

**ОЦІНКА ВПЛИВУ ШУМОВИХ ЗАВАД НА СИСТЕМИ РАДІОЗВ'ЯЗКУ З ПСЕВДОВИПАДКОВОЮ ПЕРЕСТРОЙКОЮ РОБОЧОЇ ЧАСТОТИ**

*У статті проведено аналіз впливу різних видів шумових завад на системи радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти.*

*Ольшанский В.В., Рыбка Е.Н. Оценка влияния шумовых помех на системы радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. В статье проведен анализ влияния различных шумовых помех на системы радиосвязи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты.*

*V. Olshanskiy, E. Rybka Assessment of the impact of noise interference on radio communication system with pseudorandom working frequency tuning. In the article the analysis of influence of different noise hindrances is conducted on the systems of radio contact with pseudorandom working frequency tuning.*

**Ключові слова:** навмисні шумові завади, псевдовипадкова перестройка робочої частоти, критерій, енергетична ефективність, завадозахищеність.

**Постановка завдання в загальному вигляді**

Одним з ефективних способів зниження ступеня навмисного радіоелектронного впливу супротивника є швидка зміна (стрибок) робочої частоти. При цьому захищеність системи зростає в міру збільшення швидкості стрибку по визначених частотах. Псевдовипадкова перестройка робочої частоти (ППРЧ) являє собою один з ефективних методів розширення спектру, при якому сигнал займає смугу частот, значно ширшу порівняно зі смугою, мінімально необхідної для передачі інформації.

**Актуальність дослідження полягає в тому, що на даний час у роботах**, наприклад [1 – 6], відсутній порівняльний аналіз ефективності впливу шумових завад на системи радіозв'язку з ППРЧ та рекомендації щодо подальшого удосконалення завадостійкості засобів військового радіозв'язку з ППРЧ.

**Мета дослідження**

Метою статті є проведення аналізу впливу різних видів шумових завад на роботу систем військового радіозв'язку з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти з визначенням їх ефективності.

**Виклад основного матеріалу**

Відомо, що критерієм ефективності дії завад на системи зв'язку з ППРЧ є середня ймовірність помилки на біт переданої інформації [1]. Тому, виходячи із заданої ймовірності помилки на біт (для бінарної ППРЧ  $P_E < 1/2$ ), визначимо необхідну потужність завади, що забезпечує необхідну ймовірність помилки. Для цього розглянемо декілька з них.

## 1. Загороджувальна по всій смузі шумова завада

Ймовірність помилки на біт для загороджувальній по всій смузі шумової завади отримуємо згідно з [1] при ймовірності попадання частотного елемента в зону дії завад, при значенні коефіцієнт  $\gamma$ , що характеризує частину смуги сигналу з ППРЧ, що зайнята завадою при  $\gamma = 1$

$$P_E = \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left( \frac{N_0}{E_b} + \frac{P_J}{K_s P_s} \right)^{-1} \right\}. \quad (1)$$

де  $N_0$  – одностороння спектральна щільність потужності шумів,  $E_b$  – енергія інформаційного біту,  $N_J$  – спектральна щільність завади,  $P_{E1}$  – ймовірність помилки для одного каналу,  $P_d$  – ймовірність знаходження символу.

Припустимо, що при відсутності завади відношення сигнал/шум  $E_b/N_0$  є великим. Тоді ймовірність помилки на біт  $P_E$  (1) можна апроксимувати виразом

$$P_E = \frac{1}{2} \exp \left\{ -\frac{1}{2} \frac{K_s P_s}{P_J} \right\}. \quad (2)$$

Після логарифмування і перетворень згідно з [3] отримаємо вираз для оцінки потужності загороджувальної завади, що забезпечує задану ймовірність помилки:

$$P_{J_{\zeta\hat{a}\hat{a}}} = -\frac{\hat{E}_s}{2} \frac{P_s}{\ln(2P_E)}, \quad (3)$$

звідки отримуємо, що необхідна потужність загороджувальної завади залежить від коефіцієнта розширення спектру  $\hat{E}_s$ , потужності сигналу  $P_s$ , та ймовірності помилки  $P_E$ .

## 2. Загороджувальна в частині смуги шумова завада.

Для загороджувальної в частині смуги завади оптимальне значення параметра коефіцієнту перекриття смуги сигналу з ППРЧ, що зайнята завадою  $\gamma_{opt}$  та ймовірність помилки на біт визначаються згідно з [2]. Звідси для числа частотних каналів  $M = 2$  можна отримати аналітичне вираз для необхідної потужності завади, що забезпечує задану ймовірність помилки:

$$P_E = \begin{cases} \frac{P_J}{K_s P_s e}, \frac{P_J}{K_s P_s} < \frac{1}{2}, \\ \frac{1}{2} e^{-\frac{K_s P_s}{2P_J}}, \frac{P_J}{K_s P_s} \geq \frac{1}{2}. \end{cases} \quad (4)$$

Звідси отримується необхідна потужність завади:

$$P_{J_{opt}} \begin{cases} K_s P_s P_E e, & P_E < \frac{1}{2e}, \\ -\frac{K_s P_s}{2 \ln(2P_E)}, & P_E \geq \frac{1}{2e}. \end{cases} \quad (5)$$

З рівнянь (3) та (5) отримується вираз для виграшу оптимальної в частині смуги завади для загороджувальної по всій смугі:

$$k = \frac{P_{J_{\zeta\hat{a}\hat{a}}}}{P_{J_{opt}}} = \begin{cases} -\frac{1}{2P_E e \ln(2P_E)}, & P_E < \frac{1}{2e}, \\ 1, & P_E \geq \frac{1}{2e}. \end{cases} \quad (6)$$

На рис. 1 наведена залежність коефіцієнту виграшу  $K$  [дБ] оптимальної загороджувальної завади від ймовірності помилки на біт в радіолінії з ППРЧ.

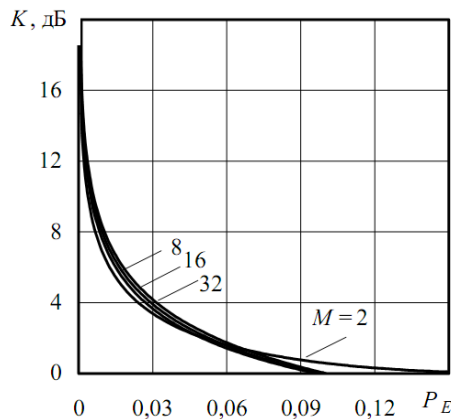


Рис. 1. Залежність коефіцієнту виграшу від необхідної ймовірності помилки на біт

Як висновок з рис. 1, оптимальна завада в частині смуги істотно перевершує загороджувальну тільки на ділянці малих ймовірностей помилки. Так, наприклад, при  $P_E = 0,05$  вигреш складає менш ніж 2 дБ, при  $P_E = 0,1$  – менш ніж 1дБ. Відповідно до виразу (6) для  $M$  – ічної ППРЧ можна записати наступним чином:

$$P_j = \frac{lK_s P_s}{2 \ln(4 \frac{P_E}{M})} \quad (7)$$

$$k = \begin{cases} -\frac{lK_s P_s}{2 \ln(4 \frac{P_E}{M})} & P_E < \frac{\beta}{\alpha}, \\ 1, & P_E \geq \frac{\beta}{\alpha}. \end{cases} \quad (8)$$

Оптимальна завада в частині смуги не здатна здійснити ефективно придушення, наприклад, з ймовірністю помилки на біт, що перевищує 0,15. Придушення з більш високою ймовірністю помилки досягається загороджувальною шумовою завадою по всій смугі. Збільшення коефіцієнту вигрешу призводить до значного підвищення заводо захищеності систем радіозв'язку, ймовірність помилки на біт зменшується трохи менше ніж на порядок.

На рис. 2 показана залежність коефіцієнту пропорційності  $d$  від потрібної ймовірності помилки на біт при різних значеннях коефіцієнту перекриття. Коефіцієнт пропорційності  $d$  для оптимальної завади являє собою випуклу вгору функцію з максимальним значенням  $d_{\max} = \rho P_d$  і перетворюється в нуль в межах інтервалу. Виняток становить вироджений випадок (який фізично не реалізований)  $\rho P_d = 1$ , при якому, починаючи зі значення  $P_E = 1/2e$ , коефіцієнт пропорційності дорівнює 1, а вигреш завади у відповідь рівний коефіцієнту розширення спектра  $K_s$ .

Для загороджувальної по всій смугі завади коефіцієнт пропорційності монотонно убуває і перетворюється в нуль при  $P_E = \rho P_d / 2$  (рис. 2б). З рис. 2а випливає, що в області малих значень ймовірності помилки вигреш завади у відповідь у оптимальної загороджувальної завади в частині смуги нижче, ніж у загороджувальної по всій смугі.

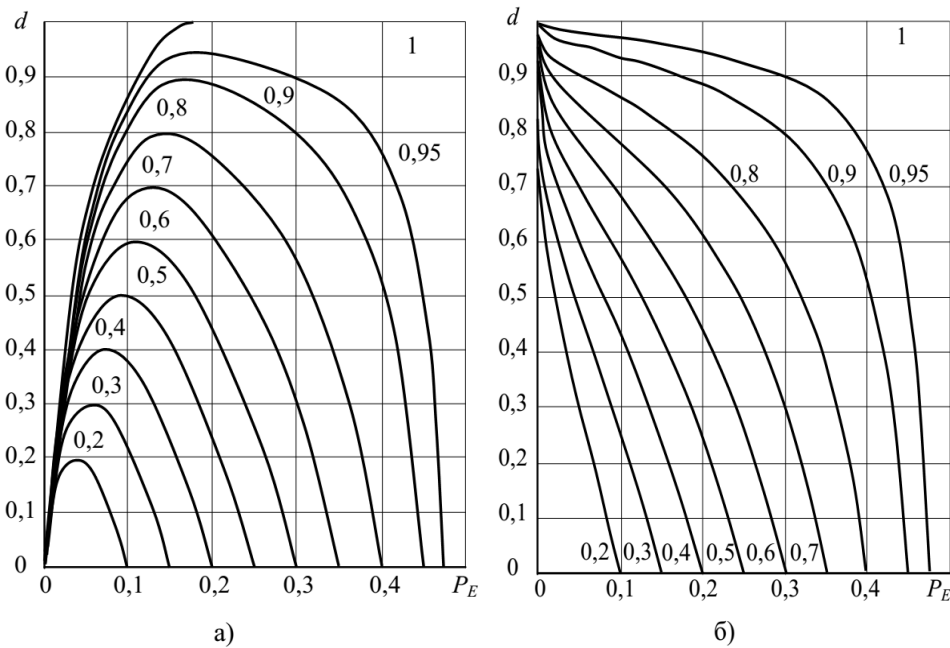


Рис. 2. Залежність коефіцієнту пропорційності  $d$  від необхідної ймовірності помилки на біт при різних значеннях коефіцієнту перекриття: а) для оптимальної в частині полоси завади, б) для загороджувальної по всій смугі завади.

На рис. 3 показано залежність коефіцієнту пропорційності від змінної  $\rho P_d$  при

фіксованих значеннях ймовірності помилки. З іншого боку, при фіксованому значенні ймовірності помилки на біт коефіцієнт пропорційності зростає при збільшенні параметра  $\rho P_d$  (рис. 3). За відповідає оптимальної загороджувальної в частині смуги завади, а рис. 3б – загороджувальної по всій смугі частот завади де велика піввісь  $a$  (по осі абсцис – передавач-приймач радіолінії з ППРЧ) і мала піввісь  $b$  (по осі ординат) визначаються виразами:

$$a = \frac{1}{2} \left\{ \left[ (1 - \rho) T_h - t_{\text{cip}} \right] c + d_{12} \right\}, \quad b = \frac{1}{2} \sqrt{a^2 - d_{12}^2}.$$

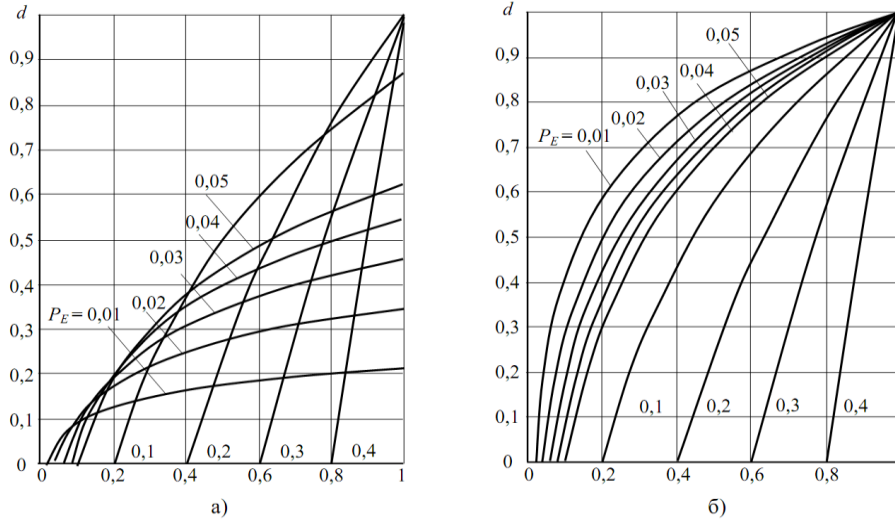


Рис. 3 Залежність коефіцієнта пропорційності від змінної  $\rho P_d$  при фіксованих значеннях ймовірності помилки: а) для оптимальної в частині смуги завади, б) для загороджувальної по всій смугі завади

Еліпс існує при  $b \geq 0$  що тягне за собою виконання нерівності

$$\rho \leq \frac{T_h - t_{\text{cip}}}{T_h} \quad \text{або} \quad \rho \leq \frac{T_h - t_{\text{cip}}}{T_h} P_d. \quad (9)$$

Граничний випадок  $b=0$ , при якому нерівність (9) перетворюється в рівність, відповідає виродженню еліпсу у відрізок прямої, що з'єднує приймач та передавач з ППРЧ. Якщо припустити, що час спрацювання дорівнює часу контролю ( $t_{\text{cip}} = t_k$ ), а ймовірність правильного визначення частотної позиції також залежить від часу контролю, коли з (9) отримаємо умови існування еліпсу придушення при синхронному режимі

$$\rho P_d \leq \frac{T_h - t_k}{T_h} P_{\text{id}}(t_k). \quad (10)$$

Для асинхронного режиму придушення, отримуємо

$$\rho P_{\text{cfao}}(t_k) \leq \begin{cases} \frac{\left( \sqrt{T_h} - \sqrt{\frac{t_k}{2}} \right)^2}{T_h} P_{\text{cfao}}(t_k), & 0 \leq t_k < \frac{T_h}{2}, \\ \frac{1}{2} \frac{(T_h - t_k)}{T_h} P_{\text{cfao}}(t_k), & \frac{T_h}{2} \leq t_k < T_h. \end{cases} \quad (11)$$

Таким чином, при кожному фіксованому часі контролю  $t_k$  коефіцієнт  $\rho$ , що визначає еліпс придушення, задовольняє обмеженням (10), (11). Для багатопозиційної системи ймовірність правильного визначення частотної позиції залежить від числа частотних позицій

$\dot{I}$  (числа частотних каналів), відношення сигнал/шум по потужності  $h^2$  на вході приймального пристрою станції завад.

#### Висновки:

1. Порівняння загороджувальних завад по всій смузі і в частині смуги показує, що для завади в частині смуги існує оптимальне значення параметра  $\gamma = \gamma_{\text{opt}}$ , максимізуючи середню ймовірність помилки на біт в радіолінії з ППРЧ при заданому розмірі алфавіту і ефективному відношенні сигнал/шум  $q_{\text{до}}^2$ .

2. При потужності завади  $P_J$ , меншою ніж критичне значення  $P_J = K_s P_s / \alpha$ , значення  $\gamma_{\text{opt}} < 1$  і потужність завади зосереджується в частині смуги. Однак така завада може забезпечити ймовірність помилки менше, ніж  $P_E = 0,1834$ .

3. При  $P_J > P^*$  оптимальна завада в частині смуги перетворюється на загороджувальну по всій смузі та зі зростанням потужності може забезпечити необхідну ймовірність помилки.

4. Оптимальна завада в частині смуги є більш ефективною ніж загороджувальна завади тільки в тих випадках, коли потрібно здійснити придушення з малою ймовірністю помилки на біт ( $P_E < 0,1834$ ).

5. Виграш загороджувальної завади у завади у відповідь (як в частині смуги, так і у всій смузі) прямо пропорційний коефіцієнту розширення спектра  $K_s$ .

6. Коефіцієнт пропорціональності нелінійним чином залежить від двох параметрів: необхідної ймовірності помилки на біт  $P_E$  після придушення та середнього часу придушення завади у відповідь частотного елемента сигналу з ППРЧ  $\bar{T}_f$ .

7. Для підвищення завадозахищеності систем військового радіозв'язку з ППРЧ потрібно провести синтезування технологічних переваг інших інформаційних технологій з метою досягнення технічної переваги систем та засобів військового радіозв'язку.

#### Напрямки подальших досліджень

Подальші дослідження будуть спрямовані на розробку методики формування сигнально-кодових конструкцій програмованих радіозасобів з псевдовипадковою перестройкою робочої частоти з метою підвищення їх енергетичної ефективності.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / В.И. Борисов, В.М. Зинчук, А.Е. Лимарев. – М.: РадиоСофт, 2008. – 512 с.
2. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи. Вероятностно-временной подход / В.И. Борисов, В.М. Зинчук. – М.: РадиоСофт, 2008. – 260 с.
3. Борисов В.И. Помехозащищенность систем радиосвязи. Основы теории и принципы реализации / В.И. Борисов. – М.: Наука, 2009. – 358 с.
4. Пространственные и вероятностно-временные характеристики станций ответных помех при подавлении систем радиосвязи / В.И. Борисов [и др.] – М.: РадиоСофт, 2008. – 362с.
5. Перехват сигналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты / Борисов В.И. [и др.] // Радиотехника и электроника. – 2001. – Т. 46, № 3. – С. 346 – 363.
6. Шевченко В.А. Помехоустойчивость некогерентных каналов спутниковой связи с ППРЧ в условиях воздействия помехи „вслед” / В.А. Шевченко, И.А. Бойченко, О.Л. Лапин // Известия института инженерной физики. – 2009. – № 3. – С. 61 – 65.