. Тому важливим показником, що характеризує ефективність функціонування таких БЗПД, є здатність забезпечувати задану достовірність прийому інформації в умовах впливу завад різного походження, у тому числі і навмисних, які характеризуються високою спектральною щільністю потужності. Ефективним напрямком протидії завадам є застосування в БЗПД технологій розширення спектра сигналу та кодових конструкцій.

### 1. Сучасні методи забезпечення достовірності інформації в БЗПД

На даний час методи забезпечення достовірності інформації в БЗПД досить глибоко й широко досліджені в наукових працях вітчизняних та іноземних авторів, серед яких найбільш відомі наступні вчені: А. Г. Зюко, Д. Д. Кловський, М. Л. Теплов, Л. М. Фінк, Л. Є. Варакін, В. Л. Банкет, В. В. Квашенников, В. І. Борисов, С. В. Зайцев, В. В. Казимир, К. Шеннон, Д. Форні, Ф. Дж. Мак-Вільямс, К. Берроу, Л. Хензо, А. Голдсміт, М. Валенті та ін. Зокрема, у роботах [1, 2] досліджуються схеми адаптації сигнально-кодових конструкцій (зміна позиційності сигналу та швидкості кодування завадостійкого коду) систем WiMax та LTE за первинними параметрами залежно від відношення сигнал-шум у каналі передачі. При цьому

розглядаються канали з адитивним білим гаусівським шумом, Релеївськими завмираннями, Райсовськими завмираннями та завмираннями Накагамі. В роботах інших авторів [3, 4] адаптація відбувається теж за рахунок зміни позиційності сигналу та швидкості кодування, але вже за вторинними параметрами – залежно від значень відношення сигнал-шум розраховуються значення ймовірності помилки для різних схем модуляції сигналу та здійснюється порівняння цього значення з заданими, і залежно від результатів порівняння здійснюється вибір необхідної сигнально-кової конструкції. В підході [5] для забезпечення достовірності інформації вирішено застосовувати адаптацію. В роботі [6] запропоновано оптимізацію перемежувача в структурі турбо коду. У цьому випадку енергетичний вииграш відбувається при відношенні сигнал-завада в області “порога помилок” ТК.

Недоліком зазначених схем адаптації є те, що вони не враховують під час адаптації застосування різних завадостійких кодів, від більш простих до більш складних, в залежності від відношення сигнал-шум в каналі, що може призвести до спрощення варіантів синтезу моделей БЗПД, особливо за умов нестаціонарних навмисних завад.

## 2. Загальна постановка задачі, об’єкт, предмет та мета досліджень

Забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД можна шляхом використання різних завадостійких кодів, від більш простих до більш складних, з урахуванням параметрів завад та використанням трьохкомпонентного турбо коду. Для цього пропонується розробити відповідний метод підготовки первинної інформації.

Таким чином, об’єктом досліджень є процеси формування і переробки кодованих даних у БЗПД, а предметом досліджень – методи забезпечення достовірності інформації у БЗПД. Мета досліджень – розробка методу підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД, що дозволить забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД та підвищити їх ефективність.

## 3. Методика і результати досліджень

В [7] отримані точні аналітичні залежності для розрахунку ймовірності бітової помилки в каналі зв’язку з адитивним білим гаусівським шумом (АБГШ), фазовою модуляцією (ФМ-М), квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ-М), розширенням спектра сигналу методом псевдовипадкової перестройки робочої частоти (ППРЧ) із врахуванням впливу навмисних завад, а також визначення оптимальної завади для розглянутих видів модуляції сигналу. В якості навмисних завад розглядається шумова загороджувальна завада (ШЗЗ), шумова завада в частині смуги (ШЗЧС) та завада у відповідь (ЗВ). Точні формули ймовірності бітової помилки для модуляції ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 відповідно при впливі ШЗЗ на систему радіозв’язку із ППРЧ мають вигляд:

– ФМ-2:

$$P_B = Q\left(\sqrt{2\left((h_0^2)^{-1} + (q)^{-1}\right)^{-1}}\right), \quad (1)$$

– ФМ-4:

$$P_B = Q \left( \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \frac{q}{2} \right)^{-1} \right)} \right), \quad (2)$$

– ФМ-8:

$$P_B = \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{\Lambda} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{\Lambda} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{\Lambda} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{\Lambda} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right), \quad (3)$$

$$\text{де } \Lambda = 6 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \frac{q}{3} \right)^{-1} \right)^{-1},$$

– КАМ-16:

$$P_B = \frac{1}{2} \left( 3Q(\sqrt{T}) + 2Q(3\sqrt{T}) - Q(5\sqrt{T}) \right), \quad (4)$$

$$\text{де } T = \frac{4}{9} \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \frac{q}{4} \right)^{-1} \right)^{-1}.$$

У виразах (1)–(4)  $h_0^2 = E_b / G_0$ ,  $E_b$  – енергія біта,  $G_0$  – спектральна щільність потужності шуму,  $q = \frac{K_s \cdot P_b}{P_j}$ ,  $P_b$  – потужність сигналу,  $P_j$  – потужність завади,  $K_s$  – коефіцієнт розширення спектра,

$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  – функція інтеграла ймовірності,

$T(h, a) = \frac{1}{2\pi} \int_0^a \exp\left[\left[-\frac{h^2}{2}(1+x^2)\right]\right] \frac{1}{1+x^2} dx$  – функція Д. Оуена, призначена

для обчислення функції двовимірного нормального розподілу.

Точні формули ймовірності бітової помилки для модуляції ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 при впливі ШЗЧЗ мають вигляд:

– ФМ-2:

$$P_{B1} = (1 - \gamma) Q(\sqrt{2h_0^2}) + \gamma Q \left( \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + (\gamma \cdot q)^{-1} \right)} \right), \quad (5)$$

– ФМ-4:

$$P_{B1} = (1 - \gamma) Q(\sqrt{2h_0^2}) + \gamma Q \left( \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \gamma \cdot \frac{q}{2} \right)^{-1} \right)} \right), \quad (6)$$

– ФМ-8:

$$P_{B1} = (1 - \gamma) \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right) +$$

$$+ \gamma \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{O} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{O} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{O} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{O} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right), \quad (7)$$

де  $O = 6 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \gamma \cdot \frac{q}{3} \right)^{-1} \right)^{-1}$ ,

– КАМ-16:

$$P_{B1} = (1 - \gamma) \left( \frac{1}{2} \left( 3Q \left( \sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) + 2Q \left( 3\sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) - Q \left( 5\sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) \right) \right) + \gamma \frac{1}{2} \left( 3Q(\sqrt{\Omega}) + 2Q(3\sqrt{\Omega}) - Q(5\sqrt{\Omega}) \right) \quad (8)$$

де  $\Omega = \frac{4}{9} \left( (h_0^2)^{-1} + \left( \gamma \frac{q}{4} \right)^{-1} \right)^{-1}$ .

У випадку впливу ЗВ точні формули ймовірності бітової помилки для модуляції ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 мають вид:

– ФМ-2, ФМ-4:

$$P_{B2} = (1 - \gamma) Q \left( \sqrt{2h_0^2} \right) + \gamma Q \left( \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + (h_j^2)^{-1} \right)^{-1}} \right), \quad (9)$$

– ФМ-8:

$$P_{B2} = (1 - \gamma) \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{6h_0^2} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right) + \gamma \frac{1}{3} \left( Q \left( \sqrt{\Theta} \sin \frac{\pi}{8} \right) + Q \left( \sqrt{\Theta} \sin \frac{3\pi}{8} \right) + 2 \left( T \left( \sqrt{\Theta} \sin \frac{\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{\pi}{8} \right) + T \left( \sqrt{\Theta} \sin \frac{3\pi}{8}, \operatorname{ctg} \frac{3\pi}{8} \right) \right) \right), \quad (10)$$

де  $\Theta = 6 \left( (h_0^2)^{-1} + (h_j^2)^{-1} \right)^{-1}$ ,  $h_j^2 = \frac{E_b}{G_j}$  – відношення енергії біта до спектральної

щільності потужності завади,

– КАМ-16:

$$P_{B2} = (1 - \gamma) \left( \frac{1}{2} \left( 3Q \left( \sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) + 2Q \left( 3\sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) - Q \left( 5\sqrt{\frac{4}{9} h_0^2} \right) \right) \right) + \gamma \frac{1}{2} \left( 3Q(\sqrt{\Psi}) + 2Q(3\sqrt{\Psi}) - Q(5\sqrt{\Psi}) \right), \quad (11)$$

де  $\Psi = \frac{4}{9} \left( (h_0^2)^{-1} + (h_j^2)^{-1} \right)^{-1}$ .

При впливі оптимальної ШЗЧС на БЗПД, максимальна середня ймовірність бітової помилки для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 буде дорівнювати відповідно:

– ФМ-2:

$$P_{B1MAX} \approx \frac{0,088}{q}, \quad q \geq 0,694, \quad (12)$$

– ФМ-4:

$$P_{B1_{MAX}} \approx \frac{0,176}{q}, q \geq 1,389, \quad (13)$$

– ФМ-8:

$$P_{B1_{MAX}} \approx \frac{0,4}{q}, q \geq 4,742, \quad (14)$$

– КАМ-16:

$$P_{b1_{max}} \approx \frac{2,397}{q}, q \geq 12,625. \quad (15)$$

При впливі оптимальної ЗВ на БЗПД, максимальна середня ймовірність бітової помилки для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16 буде мати наступний вигляд:

– ФМ-2, 4:

$$P_{B2_{MAX}} \approx 0,65 \cdot \exp \left( -0,44 \left[ \sqrt{2 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( 9 \cdot \frac{h_0^2}{32 \cdot h_0^2 - 9} \right)^{-1} \right)^{-1}} + 0,75 \right]^2 \right), \quad (16)$$

– ФМ-8:

$$P_{B2_{MAX}} \approx 0,433 \cdot \exp \left( -0,44 \left[ \sqrt{6 \left( (h_0^2)^{-1} + \left( 9 \cdot \frac{h_0^2}{14,016 \cdot h_0^2 - 9} \right)^{-1} \right)^{-1}} \sin \frac{\pi}{8} + 0,75 \right]^2 \right), \quad (17)$$

– КАМ-16:

$$P_{b_{max}} = 0,975 \cdot \exp \left[ -0,44 \left[ \sqrt{\left[ \left( (h_0^2)^{-1} + \left( 9 \cdot \frac{h_0^2}{7,04 \cdot h_0^2 - 9} \right)^{-1} \right)^{-1}} \right]^2 \cdot 0,44 + 0,75} \right]. \quad (18)$$

Визначимо ймовірність бітової помилки декодування при використанні кодів Боуза-Чоудхури-Хоквінгема (БЧХ), Ріда-Соломона та турбо кодів. При використанні кодів БЧХ і Ріда-Соломона розглядається демодулятор з “жорстким” рішенням, а при використанні турбо кодів – з “м’яким” рішенням.

Основними параметрами блокових кодів є [8]: число інформаційних бітів  $k$  і довжина коду  $n$ ; відносна швидкість коду  $R = k/n$ ; мінімальна кодова відстань  $d$ , рівна найменшому значенню відстані Хеммінга, яка являє собою число позицій, де кодові комбінації відрізняються одна від одної; максимальне число помилок, що виправляються, на довжині кодового слова  $S$ , пов’язане з  $d$  залежністю  $S = ((d-1)/2)$ , де  $[*]$  – ціла частина числа; надмірність коду, під якою розуміється параметр  $\alpha = R/n = 1 - R$ , що визначає частку надлишково переданих символів.

У випадку використання завадостійкого кодування в аналітичних залежностях для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16, КАМ-64 необхідно враховувати, що енергія каналного символу [8]:

$$E_c = \left(\frac{k}{n}\right) \cdot E_b = R \cdot E_b$$

Середня ймовірність бітової помилки декодування при використанні блокових кодів Хеммінга визначається наступним вираженням:

$$P_{B \text{ дек}} = P_B - P_B \cdot (1 - P_B)^{n-1}$$

де  $n$  – довжина кода,  $P_B$  – середня ймовірність бітової помилки для різних видів модуляцій при різних стратегіях постановки навмисних завад, яка розраховується для конкретної заводової обстановки.

Таким чином, середня ймовірність бітової помилки декодування з урахуванням впливу навмисних завад визначається

$$P_{B \text{ дек}} = P_B - P_B \cdot (1 - P_B)^{n-1}, \quad (19)$$

де  $P_B$  розраховується по (1)–(4) для ШЗЗ; по (5)–(8) для ШЗЧС; по (9)–(11) для ЗВ; по (12)–(15) для оптимальної ШЗЧС та по (16)–(18) для оптимальної ЗВ відповідно для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16.

При використанні кодів Ріда-Соломона середня ймовірність бітової помилки декодування визначається наступним аналітичним виразом:

$$P_{B \text{ дек}} = \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=d+1}^{2^m-1} \left[ \frac{(2^m - 1)!}{(2^m - 1 - j)! \cdot j!} \cdot j \cdot (P_B)^j \cdot (1 - P_B)^{2^m-1-j} \right],$$

де  $m$  – бітова послідовність кодового символу,  $d$  – кількість помилкових бітів у символі, які може виправити код,  $P_B$  – середня ймовірність бітової помилки для різних видів модуляцій при різних стратегіях постановки навмисних завад, яка розраховується для конкретної заводової обстановки.

Таким чином, середня ймовірність бітової помилки декодування з урахуванням впливу навмисних завад визначається:

$$P_{B \text{ дек}} = \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=d+1}^{2^m-1} \left[ \frac{(2^m - 1)!}{(2^m - 1 - j)! \cdot j!} \cdot j \cdot (P_B)^j \cdot (1 - P_B)^{2^m-1-j} \right], \quad (20)$$

де  $P_B$  розраховується за (1)–(4) для ШЗЗ; за (5)–(8) для ШЗЧС; за (9)–(11) для ЗВ; за (12)–(15) для оптимальної ШЗЧС та за (16)–(18) для оптимальної ЗВ відповідно для модуляцій ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16.

У випадку застосування турбо кодів значення середньої ймовірності бітової помилки декодування для заданої заводової обстановки отримуються тільки шляхом проведення імітаційного моделювання, тому що точних аналітичних співвідношень для визначення характеристик заводозахищеності не існує. В цьому випадку необхідно використовувати статистичну імітаційну модель, запропоновану в [9].

На наступному етапі розробимо метод підготовки первинної інформації для адаптивних безпроводових засобів передачі даних.

Метод призначений для вибору структури та параметрів кодів в адаптивних БЗПД, що дозволить забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД.

При реалізації методу визначимо такі обмеження:  $T^{(1)} = const$ , алгоритм декодування Max Log Map, швидкість кодування  $R \geq 1/5$ ; кількість декодерів в ітерації декодування два або три, модуляція ФМ-2, ФМ-4, ФМ-8, КАМ-16.

Метод реалізується в наступній послідовності:

1. Визначення вихідних даних: масив даних завод  $Z$ , масив даних фіксованих параметрів турбо коду  $T$ , масив даних змінних параметрів ТК  $T_v$ , масив даних параметрів кодів Хеммінга  $H$ , масив даних параметрів кодів Ріда-Соломона  $R$ , задана ймовірність бітової помилки декодування  $P_{V \text{ дек зад}}$ .

2. Розрахунок середньої ймовірності бітової помилки  $P_V$  для заданого виду модуляції сигналу та заданої стратегії постановки навмисних завод:

- для ШЗЗ за (1)–(4) відповідно з обраним видом модуляції;
- для ШЗЧС за (5)–(8) відповідно з заданим видом модуляції;
- для ЗВ за (9)–(11) відповідно з заданою модуляцією сигналу;
- для оптимальної ШЗЧС за (12)–(15) відповідно з обраною модуляцією;
- для оптимальної ЗВ за (16)–(18) відповідно з заданим видом модуляції.

3. Розрахунок середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{V \text{ дек}}$  для блокових кодів Хеммінга та заданої стратегії постановки навмисних завод за (19).

4. Порівняння  $P_{V \text{ дек}} \leq P_{V \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 5.

5. Розрахунок середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{V \text{ дек}}$  для кодів Ріда-Соломона та заданої стратегії постановки навмисних завод за (20).

6. Порівняння  $P_{V \text{ дек}} \leq P_{V \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 7.

7. За допомогою імітаційного моделювання визначення середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{V \text{ дек}}$  для двохкомпонентних турбо кодів та заданої стратегії постановки навмисних завод.

8. Порівняння  $P_{V \text{ дек}} \leq P_{V \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 9.

9. За допомогою імітаційного моделювання визначення середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{V \text{ дек}}$  для трьохкомпонентних турбо кодів та заданої стратегії постановки навмисних завод.

10. Порівняння  $P_{V \text{ дек}} \leq P_{V \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 11.

11. Зміна параметрів трьохкомпонентного турбо коду відповідно до масиву даних змінних параметрів турбо коду  $T_v$  та визначення за допомогою імітаційного моделювання середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{V \text{ дек}}$ .

12. Порівняння  $P_{V \text{ дек}} \leq P_{V \text{ дек зад}}$ . Якщо порівняння виконується, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 13.

13. Кількість змін параметрів закінчено? Якщо так, то виконується перехід до п. 14, якщо ні – до п. 11.

14. Визначення обраної кодової конструкції для заданої стратегії постановки навмисних завад.

На рис. 1 показана залежність ймовірності бітової помилки при модуляції ФМ-2, АБГШ та ШЗЧС ( $\gamma = 1$ ) при використанні блокових кодів Хеммінга (15,11), кодів Ріда-Соломона (31,21,5), двох- та трьохкомпонентних турбо кодів з псевдовипадковим перемежувачем,  $N = 1000$ , алгоритмом декодування *Max Log Map*, 8 ітерацій декодування, швидкістю кодування турбо коду  $R = 1/3$ .

Аналіз залежностей свідчить, що для забезпечення  $P_{V \text{ дек зад}} = 10^{-4}$  дБ відношення сигнал-завада складає: без кодування 9,2 дБ, при використанні кодів Хеммінга – 7,5 дБ, Ріда-Соломона – 4,3 дБ, двохкомпонентного турбо коду – 2,2 дБ, трьохкомпонентного ТК – 1,6 дБ. Таким чином, отримані енергетичні виграші в порівнянні з некодованою інформаційною послідовністю. Так, використання блокового коду підвищує енергетичну ефективність в 1,46 рази (1,7 дБ), використання коду Ріда-Соломона – в 3,09 рази (4,9 дБ), використання двох- та трьохкомпонентного турбо коду – в 5,01 та 5,75 разів (7,0 дБ та 7,6 дБ) відповідно, при забезпеченні заданого значення достовірності інформації в БЗПД.

Таким чином, у статті запропоновано метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД, що дозволить забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД, при цьому енергетичний виграш складає 0,8 дБ у порівнянні з відомими методами. Сутність методу полягає у використанні нових аналітичних залежностей визначення середньої ймовірності бітової помилки декодування для блокових кодів та кодів Ріда-Соломона, визначенні середньої ймовірності бітової помилки декодування для турбо кодів шляхом імітаційного моделювання для різних стратегій завад, порівнянні отриманих значень середньої ймовірності бітової помилки декодування з пороговим значенням та визначенні за запропонованим алгоритмом кодових конструкцій. Відмінність розробленого методу від існуючих, що визначає його новизну, полягає в збільшенні мірності простору кодів та завад, а також використанні нових аналітичних співвідношень для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки з урахуванням параметрів завад та використанні трьохкомпонентного турбо коду, що дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД.



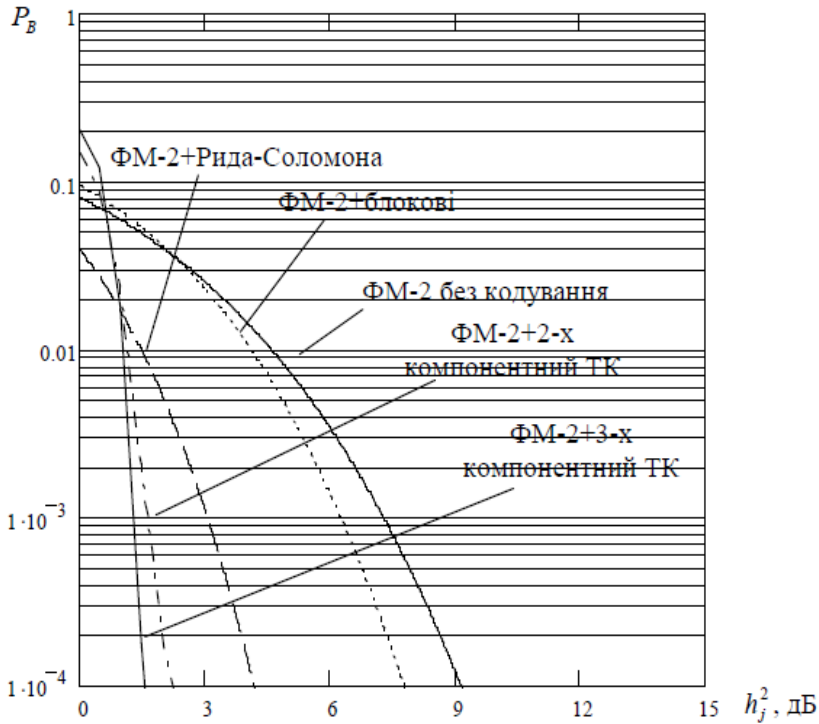


Рисунок 1 – Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки від відношення сигнал-завада для різних типів кодів

Ефект від впровадження полягає в тому, що використання методу за рахунок впровадження отриманих нових аналітичних залежностей із врахуванням параметрів завад дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД, при цьому енергетичний вигравш кодування за рахунок використання трьохкомпонентного турбо коду складає 0,8 дБ.

### Висновки

1. На основі нових аналітичних залежностей для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки для кодових конструкцій розроблено метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД.

2. Результати моделювання характеристик достовірності адаптивних БЗПД з використанням методу за рахунок впровадження отриманих нових аналітичних залежностей із врахуванням параметрів завад дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД, при цьому енергетичний вигравш кодування за рахунок використання трьохкомпонентного турбо коду складає 0,8 дБ у порівнянні з відомими методами.

3. Напрямок подальших досліджень вважається вдосконалення методу на випадок впливу навмисних завад при завмираннях сигналу та багатопробному поширенні радіохвиль.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Zhenhuan W. Layered Adaptive Modulation and Coding For 4G Wireless Networks / W. Zhenhuan // Thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Electrical and Computer Engineering. – Waterloo, Ontario, Canada, 2011. – 49 p.
2. Jihoon K. A Simple SNR Representation Method for AMC Schemes of MIMO Systems with ML Detector / K. Jihoon, L. Kyoung-Jae, S. Chang Kyung, L. Inkyu // IEEE Transactions on Communications. – 2009. – Vol. 57, N 10. – P. 2971–2976.
3. Liang Huang J. Adaptive MIMO Systems with Channel State Information at Transmitter / J. Liang Huang // PhD Thesis, KTH School of Information and Communication Technology. – Stockholm, 2009. – 79 p.
4. Goldsmith A. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels / A. Goldsmith, S. Chua // IEEE Transactions on Communications. – 1997. – Vol. 45, N 10. – P. 1218–1230.
5. Zaitsev S. V. Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr // Radioelectronics and Communications Systems. – Springer, 2017. – Vol. 60. – P. 18–27.
6. Zaitsev S. V. Adaptive selection of parameters of s-random interleaver in wireless data transmission systems with turbo coding / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr, V. M. Vasilenko, A.V. Yarilovets // Radioelectronics and Communications Systems. – Allerton Press, Inc. – New York, 2018. – Vol. 61. – P. 13–21. DOI: 10.3103/S0735272715050039.
7. Дослідження впливу навмисних завад на відомчі системи радіозв'язку при когерентному прийомі сигналів для каналів зв'язку з білим шумом / С. П. Лівенцев, С. В. Зайцев, Б. В. Горлинський // Збірник наукових праць ВІПІ НТУУ “КПІ”. – 2007. – Вип. 3. – С. 37–44.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Скляр Б. – [2-е изд]. – М.: Вильямс, 2003. – 1104 с.
9. Свідцтво про реєстрацію авторського права на твір № 33677. Комп'ютерна програма «Имитационная модель физического уровня программируемой радиостанции с многокомпонентными турбо кодами» / Горлинський Б.В., Зайцев С.В., Лівенцев С.П.; зареєстроване 10.06.2010.

## REFERENCES

1. Zhenhuan W. Layered Adaptive Modulation and Coding For 4G Wireless Networks / W. Zhenhuan // Thesis presented to the University of Waterloo in fulfillment of the thesis requirement for the degree of Master of Applied Science in Electrical and Computer Engineering. – Waterloo, Ontario, Canada, 2011. – 49 p.
2. Jihoon K. A Simple SNR Representation Method for AMC Schemes of MIMO Systems with ML Detector / K. Jihoon, L. Kyoung-Jae, S. Chang Kyung, L. Inkyu // IEEE Transactions on Communications. – 2009. – Vol. 57, N 10. – P. 2971–2976.
3. Liang Huang J. Adaptive MIMO Systems with Channel State Information at Transmitter / J. Liang Huang // PhD Thesis, KTH School of Information and Communication Technology. – Stockholm, 2009. – 79 p.
4. Goldsmith A. Variable-rate variable-power MQAM for fading channels / A. Goldsmith, S. Chua // IEEE Transactions on Communications. – 1997. – Vol. 45, N 10. – P. 1218–1230.
5. Zaitsev S. V. Structural adaptation of the turbo code coder and decoder for generating the transmission repeat request under conditions of uncertainty / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr // Radioelectronics and Communications Systems. – Springer, 2017. – Vol. 60. – P. 18–27.

6. Zaitsev S. V. Adaptive selection of parameters of s-random interleaver in wireless data transmission systems with turbo coding / S. V. Zaitsev, V. V. Kazymyr, V. M. Vasilenko, A. V. Yarilovets // Radioelectronics and Communications Systems. – Allerton Press, Inc. – New York, 2018. – Vol. 61. – P. 13–21. DOI: 10.3103/S0735272715050039.
7. Investigation of the effect of intentional interference on departmental radio systems with coherent signal reception for white noise channels / S. P. Liventsev, S. V. Zaitsev, B. V. Horlynskyi // Zbirnyk naukovy'x prac' VITI NTUU "KPI". – 2007. – Vol. 3. – P. 37–44.
8. Bernard Sklar. Digital Communications: Fundamentals and Applications. – 2001, – 1104 pages.
9. Certificate of copyright registration of a work № 33677. Computer program «Simulation model of the physical layer of a programmable radio station with multicomponent turbo codes» / Horlynskyi B. V., Zaitsev S. V., Liventsev S. P.; registered 10.06.2010.

*Стаття надійшла до редакції 03.10.2019.*