

**НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ І ГЛОБАЛЬНОГО  
ІНФОРМАЦІЙНОГО ПРОСТОРУ**

**ГОРЛИНСЬКИЙ БОРИС ВІКТОРОВИЧ**

УДК 004.415.3:004.7(043)

**МЕТОДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ ІНФОРМАЦІЇ В  
БЕЗПРОВОДОВИХ ЗАСОБАХ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ЗА РАХУНОК  
АДАПТИВНОГО КОДУВАННЯ**

05.13.06 – інформаційні технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Київ – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України

**Науковий керівник**

доктор технічних наук, доцент  
**Зайцев Сергій Васильович**,  
Чернігівський національний технологічний  
університет Міністерства освіти і науки  
України, професор кафедри інформаційних та  
комп'ютерних систем

**Офіційні опоненти:**

доктор технічних наук, професор  
**Оксіюк Олександр Глібович**,  
Київський національний університет ім. Тараса  
Шевченка Міністерства освіти і науки України,  
завідувач кафедри кібербезпеки та захисту ін-  
формації

доктор технічних наук, доцент  
**Семко Віктор Володимирович**,  
Київський університет імені Бориса Грінченка  
Міністерства освіти і науки України,  
професор кафедри інформаційної та кібернети-  
чної безпеки

Захист відбудеться "28" січня 2020 р. о 13 год. 00 хв. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.255.01 в Інституті телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України (03186, м. Київ, Чоколівський бульвар, 13, ауд. 601).

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України (03186, м. Київ, Чоколівський бул., 13).

Автореферат розісланий " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 2019 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради,  
кандидат технічних наук



О.Г. Лебідь

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** 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.

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. Голдсмит, М. Валенті та ін.

Однак недостатньо досліджені та вимагають додаткового вивчення наступні задачі:

- створення нових та вдосконалення існуючих методів забезпечення достовірності інформації в БЗПД;

- розвиток, ефективне використання обчислювальних методів стосовно вирішення задач забезпечення достовірності, проектування, виготовлення та експлуатації об'єктів нової техніки та нових технологій;

- модифікація та спеціалізація існуючих обчислювальних методів з метою підвищення їх ефективності, створення і дослідження нових обчислювальних методів і алгоритмів, що враховують особливості функціонування БЗПД;

- розробка ефективних методів адаптивного завадостійкого кодування для забезпечення заданих характеристик достовірності інформації в каналах з підвищеним рівнем шуму та завадами з врахуванням нечітких правил прийняття рішень;

- в системах з параметричною адаптацією у випадку підвищення рівнів шумів та завад до певного рівня забезпечення заданих характеристик достовірності інформації стає неможливим, тому постає питання застосування багаторівневої адаптації, причому не тільки параметрів, а й структури кодів.

Тому у дисертації вирішується актуальна *науково-прикладна задача*, що має важливу наукову, практичну й технічну спрямованість при створенні перспективних БЗПД – *забезпечення достовірності інформації в БЗПД за рахунок розробки методів на основі адаптивного кодування*.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Напрямки досліджень дисертаційної роботи пов'язані з реалізацією розпорядження Кабінету Міністрів України від 15.05.2013 року №386-р «Про схвалення Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні». Дисертаційну роботу виконано згідно плану науково-дослідних робіт Інституту телекомунікацій і глобального інформаційного простору НАН України у рамках бюджетної

теми: «Розробка методологічних засад інтеграції інформаційно-комунікаційних систем на базі єдиної інформаційної платформи» (№ ДР 0117U000002), бюджетної програми направленої на розвиток державної системи спеціального зв'язку, а саме, науково-дослідна робота, шифр «Рута» (№ ДР 0117U000086Т) та дослідно-конструкторська робота, шифр «Турія» (№ ДР 0119U000009ЦТ), а також науково-дослідної роботи «Інформаційна технологія забезпечення сталої достовірності інформації в мережах Інтернету речей» (№ ДР 0118U006996).

**Мета дослідження.** Мета дисертаційної роботи полягає у підвищенні ефективності БЗПД в умовах впливу завад через забезпечення достовірності інформації за рахунок розробки методів на основі адаптивного кодування та їх використання.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1) Проаналізувати існуючі методи забезпечення достовірності інформації в БЗПД.

2) Розробити на основі адаптації кодових конструкцій метод забезпечення достовірності інформації в БЗПД.

3) Розробити та реалізувати у програмному виді обчислювальний метод нечіткого декодування багатокомпонентних турбо кодів в БЗПД.

4) Розробити метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД.

**Об'єкт дослідження** – процеси формування і переробки кодованих даних у безпроводових засобах передачі даних.

**Предмет дослідження** – методи забезпечення достовірності інформації в безпроводових засобах передачі даних.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених задач були використані такі методи: *для розроблення методу забезпечення достовірності інформації в БЗПД на основі адаптації кодових конструкцій* – методи теорії управління, кодування, прийняття рішень, адаптивних систем, оптимізації, зв'язку, теорії мереж Петрі; *для розробки обчислювального методу нечіткого декодування багатокомпонентних турбо кодів в БЗПД* – методи імітаційного моделювання, об'єктно-орієнтованого програмування, теорії ймовірності, математичної статистики, теорії завадостійкого кодування, теорії інформації, *для розробки методу підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД* – методи теорії модульованих сигналів, теорії завадостійкого кодування, теорії інформації.

### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше запропоновано метод забезпечення достовірності інформації в БЗПД на основі адаптації різних кодових конструкцій, що дозволить забезпечити задані показники достовірності інформації та зменшити кількість елементарних операцій цифрових сигнальних процесорів при цифровій обробці кодованих даних. Відмінність розробленого методу від існуючих, що визначає його новизну, полягає в застосуванні різних за структурою завадостійких кодів, від більш простих до більш складних, в залежності від відношення сигнал-шум в каналі, що призводить до забезпечення заданих характеристик достовірності інформації та спрощення варіантів синтезу моделей БЗПД, особливо за умов нестационарних навмисних завад.

2. Вперше запропоновано обчислювальний метод нечіткого декодування багатокомпонентних турбо кодів в БЗПД, що дозволить забезпечити задані

показники достовірності інформації та підвищити енергетичну ефективність БЗПД на 0,2–0,8 дБ у порівнянні з відомими методами. Розроблений метод, на відміну від наявних, використовує функції приналежності при розрахунку перехідних рекурсій та логарифмічних відношень функцій правдоподібності у алгоритмах декодування турбо кодів.

3. Вперше запропоновано метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД, що дозволить забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД, при цьому енергетичний вигащ складає 0,8 дБ у порівнянні з відомими методами. Розроблений метод, на відміну від наявних, збільшує мірність простору кодів та завад, а також використовує нові аналітичні співвідношення для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки з урахуванням параметрів завад та використання трьохкомпонентного турбо коду.

**Достовірність і обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій.** Обґрунтованість наукових положень, висновків і рекомендацій дисертаційних досліджень забезпечена коректними постановками завдань, використанням сучасного апробованого математичного апарата, математичною строгістю перетворень при одержанні аналітичних залежностей, а достовірність підтверджена результатами імітаційного моделювання та збіжністю отриманих результатів до відомих в окремих випадках.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає в тому, що наведені вище наукові результати у своїй сукупності створюють нову інформаційну технологію забезпечення достовірності інформації в БЗПД за рахунок адаптивного кодування, що дозволяє оптимізувати та підвищити ефективність застосування методів забезпечення достовірності інформації в БЗПД на етапах їх проектування, виготовлення і експлуатації.

Впровадження результатів роботи може дозволити:

- моделювати, визначати параметри та виготовляти БЗПД з використанням новітніх цифрових технологій;
- кількісно оцінювати методи забезпечення достовірності інформації в БЗПД в умовах різних завад;
- підвищувати достовірність інформації та енергетичну ефективність БЗПД;
- спростити та знизити вартість робіт при дослідженні, проектуванні і виготовленні БЗПД.

Отримані результати досліджень впроваджені в роботах Товариства з обмеженою відповідальністю «Інформаційна безпека» при розробці архітектури заводозахисних засобів передачі даних, Товариства з обмеженою відповідальністю «НікС» для моделювання та створення захищеної мережі передачі даних, що підтверджено відповідними актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Основні ідеї дисертації та отримані результати, як теоретичні, так і практичні (у тому числі конкретні реалізації цих результатів у вигляді програмних продуктів), належать особисто здобувачеві. Зі спільних публікацій особисто здобувачеві належить наступне: в [1] – аналіз методів модуляції та розширення спектру сигналу сучасних безпілотних авіаційних комплексів; в [4] – вибір кодових конструкцій та формалізація

процесу адаптивної зміни структури кодів; в [5] – отримання основних аналітичних залежностей; в [6,7] – дослідження основних алгоритмів декодування турбо кодів, отримання аналітичних залежностей для розрахунку кількості елементарних операцій цифрового сигнального процесора для реалізації декодування; в [8] – імітаційне моделювання та визначення оптимальних параметрів турбо кода; в [9] – математичне моделювання впливу завад на відомчі системи радіозв'язку; в [11] – запропоновано використання функцій приналежності в алгоритмах декодування турбо кодів; в [14-16] – моделювання характеристик достовірності інформації з використанням різних алгоритмів декодування турбо кодів.

Зі спільних публікацій у дисертаційну роботу включені тільки результати, отримані автором самостійно.

**Апробація результатів роботи.** Основні наукові результати досліджень доповідалися на 19-й міжнародній науково-практичній конференції «Безопасность информации в информационно-телекоммуникационных системах» (м. Київ, 2017 р.), 12-й міжнародній науково-практичній конференції «Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2017» (м. Чернігів, 2017 р.), 18-й міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях» (м. Київ, 2019), науково-практичній конференції «Інформаційно–телекомунікаційні системи і технології та кібербезпека: нові виклики, нові завдання» (м. Київ, 2019).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані у 16 наукових роботах, у тому числі 9 статтях, з них 5 статей у наукових виданнях, які входять до міжнародних наукометричних баз, 4 статті у фахових виданнях України з технічних наук, 2 патенти на корисну модель, 1 авторське свідоцтво на комп'ютерну програму, 4 публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій, 2 статті опубліковано без співавторів.

**Структура і обсяг дисертаційної роботи.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг роботи складає 205 сторінок друкованого тексту, у тому числі містить 44 рисунки, 17 таблиць, список використаних джерел, що містить 148 найменувань.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

У **вступі** обґрунтовано актуальність проведених у дисертаційній роботі досліджень, сформульовані наукова задача та мета роботи, основні напрямки її розв'язання та завдання дослідження, зв'язок з науковими програмами. Зазначено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведені відомості про апробацію результатів дослідження, публікації та реалізацію основних результатів, отриманих у роботі.

**Перший розділ** присвячено аналізу сучасного стану й перспектив розвитку БЗПД, основних факторів, що призводять до зниження достовірності передачі інформації в БЗПД, аналізу існуючих методів забезпечення достовірності інформації в БЗПД, а також постановці завдань, які вирішуються в дисертаційній роботі.

Проведений аналіз сучасного стану й перспектив розвитку БЗПД виявив необхідність забезпечення в них достовірності інформації та підвищення їх енергетичної ефективності за рахунок розробки відповідних методів на основі адаптивного кодування, та їх використання.

Проаналізовано основні фактори, що призводять до зниження достовірності передачі інформації в БЗПД та встановлено, що найбільш істотний вплив на характеристики переданих сигналів здійснюють швидкі селективні завмирання в каналі та потужні природні і навмисні завади, які являють обмежений по смузі частот адитивний білий гаусівський шум (АБГШ) з підвищеним рівнем спектральної щільності потужності.

На основі аналізу існуючих методів забезпечення достовірності інформації в БЗПД було зроблено висновок, що перспективними напрямками підвищення достовірності інформації є застосування адаптивних систем, кодових конструкцій на основі турбо кодів, кодів Боуза-Чоудхури-Хоквінгема (БЧХ), кодів Ріда-Соломона, технологій розширення спектра сигналу та технології *MIMO* (*Multiple Input – Multiple Output*).

В **другому розділі** формалізовано процес адаптивної зміни структури кодів в БЗПД за допомогою якого розроблено метод забезпечення достовірності інформації в БЗПД на основі адаптації кодових конструкцій.

На рис. 1 представлена структурна схема системи забезпечення достовірності інформації в БЗПД на основі адаптації кодових конструкцій, що складається з модуля об'єкта управління, модуля заданої достовірності, модуля поточної достовірності, модуля фіксованих параметрів турбо коду, модуля оцінки каналу, модуля критеріальної оцінки, модуля адаптації.

До складу об'єкта управління входять: джерело даних (приймач даних) – буферний пристрій, кодек турбо коду (блокового коду, коду Ріда-Соломона), модем сигналів фазової модуляції, квадратурної амплітудної модуляції.

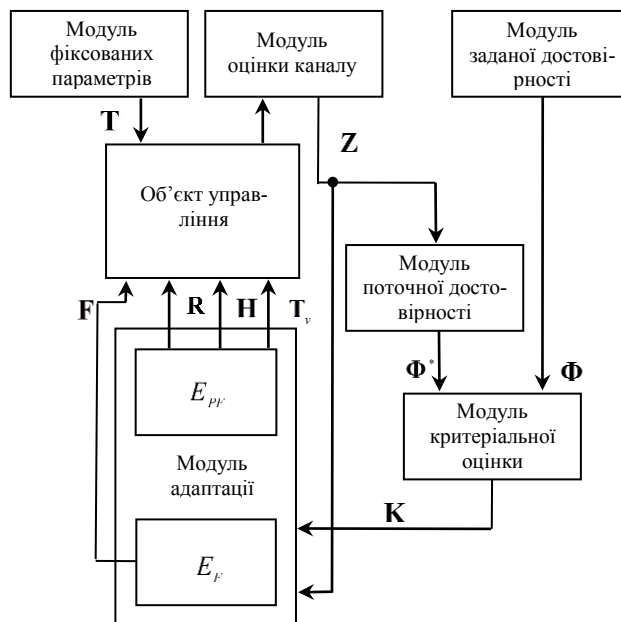


Рис. 1. Структурна схема системи забезпечення достовірності інформації в БЗПД на основі адаптації кодових конструкцій

В якості оцінки достовірності інформації в роботі прийнята середня ймовірність бітової помилки інформаційної послідовності  $P_B = E_b / G_0$ , де  $E_b$  – енергія сигналу, що припадає на один біт,  $G_0$  – спектральна щільність потужності адитивного білого гаусівського шуму.

Модуль заданої достовірності містить запрограмоване значення заданої середньої ймовірності бітової помилки, яке передається до модуля критеріальної оцінки у вигляді масиву даних  $\Phi = (\varphi_1)$ , де елемент  $\varphi_1$  відповідає заданій середній ймовірності бітової помилки прийнятої послідовності біт даних  $P_{B \text{ зад}}$ , що відповідає певному відношенню сигнал-завада.

Модуль оцінки каналу, аналізуючи стан каналу зв'язку з використанням послідовності з об'єкта управління, формує масив даних  $\mathbf{z} = (z_1, z_2, z_3, z_4)$ , де елемент  $z_1$  – вид навмисної завади; елемент  $z_2$  – параметр завади  $\gamma$ ; елемент  $z_3$  – відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності шуму  $h_0^2 = E_b / G_0$  (відношення сигнал-шум); елемент  $z_4$  – відношення енергії сигналу до спектральної щільності потужності завади (відношення сигнал-завада)  $q = E_b / G_j = K_s P_b / P_j$  – для шумової завади в частині смуги (ШЗЧС), ( $h_j^2 = E_b / G_j$  – для завади у відповідь (ЗВ), де  $K_s$  – коефіцієнт розширення спектра сигналу,  $P_b$  – потужність сигналу,  $P_j$  – потужність завади. Масив даних  $\mathbf{z}$  поступає до модуля поточної достовірності та модуля адаптації.

По значенням елементів масиву даних  $\mathbf{z}$  у модулі поточної достовірності формується масив даних  $\Phi^* = (\varphi_1^*)$ , де елемент  $\varphi_1^*$  відповідає поточній середній ймовірності бітової помилки прийнятої послідовності  $P_B$ , що відповідає певному відношенню сигнал-завада. Масив даних  $\Phi^*$  надходить до модуля критеріальної оцінки.

Модуль критеріальної оцінки, аналізуючи  $\Phi$  та  $\Phi^*$ , визначає поточне значення показника забезпечення достовірності інформації, тобто виконує порівняння  $P_B \leq P_{B \text{ зад}}$  або  $P_B > P_{B \text{ зад}}$ . Результат аналізу передається у вигляді масиву даних  $\mathbf{k} = (k_1, k_2, \dots, k_s)$  розмірності  $s$  до модуля адаптації. Елементи масиву даних  $\mathbf{k}$  відповідають критерію оцінки поточної середньої ймовірності бітової помилки.

Модуль визначення фіксованих параметрів містить запрограмовані параметри завадостійких кодів, які будуть незмінними для турбо кодів та начальними для кодів Ріда-Соломона та блокових кодів при функціонуванні БЗПД в умовах впливу завад. Для багатокomпонентного турбо коду значення цих параметрів передається до кодека турбо коду у вигляді масиву даних фіксованих параметрів турбо коду  $\mathbf{T}^{(1)} = (t_1^{(1)}, t_2^{(1)}, t_3^{(1)}, t_4^{(1)}, t_5^{(1)})$ , де  $t_1^{(1)}$  – кількість ітерацій декодування  $l$ ;  $t_2^{(1)}$  – розмір кадру переданої бітової послідовності  $N$ ;  $t_3^{(1)}$  – тип використовуваного перемежувача/деперемежувача;  $t_4^{(1)}$  – алгоритм декодування турбо коду;  $t_5^{(1)}$  – обмеження довжини рекурсивного систематичного згортного коду (РСЗК)  $k$ . Для блочного коду масив даних начальних параметрів буде таким:  $\mathbf{T}^{(2)} = (t_1^{(2)}, t_2^{(2)}, t_3^{(2)})$ , де  $t_1^{(2)}$  – кількість інформаційних біт  $k$ ,  $t_2^{(2)}$  – кількість біт в кодовому слові  $n$ ;  $t_3^{(2)}$  – здатність коду виправляти помилки  $t$ . Для коду Ріда-Соломона масив даних начальних параметрів буде мати



наступний вид:  $\mathbf{T}^{(3)} = (t_1^{(3)}, t_2^{(3)}, t_3^{(3)}, t_4^{(3)})$ , де  $t_1^{(3)}$  – кількість інформаційних біт  $k$ ;  $t_2^{(3)}$  – кількість біт в кодовому слові  $n$ ;  $t_3^{(3)}$  – здатність коду виправляти помилки  $t$ ,  $t_4^{(3)}$  – кількість біт в символі  $m$ .

Модуль адаптації містить множини сигнальних структур  $E_F$  і множини структур турбо коду, коду Ріда-Соломону та блочного коду  $E_{PF}$ , які формуються на етапі проектування БЗПД. У модулі адаптації по відповідному значенню елементів масивів даних  $\mathbf{K}$  та  $\mathbf{Z}$  відбувається вибір з множин  $E_F$  та  $E_{PF}$  сигнальної структури, яка представлена у вигляді масиву даних  $\mathbf{F} = (f_1, f_2)$ , а також структури турбо коду, представлених масивом даних  $\mathbf{T}_v = (t_{v1}, t_{v2}, \dots, t_{vh})$  розмірності  $h$ , структури коду Ріда-Соломону у вигляді масиву даних  $\mathbf{r} = (r_1, r_2, \dots, r_j)$  розмірності  $j$  та структури блокових кодів Хеммінга у вигляді масиву даних  $\mathbf{h} = (h_1, h_2, \dots, h_l)$  розмірності  $l$ . Масив даних  $\mathbf{F}$  містить наступні елементи:  $f_1$  – вид модуляції сигналу;  $f_2$  – розмірність сигнального сузір'я  $M$  (значення комплексної амплітуди радіосигналів) застосовуваного виду модуляції. Елементами масиву даних структури  $\mathbf{T}_v$  є:  $t_{v1}$  – кількість компонентних кодерів (декодерів) турбо коду;  $t_{v2}$  – параметр декодування  $\mu'$  (RMSE);  $t_{v3}$  – швидкість кодування турбо коду;  $t_{v4}$  – поліном зворотного зв'язку РСЗК турбо коду  $g_0$ ;  $t_{v5}, \dots, t_{vh}$  – поліноми прямих зв'язків РСЗК турбо коду  $g_1, \dots, g_{h-4}$ . Елементами масиву даних  $\mathbf{r}$  є:  $r_1$  – бітова послідовність кодового символу  $m$ ;  $r_2$  – кількість помилкових біт у символі  $d$ . Елементи масиву даних  $\mathbf{h}$  наступні:  $h_1$  – довжина коду  $n$ ;  $h_2$  – число інформаційних біт  $k$ . Структура об'єкта управління адаптується до зміни заводої обстановки шляхом варіації масивів даних структури кодів.

Сутність методу полягає у комбінованій адаптації різних заводостійких кодів на основі кодів Ріда-Соломона, БЧХ-кодів та багатокомпонентних турбо кодів з метою забезпечення достовірності інформації та зменшення при цьому складності реалізації пристроїв кодування/декодування.

Алгоритм реалізації методу наступний.

1. Визначення масивів даних фіксованих параметрів для турбо коду, БЧХ-коду та коду Ріда-Соломона:  $\mathbf{T}^{(1)} = (t_1^{(1)}, t_2^{(1)}, t_3^{(1)}, t_4^{(1)}, t_5^{(1)})$ ,  $\mathbf{T}^{(2)} = (t_1^{(2)}, t_2^{(2)}, t_3^{(2)})$ ,  $\mathbf{T}^{(3)} = (t_1^{(3)}, t_2^{(3)}, t_3^{(3)}, t_4^{(3)})$ .

2. За показник оптимальності процесу адаптації виберемо квадрат сумарної помилки (відхилення регульованої величини від заданої):

$$J = e_d^2(t), \quad (1)$$

де  $e_d^2(t)$  – динамічна помилка  $e_d^2(t) = P_{\text{пом}}(t) - P_{\text{пом потр}}$

3. Уведемо деякі обмеження. Так, при аналізі вважатимемо, що число похідних  $P_{\text{пом}}(t)$  обмежено, а характеристики випадкових дій (навмисних завод) відомі з точністю до параметрів. Крім того, вважатимемо, що зміна параметрів дій відбувається набагато повільніше в порівнянні з перехідними процесами в даній системі. Таким чином, система, яка розглядається відноситься до детермінованої.

4. Для реалізації принципу самоналаштування в методі застосований підхід, відповідно до якого знаходиться градієнт, що визначається виразом:

$$\nabla J(\mathbf{U}) = \left[ \frac{\partial J}{\partial u_1}, \frac{\partial J}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial J}{\partial u_N} \right], \quad (2)$$

де  $u_i$  – регульовані параметри управляючого пристрою, число яких дорівнює  $N$ .

Якщо  $J(\mathbf{U})$  допускає диференціювання, то він досягає екстремуму тільки при таких значеннях  $\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_N)$ , для яких  $N$  часткових похідних  $\frac{\partial J(\mathbf{U})}{\partial u_v}$ ,

$v = \overline{1, N}$  одночасно перетворюються в нуль, або градієнт  $\nabla J(\mathbf{U}) = \left[ \frac{\partial J}{\partial u_1}, \frac{\partial J}{\partial u_2}, \dots, \frac{\partial J}{\partial u_N} \right]$  дорівнює нулю.

Таким чином, необхідною умовою оптимальності є рівність:

$$\nabla J(\mathbf{U}) = 0. \quad (3)$$

5. Основна ідея розв'язання рівняння (3) полягає в наступному. Представимо (3) у вигляді:

$$\mathbf{U} = \mathbf{U} - \xi \nabla J(\mathbf{U}), \quad (4)$$

де  $\xi$  – скаляр.

Будемо шукати оптимальний вектор  $\mathbf{U} = \mathbf{U}^*$  за допомогою послідовних наближень або ітерацій:

$$u_v[k] = u_v[k-1] - \xi[k] \nabla J(u_v[k-1]), \quad v = \overline{1, N}. \quad (5)$$

Значення  $\xi[k]$  визначають величину чергового кроку й залежать від номера кроку. Різні форми регулярних ітеративних методів відрізняються один від одного конкретним вибором  $\xi[k]$ .

Форма запису алгоритму адаптації може бути представлена різним рівнянням:

$$\Delta u[k-1] = u[k] - u[k-1] = -\xi[k] \nabla J(u[k-1]). \quad (6)$$

Алгоритм послідовних наближень або ітерацій наступний.

1. При переході від  $u_v[k-1]$  до  $u_v[k]$  робиться випадковий крок  $\gamma \xi[k]$ , де  $\xi$  – випадковий масив даних, рівномірно розподілений в  $n$ -вимірній одиничній сфері,  $\gamma$  – величина кроку. Перевіряється умова:  $J(u_v[k-1] - \gamma \xi[k]) < J(u_v[k-1])$ . Якщо так, то параметри системи змінюються відповідно встановленим масивом даних  $u_v[k]$ . В протилежному випадку здійснюється перехід до кроку 2.

2. Робиться наступний випадковий крок  $\gamma \xi[k]$  і в цьому випадку знову перевіряється умова  $J(u_v[k-1] - \gamma \xi[k]) < J(u_v[k-1])$ . Таким чином, відбувається рекурентний процес до тих пір, поки не буде виконана умова

$J(u_v[k-1] - \gamma \xi[n]) < J(u_v[k-1])$ . Якщо умова не виконана і перебрані всі елементи  $\mathbf{U}$ , здійснюється вибір наступного масиву даних параметрів  $\mathbf{U}$ . Здійснюється перехід до кроку 1.

3. Процедура пошуку мінімуму  $P_{\text{пом}}$  здійснюється таким чином: при початковому значенні  $u_1$  змінюється тільки складова  $u_2$  до тих пір, поки  $P_{\text{пом}}$  не досягне екстремального значення. Після цього здійснюються аналогічні зміни  $u_3$  до досягнення екстремуму й т.д. до  $u_N$ , потім весь цикл пошуку повторюється, починаючи з  $u_1$  до виконання умови  $\nabla J(\mathbf{U}) = 0, J(u_{k+1}) < J(u)$ .

4. Перевіряється виконання умови  $\nabla J(\mathbf{U}) = 0, J(u_{k+1}) < J(u)$  ( $P_{\text{пом}} \leq P_{\text{пом потр}}$ ).

При виконанні умови  $\nabla J(\mathbf{U}) = 0, J(u_{k+1}) < J(u)$  значення масиву даних  $\mathbf{U}$  залишаються незмінними.

При невиконанні умови  $\nabla J(\mathbf{U}) = 0, J(u_{k+1}) < J(u)$  проводиться новий цикл пошуку мінімуму  $P_{\text{пом}}$  з використанням іншого класу кодів, і алгоритм повторюється.

Таким чином для вибору масивів даних структури кодів необхідно розробити метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД.

Ефект від впровадження полягає в тому, що результати розрахунку складності реалізації методу забезпечення достовірності інформації в БЗПД на основі адаптивного кодування показали, що впровадження адаптивного вибору кодів Ріда-Соломона, БЧХ-кодів та багатокомпонентних турбо кодів для заданої ймовірності бітової помилки дозволили забезпечити задану достовірність інформації та зменшити кількість елементарних операцій цифрових сигнальних процесорів при цифровій обробці кодованих даних на 39-46 % у випадку впливу нестационарних навмисних завад при зміні відношення сигнал-завада з 6 до 1 дБ.

**В третьому розділі** на основі аналізу алгоритмів декодування, структури побудови турбо кодів розроблено обчислювальний метод нечіткого декодування багатокомпонентних турбо кодів в БЗПД.

Сутність методу полягає у використанні функцій приналежності та логарифмічних відношень функцій правдоподібності при декодуванні двох- та трьохкомпонентних турбо кодів за допомогою відомого алгоритму *Max Log Map*. При цьому за рахунок динамічної зміни функції приналежності при розрахунку перехідних метрік в алгоритмах декодування турбо кодів забезпечуються задані показники достовірності інформації та підвищується енергетична ефективність БЗПД.

При реалізації обчислювального методу визначимо такі обмеження:  $\mathbf{T}^{(1)} = \text{const}$ , алгоритм декодування *Max Log Map*, кількість декодерів в ітерації декодування два або три, фазова модуляція із розмірністю сигнального сузір'я 2 (ФМ-2).

Так як турбо код застосовується в каналах з підвищеним рівнем шуму (близько 2-3 дБ для каналу з АБГШ), то на приймальній стороні рішення визначаються в умовах невизначеності.

Процес декодування розглядається як задача пошуку оптимального рішення в умовах невизначеності:

$$Q(x, z, L_a) \rightarrow \min, \quad (7)$$

де  $Q(*)$  – показник оптимальності,  $x, z, L_a$  – відповідно послідовності переданих біт, вибірки білого гаусовського шуму, апріорна інформація про передані біти декодера турбо коду, представлена у вигляді функції правдоподібності.

Метод реалізується в наступній послідовності:

1. Визначення вихідних даних: масив даних завод  $Z$ , масив даних фіксованих параметрів турбо коду  $T$ , масив даних змінних параметрів турбо коду  $T_v$ , множина прийнятих каналних відліків систематичних та перевірочних символів  $Y$ , кількість декодерів в одній ітерації декодування.

2. Отримання кількісної оцінки невизначеності декодування, використовуючи зміни знаку апріорної-апостеріорної інформації декодерів турбо коду  $L_a^i(x_t^C) \rightarrow L_e^i(x_t^C)$ ,  $i \in \overline{1, D}$ , де  $D$  – кількість декодерів турбо коду по всім ітераціям декодування. Виконання циклу: якщо  $L_a^i(x_t^C)L_e^i(x_t^C) < 1$ , то  $F = F + 1$ ,  $i \in \overline{1, D}$ ,  $t \in \overline{1, N}$ , по всім декодерам та для всіх  $N$  біт блоку.

Нормалізуємо величину  $F$ :

$$F^* = \frac{F}{NI}, \quad (8)$$

де  $N$  – кількість біт в блоці,  $I$  – кількість ітерацій декодування. Принцип нечіткого ітеративного турбо декодування буде полягати в розрахунку математичного очікування показника оптимальності  $M_{F^*} = \frac{1}{L} \sum_i F_i^*$  на протязі вікна спостереження розміром  $L$  та змінення нечітких параметрів алгоритму декодування для досягнення нечіткої мети.

В якості показника оптимальності будемо використовувати середньоквадратичну похибку *RMSE (Root Mean Square Error)*:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_{h=1}^M (F_h^* - F_n^*)^2}, \quad (9)$$

де  $F_n^*$  – задане нормалізоване значення показника невизначеності.

Запишемо функції приналежності, які будемо використовувати в алгоритмі декодування *Max Log Map*:

$$\mu_{A,B}(RMSE) = \begin{cases} \varepsilon, & \text{у випадку } RMSE \leq \varepsilon, \\ p \pm \frac{p \cdot RMSE}{3}, & \text{у випадку } \varepsilon < RMSE \leq 0,5, \\ p \pm \frac{p \cdot RMSE}{5}, & \text{у випадку } 0,5 < RMSE \leq 0,7, \\ p \pm \frac{p \cdot RMSE}{10}, & \text{у випадку } 0,7 < RMSE \leq 1, \end{cases} \quad (10)$$

де  $\varepsilon$  – граничне значення середньоквадратичної помилки,  $p$  – заданий коефіцієнт (приймає значення від 0,5 до 1) (вибір усіх числових значень зумовлений емпіричним методом шляхом імітаційного моделювання).

3. Функцію приналежності будемо використовувати при розрахунку перехідної рекурсії в алгоритмах декодування турбо коду:

$$\Gamma_t^{1,n}(s', s) \sim \frac{1}{2} \cdot \left( x_t^C \cdot (L_a^{1,n}(x_t^C) \cdot \mu_M(RMSE) + L_c \cdot y_t^C) + L_c \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right), \quad (11)$$

$$\Gamma_t^{2,n}(s', s) \sim \frac{1}{2} \cdot \left( x_t^C \cdot (L_a^{1,n}(x_t^C) \cdot \mu_M(RMSE) + L_a^{2,n}(x_t^C) \cdot \mu_M(RMSE) + L_c \cdot y_t^C) + L_c \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right), \quad (12)$$

$$\Gamma_t^{3,n}(s', s) \sim \frac{1}{2} \cdot \left( x_t^C \cdot \left( L_a^{1,n}(x_t^C) \cdot \mu_M(RMSE) + L_a^{2,n}(x_t^C) \cdot \mu_M(RMSE) + L_a^{3,n}(x_t^C) \cdot \mu_M(RMSE) + L_c \cdot y_t^C \right) + L_c \cdot \sum_{i=1}^v y_t^{\Pi 2i} \cdot x_t^{\Pi 2i} \right), \quad (13)$$

де  $x_t^C, x_t^{\Pi 2i}, i \in (1, v)$  – відповідно систематичний символ кодера турбо коду і перевірені символи другого РСЗК до проходження каналу з флуктуаційним шумом і навмисними завадами;  $y_t^C, y_t^{\Pi 2i}, i \in (1, v)$  – систематичний символ кодера турбо коду і перевірені символи другого РСЗК після проходження каналу з флуктуаційним шумом і навмисними завадами;  $x_t^{\Pi 3i}, y_t^{\Pi 3i}, i \in (1, v)$  – перевірені символи третього РСЗК відповідно до проходження та після проходження каналу з флуктуаційним шумом і навмисними завадами;  $L_a^2(x_t^C)$  – апіорна інформація другого декодера;  $L_a^3(x_t^C)$  – апіорна інформація третього декодера;  $\mu_M(RMSE)$  – функція приналежності,  $L_c$  – параметр каналної «надійності», який враховує відношення сигнал-завада в каналі;  $v$  – кількість перевіреніх символів РСЗК,  $v = q - 1$ , де  $q$  – загальна кількість символів РСЗК (систематичний і перевірені).

4. Обчислення прямих рекурсій для прийнятого блоку для поточного декодера та ітерації декодування:

$$\tilde{A}_t^{1,n}(s) \approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}^{1,n}(s') + \Gamma_t^{1,n}(s', s)] - A_t^{1,n \max}(s), \quad (14)$$

$$\tilde{A}_t^{2,n}(s) \approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}^{2,n}(s') + \Gamma_t^{2,n}(s', s)] - A_t^{2,n \max}(s), \quad (15)$$

$$\tilde{A}_t^{3,n}(s) \approx \max_{s'} [\tilde{A}_{t-1}^{3,n}(s') + \Gamma_t^{3,n}(s', s)] - A_t^{3,n \max}(s). \quad (16)$$

5. Розрахунок зворотних рекурсій відповідно до поточного декодера та ітерації декодування для прийнятого інформаційного блоку:

$$\tilde{B}_{t-1}^{1,n}(s') \approx \max_s [\tilde{B}_t^{1,n}(s) + \Gamma_t(s', s)] - A_t^{1,n \max}(s), \quad (17)$$

$$\tilde{B}_{t-1}^{2,n}(s') \approx \max_s [\tilde{B}_t^{2,n}(s) + \Gamma_t(s', s)] - A_t^{2,n \max}(s), \quad (18)$$

$$\tilde{B}_{t-1}^{3,n}(s') \approx \max_s [\tilde{B}_t^{3,n}(s) + \Gamma_t(s', s)] - A_t^{3,n \max}(s). \quad (19)$$

6. Обчислення модифікованої «зовнішньої» інформації за виразами для поточного декодера, ітерації декодування та прийнятого інформаційного блоку:

$$L_e^{*1,n}(x_t^C) = L_e^{1,n}(x_t^C) \cdot \mu, \quad L_e^{*2,n}(x_t^C) = L_e^{2,n}(x_t^C) \cdot \mu, \quad L_e^{*3,n}(x_t^C) = L_e^{3,n}(x_t^C) \cdot \mu. \quad (20)$$

7. Перевірка умови. Чи останній декодер в ітерації? Якщо так, то перейти до п. 8. Якщо ні – до п. 3.

8. Перевірка умови. Чи остання ітерація декодування? Якщо так, то перейти до п. 9. Якщо ні – до п. 3.

9. Порівнюючи значення вихідного ЛВФП другого чи третього декодера з пороговим значенням, приймаються рішення про декодовані біти.

10. Перевірка умови (8). Якщо умова виконується, то значення елементів масиву даних  $T_v$  залишаються не змінними. Якщо умова (8) не виконується, то відбувається зміна масиву даних  $T_v$ .

Для оцінки ефективності запропонованого обчислювального методу була розроблена імітаційна модель, у якій зазначений метод реалізовано програмно.

Результати моделювання показані на рис. 2 та 3.

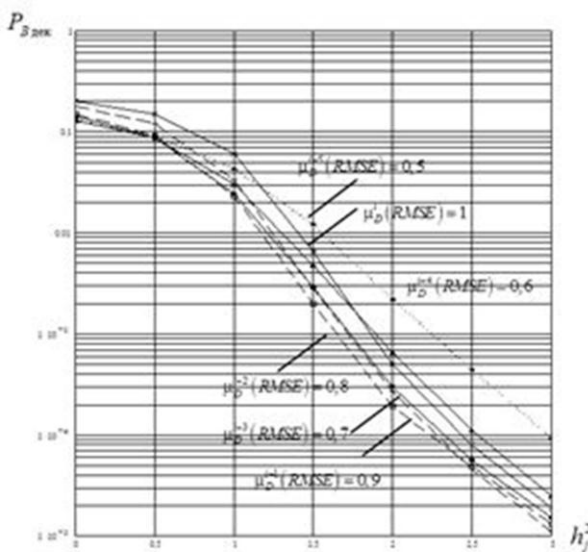


Рис. 2. Графік завадозахищеності для різних значень функцій приналежності та двокомпонентного кодека

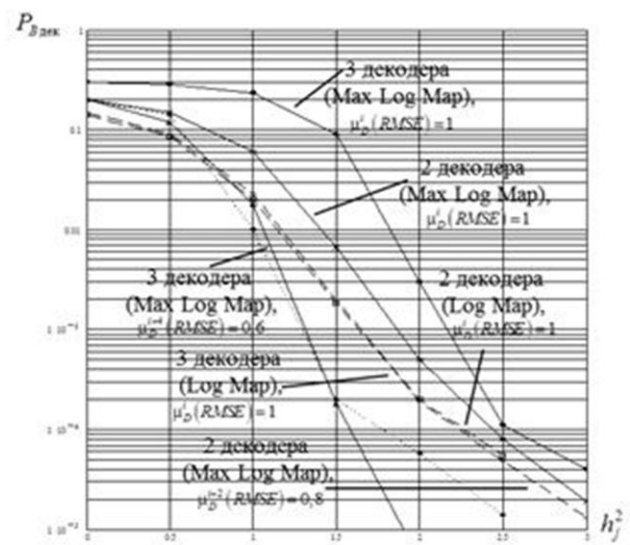


Рис. 3. Графік завадозахищеності для двох- та трьохкомпонентного кодека при різних значеннях функцій приналежності

На рис. 2 показано графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}}$  від відношення сигнал-завада  $h_j^2$  для різних значень параметрів  $\mu_D^i(RMSE)$  при використанні модуляції ФМ-2, турбо код з двома компонентними кодерами (декодерами), псевдовипадковим перемежувачем,  $N = 1000$ , алгоритмом декодування *Max Log Map*, 8 ітерацій декодування, швидкістю кодування турбо коду  $R = 1/3$  при впливі ШЗЧС ( $\gamma = 1$ ) і флуктуаційного шуму ( $h_0^2 = 9,58$  дБ). Аналіз отриманих даних показує, що вплив параметра  $\mu_D^{i+2}(RMSE) = 0,8$  в алгоритмі декодування *Max Log Map* дозволяє одержати енергетичний виграш 0,2 дБ в порівнянні з використанням параметру  $\mu_D^{i+2}(RMSE) = 1,0$  при забезпеченні заданого значення достовірності інформації в БЗПД.

Графік залежності середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}}$  від відношення сигнал-завада  $h_j^2$  для параметрів  $\mu_D^i(RMSE) = 1,0$  та  $\mu_D^{i+2}(RMSE) = \mu_{D, \text{опт}}^i$  при використанні модуляції ФМ-2, турбо код з двома та трьома компонентними кодерами (декодерами), псевдовипадковим перемежувачем,  $N = 1000$ , алгоритмом декодування *Max Log Map*, *Log Map*, 8 ітерацій декодування, швидкістю

кодування турбо коду  $R = 1/3$  при впливі ШЗЧС ( $\gamma = 1$ ) і флуктуаційного шуму ( $h_0^2 = const$ ) показаний на рис. 3. Аналіз отриманих даних показує, що використання трьохкомпонентного кодеку з алгоритмом декодування *Max Log Map* та параметром  $\mu_D^{i+4} (RMSE) = \mu_{D,opt}^i = 0,6$ , підвищує енергетичну ефективність в 1,2 разів (0,8 дБ) в порівнянні з використанням стандартного двохкомпонентного кодеку з алгоритмом декодування *Max Log Map* та параметром  $\mu_D^i (RMSE) = 1,0$  при забезпеченні заданого значення достовірності інформації в БЗПД.

Для вибору структури та параметрів кодів у **четвертому розділі** розроблено метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД.

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.

Представлено математичний апарат аналізу оптимальної стратегії завад, обґрунтовано ефективність застосування запропонованого методу.

Наприклад, у випадку використання кодів Ріда-Соломона середня ймовірність бітової помилки декодування визначається:

$$P_{B,дек} = \frac{1}{2^m - 1} \sum_{j=d+1}^{2^m-1} \left[ \frac{(2^m - 1)!}{(2^m - 1 - j)! \cdot j!} \cdot j \cdot (P_B)^j \cdot (1 - P_B)^{2^m - 1 - j} \right], \quad (21)$$

де  $m$  – бітова послідовність кодового символу,  $d$  – кількість помилкових біт 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 заводої обстановки. При впливі шумової загороджувальної завади, для модуляції ФМ-2:

$$P_B = Q\left(\sqrt{2\left((h_0^2)^{-1} + (q)^{-1}\right)^{-1}}\right), \quad (22)$$

де  $h_0^2 = \frac{E_b}{G_0}$ ,  $q = \frac{K_s \cdot P_b}{P_j}$ ,  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$  – функція інтеграла ймовірності,

У випадку застосування турбо кодів значення середньої ймовірності бітової помилки декодування для заданої заводої 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.

Метод реалізується в наступній послідовності:

1. Визначення вихідних даних.
2. Розрахунок середньої ймовірності бітової помилки  $P_B$  для заданого виду модуляції сигналу та заданої стратегії постановки навмисних завад.

Так, при впливі шумової завади в частині смуги, для фазової модуляції ФМ-4:

$$P_{B1} = (1-\gamma)Q(\sqrt{2h_0^2}) + \gamma Q\left(\sqrt{2\left((h_0^2)^{-1} + \left(\gamma \cdot \frac{q}{2}\right)^{-1}\right)^{-1}}\right), \quad (23)$$

де  $h_{02j}^2 = \frac{E_b}{G_0 + G_j / \gamma}$ , де  $\gamma$  – частина смуги частот, де є присутня завада,  $q = \frac{K_s \cdot P_b}{P_j}$ ,

$P_b$  – потужність сигналу,  $P_{jj}$  – потужність завади,  $K_s$  – коефіцієнт розширення спектру сигналу.

3. Розрахунок середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}}$  для блокових кодів Хеммінга та заданої стратегії постановки навмисних завад.

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

5. Розрахунок середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}}$  для кодів Ріда-Соломона та заданої стратегії постановки навмисних завад.

6. Порівняння  $P_{B \text{ дек}} \leq P_{B \text{ дек зад}}$ . 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  $P_{B \text{ дек}}$  для двохкомпонентних турбо кодів та заданої стратегії постановки навмисних завад.

8. Порівняння  $P_{B \text{ дек}} \leq P_{B \text{ дек зад}}$ . 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  $P_{B \text{ дек}}$  для трьохкомпонентних турбо кодів та заданої стратегії постановки навмисних завад.

10. Порівняння  $P_{B \text{ дек}} \leq P_{B \text{ дек зад}}$ . 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  $t$ , та визначення за допомогою імітаційного моделювання середньої ймовірності бітової помилки декодування  $P_{B \text{ дек}}$ .

12. Порівняння  $P_{B \text{ дек}} \leq P_{B \text{ дек зад}}$ . 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 завад.

На рис. 4. 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), 2-х та 3-х компонентних 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 використання методу за рахунок впровадження отриманих нових аналітичних залежностей із врахуванням параметрів завод дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД, при цьому енергетичний вигравш кодування за рахунок використання трьох компонентного турбо коду складає 0,8 дБ.

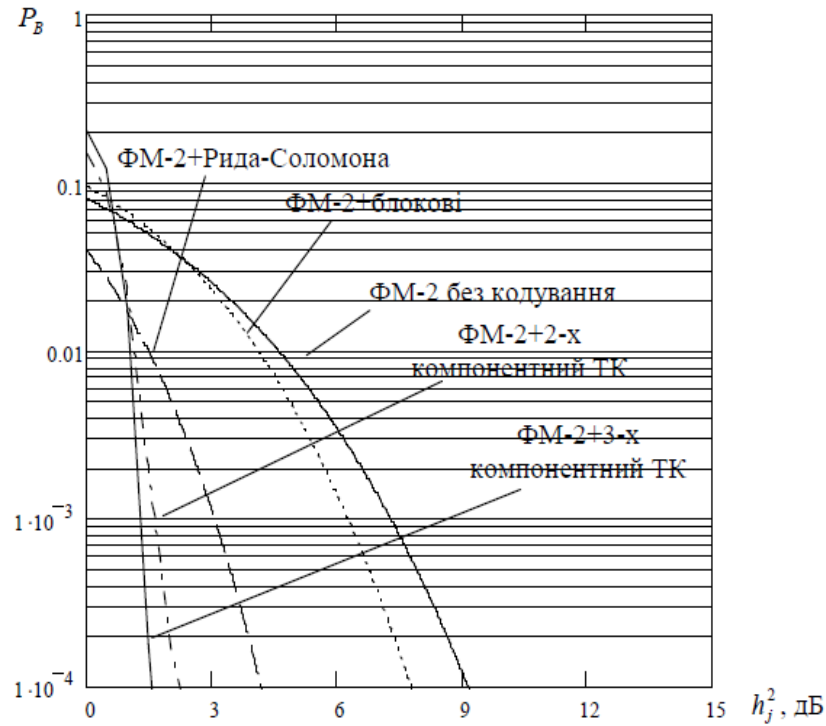


Рис. 4. Графік залежності середньої ймовірності біткової помилки від відношення сигнал-завада для різних типів кодів

**У висновках** викладені найбільш важливі наукові і практичні результати, отримані в роботі, сформульована вирішена наукова задача, обґрунтовано достовірність отриманих результатів і наведені рекомендації щодо їх наукового і практичного використання.

**У додатках** до роботи представлені документи, що підтверджують практичне використання результатів дисертаційної роботи.

## ВИСНОВКИ

У дисертації представлено нове рішення наукової задачі, що полягає в забезпеченні достовірності інформації в БЗПД за рахунок розробки методів на основі адаптивного кодування, які у своїй сукупності утворюють нову інформаційну технологію. Основні результати роботи такі:

1. Проведено аналіз існуючих методів забезпечення достовірності інформації в умовах апіорної невизначеності, аналіз сучасного стану БЗПД, який показав, що перспективним напрямком вирішення задачі забезпечення достовірності інформації в умовах апіорної невизначеності є застосування адаптації кодових конструкцій турбо кодів.

2. Розроблено метод забезпечення достовірності інформації в БЗПД на основі адаптації різних кодових конструкцій, що дозволяє забезпечити задані

показники достовірності інформації та зменшити кількість елементарних операцій цифрових сигнальних процесорів при цифровій обробці кодованих даних.

Відмінність розробленого методу від існуючих, що визначає його новизну, полягає в застосуванні різних за структурою завадостійких кодів, від більш простих до більш складних, в залежності від відношення сигнал-шум в каналі, що призводить до забезпечення заданих характеристик достовірності інформації та зменшення кількості елементарних операцій цифрових сигнальних процесорів при цифровій обробці кодованих даних на 39-46 % у випадку впливу нестационарних навмисних завад при зміні відношення сигнал-завада з 6 до 1 дБ.

3. Запропоновано обчислювальний метод нечіткого декодування багато компонентних турбо кодів в БЗПД, який, на відміну від наявних, використовує функції приналежності при розрахунку перехідних рекурсій та логарифмічних відношень функцій правдоподібності у алгоритмах декодування турбо кодів.

Використання методу за рахунок впровадження функцій приналежності дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації та підвищити енергетичну ефективність БЗПД на 0,2–0,8 дБ у порівнянні з відомими методами.

4. Запропоновано метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД, який, на відміну від наявних, збільшує мірність простору кодів та завад, а також використовує нові аналітичні співвідношення для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки з урахуванням параметрів завад та використанні трьох компонентного турбо коду.

Використання методу за рахунок впровадження отриманих нових аналітичних залежностей із врахуванням параметрів завад дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації в БЗПД, при цьому енергетичний виграш кодування за рахунок використання трьох компонентного турбо коду складає 0,8 дБ.

Результати досліджень можуть бути використані для забезпечення достовірності передачі інформації в БЗПД.

Результати впровадження підтверджені відповідними актами.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ РОБІТ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

*Праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Зайцев С. Дослідження методів підвищення достовірності інформації сучасних безпілотних авіаційних комплексів / Зайцев С., Башинська О., Камак Ю., Горлинський Б. // Технічні науки та технології. – 2016. – № 4 (6). – С. 97–106.

2. Горлинський Б.В. Інформаційна технологія синтезу моделей безпроводових засобів передачі даних на основі адаптивного кодування / Горлинський Б.В. // Математичні машини і системи / – 2017. – № 3. – С. 74–81.

3. Горлинський Б.В. Обчислювальний метод нечіткого декодування багатокомпонентних турбо кодів в безпроводових засобах передачі даних / Горлинський Б.В. // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 3 (16). С. 67–81.

4. Б.В. Горлинський. Формалізація процесу математичного моделювання адаптивної зміни структури кодів в безпроводових засобах передачі даних / Б.В. Горлинський, С.В. Зайцев, С.П. Казнадій, Л.І. Зайцева // Екологічна безпека та природокористування. – 2019. – Вип. 3 (31). – С. 64–78.

5. Горлинський Б.В. Метод підготовки первинної інформації для адаптивних безпроводових засобів передачі даних / Горлинський Б.В., Зайцев С.В. // Математичне моделювання в економіці. – 2019. – № 4. – С. 5–15.

6. С. П. Ливенцев. Анализ сложности Мар, Max Log Мар и Log Мар алгоритмов декодирования турбокодов при декодировании бита информации / С. П. Ливенцев, С. В. Зайцев, Б. В. Горлинский // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні. – 2006. – Вип. 1(12). – С. 125–134.

7. С. В. Зайцев. Оценка сложности реализации алгоритмов декодирования турбокодов, минимизирующих вероятность ошибочного бита, при декодировании бита информации на цифровых сигнальных процессорах / С. В. Зайцев, С. П. Ливенцев, Б. В. Горлинский // Правове, нормативне та метрологічне забезпечення систем захисту інформації в Україні. – 2006. – Вип. 2(13). – С. 183–188.

8. С. В. Зайцев. Имитационное моделирование характеристик помехоустойчивости системы передачи информации с турбокодами / С. В. Зайцев, С. П. Ливенцев, Б. В. Горлинский [и др.] // Зв'язок. – 2006. – № 7. – С. 38–42.

9. С. П. Ливенцев. Дослідження впливу навмисних завад на відомчі системи радіозв'язку при когерентному прийомі сигналів для каналів зв'язку з білим шумом / С. П. Ливенцев, С. В. Зайцев, Б. В. Горлинський // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. – 2006. – Вип. 3. – С. 37–44.

*Праці, що засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

10. Б.В. Горлинський. Комбінована адаптація блокових кодів та багатокомпонентних турбокодів в безпроводових системах передачі даних / Б.В. Горлинський // Безпека інформації у інформаційно-телекомунікаційних системах. Матеріали ХІХ Міжнародної науково-практичної конференції. – Київ, 25–26 травня 2017. – Вип. 19. – С. 215–216.

11. С.В. Зайцев. Модифікований метод декодування багатокомпонентних турбо кодів / С.В. Зайцев, Б.В. Горлинський // Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2017. Тези доповідей Дванадцятої міжнародної науково-практичної конференції. – Чернігів, 26–29 червня 2017. – С. 324–327.

12. Б.В. Горлинський. Математичне моделювання забезпечення достовірності безпроводових засобів передачі даних за рахунок адаптивного кодування / Б.В. Горлинський // Матеріали науково-практичної конференції «Інформаційно–телекомунікаційні системи і технології та кібербезпека: нові виклики, нові завдання». – Київ, 19–20 листопада 2019. – С. 142–143.

13. Горлинський Б.В. Нечітке декодування багатокомпонентних турбо кодів в безпроводових засобах передачі даних / Горлинський Б.В. // Сучасні інформаційні технології управління екологічною безпекою, природокористуванням, заходами в надзвичайних ситуаціях: актуальні питання // Колективна монографія за матеріалами ХVІІ Міжнародної науково-практичної

конференції (Київ, 01-02 жовтня 2019 р.) / За заг. ред. С.О. Довгого. – К.: ТОВ «Видавництво «Юстон», – 2019. –С. 155–158.

14. Пат. на корисну модель № 33338, МПК Н03М 13/37. Пристрій оптимізації процесу турбодекодування при низьких значеннях відношення сигнал-шум в каналі / Артюх О. І., Лівенцев С. П., Зайцев С. В., Кувшинов О. В., Горлинський Б. В.; заявл. 21.02.08; опубл. 25.06.08, Бюл. № 12.

15. Пат. на корисну модель № 52574, МПК Н03М 13/00. Пристрій перетворення логарифмічних відношень функцій правдоподібності в декодерах для прийняття рішення про прийнятий біт інформації / Зайцев С. В., Горлинський Б. В., Лівенцев С. П.; заявл. 12.04.10; опубл. 25.08.10, Бюл. № 16.

16. Свідоцтво 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.

## АНОТАЦІЯ

**Горлинський Б. В. Методи забезпечення достовірності інформації в безпроводових засобах передачі даних за рахунок адаптивного кодування.** – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.06 «Інформаційні технології». – Інститут телекомунікацій і глобального інформаційного простору Національної академії наук України, Київ, 2020.

Дисертація присвячена дослідженню актуальних проблем безпроводових засобів передачі даних, їх подальшого розвитку та підвищенню ефективності БЗПД в умовах впливу завад через забезпечення достовірності інформації за рахунок розробки методів на основі адаптивного кодування та їх використання.

Вперше запропоновано метод забезпечення достовірності інформації в БЗПД на основі адаптації різних кодових конструкцій, що дозволяє забезпечити задані показники достовірності інформації та зменшити кількість елементарних операцій цифрових сигнальних процесорів при цифровій обробці кодованих даних.

Відмінність розробленого методу від існуючих, що визначає його новизну, полягає в застосуванні різних за структурою завадостійких кодів, від більш простих до більш складних, в залежності від відношення сигнал-шум в каналі, що призводить до забезпечення заданих характеристик достовірності інформації.

Встановлено, що впровадження адаптивного вибору кодів Ріда-Соломона, БЧХ-кодів та багатокомпонентних турбо кодів для заданої ймовірності бітової помилки дозволило зменшити кількість елементарних операцій цифрових сигнальних процесорів при цифровій обробці кодованих даних на 39-46 % у випадку впливу нестационарних навмисних завад при зміні відношення сигнал-завада з 6 до 1 дБ.

Вперше запропоновано обчислювальний метод нечіткого декодування багатокомпонентних турбо кодів в БЗПД, який, на відміну від наявних, використовує функції приналежності при розрахунку перехідних рекурсій та логариф-

мічних відношень функцій правдоподібності у алгоритмах декодування турбо кодів.

Досліджено, що використання методу за рахунок впровадження функцій приналежності дозволяє одержати енергетичний вигравш 0,2–0,8 дБ у порівнянні з відомими методами.

Вперше запропоновано метод підготовки первинної інформації для адаптивних БЗПД, який, на відміну від наявних, збільшує мірність простору кодів та завад, а також використовує нові аналітичні співвідношення для розрахунку середньої ймовірності бітової помилки з урахуванням параметрів завад та використанні трьох компонентного турбо коду.

Досліджено, 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 трьох компонентного турбо коду складає 0,8 дБ у порівнянні з відомими методами.

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

## ANNOTATION

**Horlynskyi Borys. Methods for ensuring the reliability of information in the wireless data transmission device adaptive coding.** – Manuscript.

Dissertation research for degree of PhDs. by specialty 05.13.06 «Information Technologies». – Institute of Telecommunications and Global Information Space of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2020.

The dissertation is devoted to the research of topical problems of wireless data transmission device (WDTD), their further development, and increase of efficiency of WDTD in the conditions of interference of interferences by ensuring the reliability of information through the development of methods based on adaptive coding and their use.

For the first time, a method of ensuring the reliability of information in the WDTD is proposed based on the adaptation of different code structures, which allows to provide the specified indicators of information reliability and reduce the number of elementary operations of digital signal processors in digital processing of coded data.

The difference between the developed method and the existing one, which determines its novelty, is the application of different noise-resistant codes in the structure, from simpler to more complex ones, depending on the signal-to-noise ratio in the channel, which leads to providing the specified characteristics of the reliability of information.

It is established that the introduction of adaptive selection of Reed-Solomon's codes, BCH codes and multicomponent turbo codes for a given bit error probability allowed to reduce the number of elementary operations of digital signal processors in digital processing of encoded data by 39-46% in case of influence of non-stationary intent on the intentional signal interference from 6 to 1 dB.

For the first time was proposed, a computational method of fuzzy decoding of many component turbo codes in the WDTD, which, in contrast to the available ones,

uses membership functions to calculate transient recursions and log-likelihood ratios of the turbo code decoding algorithms.

It has been investigated that the use of the method due to the introduction of membership functions allows to obtain an energy gain of 0.2–0.8 dB compared to the known methods.

For the first time was proposed, a method of preparing primary information for adaptive WDTD, which, unlike the available ones, increases the dimensionality of code and interference space, and also uses new analytical ratios to calculate the average bit error probability for different intentional interference strategies and the use of three components turbo code.

It is investigated that the use of the method due to the introduction of new analytical dependencies obtained, taking into account the parameters of the interference, allows to secure the specified indicators of reliability of information in the WDTD, with the energy-genetic gain of coding due to the use of three component turbo-code is 0.8 dB in comparison with known methods.

**Keywords:** reliability of information, wireless data transmission device, noise immunity codes, turbo code, adaptation, decoding algorithms, interference.