

## **АНАЛІЗ ЗАВАДОЗАХИЩЕНОСТІ РАДІОМЕРЕЖ З ППРЧ В УМОВАХ ВПЛИВУ ЗАВАД У ВІДПОВІДЬ**

*Для забезпечення високої завадозахищеності військових систем та засобів радіозв'язку широко використовується режим псевдовипадкової перебудови робочої частоти (ППРЧ). Одним з найбільш ефективних методів радіоелектронного подавлення засобів радіозв'язку (ЗРЗ) з ППРЧ є використання завад у відповідь.*

*В тактичній ланці управління у межах певної території, як правило, одночасно функціонують декілька десятків УКХ радіомереж. Тому завданням засобів радіоелектронної боротьби (РЕБ) є одночасне подавлення радіозасобів, що входять до складу декількох радіомереж (найбільш важливих з погляду забезпечення ефективного функціонування системи управління) у секторі радіоподавлення.*

*Таким чином, виникає завдання оцінки можливостей постановника завад у відповідь в реальних умовах, з урахуванням одночасної роботи декількох однотипних радіомереж у спільній смузі робочих частот.*

*У статті на основі відомих математичних моделей визначено залежності ефективності радіоелектронного подавлення радіомереж станцією завад у відповідь від енергетичних та часових параметрів радіозасобів з псевдовипадковим перестроюванням робочої частоти. Зокрема, проведено розрахунки можливостей станцій завад по радіоподавленню радіомереж з ППРЧ для різних вихідних даних: кількість радіомереж, які одночасно можуть подавлюватися постановником завад, кількість радіомереж, де одночасно відбувається передача інформації; ширина сектора, по якому розподілені передавачі радіозасобів; ширина сектора подавлення станції завад; ширина спектра сигналів радіомереж; частотно-часова матриця сигналу з ППРЧ; усереднений час запізнювання завади.*

*Встановлено, що ефективність одночасного радіоелектронного подавлення декількох радіомереж з ППРЧ постановником завад у відповідь є тим меншою, чим більша кількість радіозасобів одночасно працюють на передачу, чим більшим є сектор подавлення, та чим вищою є швидкість перебудови частоти.*

*Отримані результати можуть бути використані при розробці методик вибору параметрів радіозасобів з ППРЧ в умовах впливу завад у відповідь.*

**Ключові слова:** *радіозасоби, псевдовипадкове перестроювання робочої частоти (ППРЧ), завада у відповідь, сектор радіоподавлення, завадозахищеність, відношення сигнал/завада.*

**Ольшанский В.В., Гурский Т.Г., Остапчук В.Н., Лозунов В.К. Анализ помехозащищенности радиосетей с ППРЧ в условиях воздействия ответных помех.** Для обеспечения высокой помехозащищенности военных систем и средств радиосвязи широко используется режим псевдослучайной перестройки рабочей частоты (ППРЧ). Одним из наиболее эффективных методов радиоэлектронного подавления радиосредств с ППРЧ является использование ответных помех.

*В тактическом звене управления в пределах определенной территории, как правило, одновременно работают несколько десятков УКВ радиосетей. Поэтому задачей средств радиоэлектронной борьбы (РЕБ) является одновременное подавление радиосредств, входящих в состав нескольких радиосетей (наиболее важных с точки зрения обеспечения эффективного функционирования системы управления) в секторе радиоподавления.*

*Таким образом, возникает задача оценки возможностей постановщика ответных помех в реальных условиях, с учетом одновременной работы нескольких однотипных радиосетей в общей полосе рабочих частот.*

*В статье на основе известных математических моделей определены зависимости эффективности радиоэлектронного подавления радиосетей станцией ответных помех от энергетических и временных параметров радиосредств с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. В частности, произведены расчеты возможностей станций помех по радиоподавлению радиосетей с ППРЧ для различных исходных данных: количество радиосетей, которые одновременно могут быть подавлены постановщиком помех; количество радиосетей, в которых одновременно происходит передача информации; ширина сектора, по которому распределены радиосредства; ширина сектора подавления станции помех; ширина спектра сигналов радиосетей; частотно-временная матрица сигнала с ППРЧ; усредненное время запаздывания помехи.*

*Установлено, что эффективность одновременного радиоэлектронного подавления нескольких радиосетей с ППРЧ постановщиком ответных помех является тем меньше, чем большее количество радиосредств одновременно работают на передачу, чем больше сектор подавления, и чем выше скорость перестройки частоты.*

*Полученные результаты могут быть использованы при разработке методик выбора параметров радиосредств с ППРЧ в условиях воздействия ответных помех.*

**Ключевые слова:** *радиосредства, псевдослучайная перестройка рабочей частоты, ответная помеха, сектор радиоподавления.*

*V. Olshanskiy, T. Hurskyi, V. Ostapchuk, V. Lozynov* **The analysis of anti-jamming of FH radio networks in condition of jamming by interference in response.** To ensure high noise immunity of military systems and means of radio communication, the mode of frequency hopping (FH) is widely used. One of the most effective methods of electronic suppression of FH radio means is the use of repeater jamming.

In the tactical battlefield, as a rule, several dozen VHF radio networks operate simultaneously. Therefore, the task of the jammer is the simultaneous suppression of radio means that is part of several radio networks (the most important in terms of ensuring the effective functioning of the control system) in the radio suppression sector.

Thus, there is a problem of assessing the capabilities of the repeater jammer in real conditions, taking into account the simultaneous operation of several radio networks of the same type in a common operating frequency band.

Based on the known mathematical models, the dependences of the efficiency of the repeater jammer to the energy and time parameters of FH radios are determined in the article. In particular, calculations of the capabilities of repeater jamming stations for radio-electronic suppression of FH radio networks for different initial data: the number of radio networks that can be suppressed at the same time, the number of radio networks where information is transmitted simultaneously; the width of the sector over which the radio transmitters are distributed; the width of the sector of suppression of the interference station; the width of the signal spectrum of radio networks; frequency-to-time matrix of the FH signal; the average interference delay time.

It is established that the efficiency of simultaneous jamming of several FH radio networks by the repeater jamming is smaller than larger the number of radios simultaneously working on the transmission, the larger the suppression sector, and the higher the frequency tuning rate.

The obtained results can be used in the development of methods for selecting the parameters of FH radios under the influence of repeater jamming.

**Keywords:** radio means, frequency hopping, repeater jamming, suppression sector.

**Постановка завдання в загальному вигляді.** Засоби військового радіозв'язку повинні забезпечувати ефективне функціонування в умовах складної заводової обстановки. Постійне вдосконалення засобів радіоелектронного подавлення (РЕП) призводить до необхідності пошуку технічних рішень для підвищення заводозахищеності систем та засобів військового радіозв'язку [1 – 6].

Одним з ефективних методів підвищення заводозахищеності засобів радіозв'язку (ЗРЗ) при впливі навмисних завод є застосування режиму псевдовипадкової перебудови робочої частоти (ППРЧ) [7 – 10]. У ЗРЗ з ППРЧ розширення спектра в межах заданої смуги частот здійснюється за допомогою стрибкоподібної зміни частоти сигналу за псевдовипадковим законом, який невідомий постановнику завод. При цьому сигнал займає смугу частот  $\Delta f_c$  значно ширшу в порівнянні зі смугою  $\Delta F_c$ , яка мінімально необхідна для передачі інформації.

В тактичній ланці управління в умовах ведення бойових дій одночасно на спільній території функціонують декілька десятків УКХ радіомереж. Отже, завданням засобів РЕБ є одночасне подавлення принаймні декількох радіомереж, які функціонують у визначеному секторі радіоподавлення.

Таким чином, виникає актуальне завдання оцінки можливостей постановника завод у відповідь в реальних умовах, з урахуванням одночасної роботи декількох однотипних радіомереж у спільній смузі робочих частот.

**Аналіз публікацій за темою дослідження.** Для подавлення ЗРЗ з ППРЧ можуть застосовуватися різні види організованих завод. З погляду енергетичних можливостей найбільш ефективними для подавлення ЗРЗ з ППРЧ є *заводи у відповідь* [7 – 15]. Їх ефективність не залежить від коефіцієнта виграшу, який має ЗРЗ за рахунок розширення спектру сигналів [1]. Проте створення завод у відповідь за порівняно короткий час передачі частотних елементів сигналу (стрибків частоти) наштовхується на технічні і організаційні труднощі.

Складність, з якою стикаються при постановці завод у відповідь, полягає в обмеженні за часом передачі заводи, а також обмеженні передавачів станцій радіоелектронної боротьби (РЕБ) по потужності. При перехопленні одночасно декількох сигналів в різних частотних каналах, СЗ необхідно розподілити свою потужність, щоб подавити виявлені сигнали, або відокремити сигнал тієї ЗРЗ, що потрібно подавити.

При виборі швидкості ППРЧ у військових УКХ радіостанціях необхідно враховувати, що зі збільшенням швидкості ППРЧ підвищується захищеність від організованих завад і погіршуються умови для виявлення і пеленгації, але у той же час, підвищується вартість радіостанцій, погіршується електромагнітна сумісність, зростає час синхронізації, зменшується дальність зв'язку та швидкість передачі даних. Вважається, що на даний час прийнятні швидкості ППРЧ лежать у діапазоні 50-600 стр/с [15].

Негативний вплив навмисних завад в системах і засобах радіозв'язку з ППРЧ може бути значно послаблений за рахунок застосування адаптивних алгоритмів формування та обробки сигналів, які дозволяють підвищити енергетичну ефективність радіозасобів. При цьому, важливим є завдання оцінки рівня спотворення сигналів з ППРЧ в умовах навмисних завад.

У роботах [10 – 15] було проведено аналіз завадозахищеності радіоліній з ППРЧ в умовах ЗВ в залежності від швидкості перебудови частоти, взаємного розташування радіозасобів та станції завад, часу, необхідного на виявлення роботи радіолінії на новій частоті, та формування завади. Проте такі розрахунки не дають уявлення про завадозахищеність сукупності окремих радіомереж, що функціонують у зоні відповідальності станцій (комплексів) РЕП. У роботах [16–19] запропоновано удосконалені алгоритми формування сигналів з ППРЧ для підвищення завадозахищеності окремих радіоліній.

У статті [20] запропоновано підхід для оцінки завадозахищеності декількох радіомереж з ППРЧ в умовах завад у відповідь, однак не було проведено розрахунків для конкретних вихідних даних (технічних характеристик станцій завад, кількості радіомереж у секторі подавлення тощо) не проводились.

Тому *метою* роботи є аналіз можливостей станцій завад у відповідь по подавленню радіозасобів, що входять до складу декількох окремих радіомереж з ППРЧ в тактичній ланці управління.

**Виклад основного матеріалу досліджень.** У разі одночасної роботи великої кількості радіомереж з ППРЧ одного типу передавач завад, маючи обмежену потужність, не в змозі подавити кожен перехоплений сигнал. У зв'язку з цим зменшується ймовірність перехоплення і, відповідно, ймовірність подавлення  $P_{\text{п}}$  частотних елементів сигналів радіозасобів.

В таких умовах для вирішення задачі подавлення певної кількості радіозасобів (радіомереж) з ППРЧ використовуються різні види селекції, наприклад, просторова селекція за напрямком приходу сигналу. Проте при цьому виникає складність у тому, що через просторове рознесення приймача і передавача ЗРЗ немає можливості визначити напрями (пеленги) на приймачі радіозасобів. Тому з метою забезпечення необхідної ймовірності подавлення приймачів ЗРЗ потужність передавача станції завад у відповідь має бути розподілена по заданому певним чином кутовому сектору (рис. 1).

У роботі [20] було отримано вираз для визначення відношення сигнал-завада  $Q_{\Sigma}^2$ , необхідного для подавлення завадою у відповідь сигналів з ППРЧ при використанні в апаратурі радіотехнічної розвідки селекції за напрямом приходу:

$$Q_{\Sigma}^2 \leq \frac{\Delta f_c S_{\text{PЗ}}^2 \pi^2 f_{\text{min}}^2 d^2 \left[ \frac{N_3}{N_{\text{прд}}} - \frac{2S_3}{S_{\text{PЗ}}} \right]^2 \left[ \Delta t_{\text{прд}} - \frac{\Delta t_{\text{прд}} (P_{\text{под}} - P_2)}{P_{\text{п}} (P_1 - P_2)} - \Delta t_3 \right]}{9C_{\text{p}}^2}, \quad (1)$$

де  $N_3$  – кількість завад у відповідь, необхідних для впевненого подавлення всіх частотних елементів сигналів ЗРЗ в секторі;  $S_{\text{PЗ}}$  – кут сектору, в якому розташовані ЗРЗ;  $S_3$  – кут сектору випромінювання станції завад;  $\sigma_{\phi}$  – середньоквадратичне відхилення пеленга на передавач ЗРЗ;  $N_{\text{прд}}$  – кількість передавачів радіозасобів, рівномірно розподілених по сектору  $S_{\text{PЗ}}$ , які одночасно передають сигнали з ППРЧ в одній смузі частот та випромінюють достатню для перехоплення потужність;  $C_{\text{p}}$  – швидкість розповсюдження радіохвиль,  $f_0$  – несуча частота

перехопленого частотного елементу,  $\varphi$  – пеленг частотного елементу ( $|\varphi| \leq \pi/2$ ),  $d$  – відстань між двома найбільш віддаленими антенами фазового пеленгатора;  $P_1$  – середня імовірність помилки на біт при впливі завади у відповідь;  $P_2$  – середня імовірність помилки на біт при відсутності завад у відповідь на вході демодулятора;  $P_{\text{под}}$  – ймовірність помилки подавлення сигналу;  $P_{\text{п}}$  – ймовірність виявлення та подавлення сигналу,  $\Delta t_{\text{прд}}$  – тривалість передачі частотного елементу;  $\Delta t_3$  – час запізнювання завади,  $f_{\text{min}}$  – найменша частота частотно-часової матриці сигналу з ППРЧ,  $\Delta f_c$  – ширина спектра сигналу.

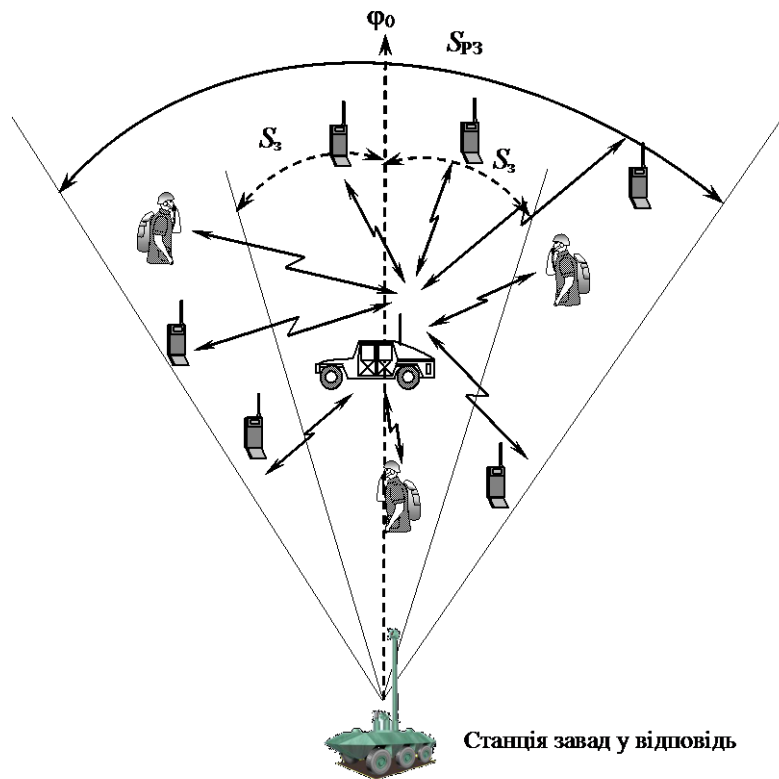


Рис. 1. Сектор подавлення радіозасобів з ППРЧ

При цьому, якщо станція завад у відповідь випромінює всякий раз, коли якийсь частотний елемент сигналу прибуває з сектора шириною  $\varphi_0 \pm (S_3 + 3\sigma_\varphi)$  радіан, ймовірність подавлення одного частотного елементу з цього сектора  $P_{\text{п}}$  дорівнює приблизно 0,9 [13]. Проте можуть бути подавленими і деякі частотні елементи сигналів радіозасобів, що знаходяться за межами цього сектора.

Аналіз нерівності (1) показує важливість правильного вибору сектора подавлення  $\frac{2S_3}{S_{P3}}$ , який може бути визначений залежно від того, наскільки точно відомі пеленги передавачів радіозасобів. Якщо умова  $\frac{2S_3}{S_{P3}} < \frac{N_3}{N_{\text{прд}}}$  не виконується, то селекцію за напрямом приходу частотних елементів сигналів з ППРЧ здійснити не можна.

Проведемо оцінку впливу завад у відповідь на систему радіозв'язку для наступних вихідних даних:

- кількість радіомереж, що можуть одночасно подавлюватись –  $N_3 = 15$ ;
- кількість активних радіомереж (що одночасно працюють на передачу)  $N_{\text{прд}} = 10$ ;
- ширина сектора, по якому розподілені передавачі радіозасобів  $S_{P3} = \pi/3$  радіан;
- ширина спектра сигналу  $\Delta f_c = 25$  кГц;

частотно-часова матриця сигналу з ППРЧ:  $f_{\min} = 30$  МГц,  $f_{\max} = 512$  МГц;

усереднений час запізнювання завади  $\Delta t_3 = 20$  мкс;

тривалість частотного елемента сигналу (величина, обернена швидкості перебудови частоти):  $\Delta t_{\text{прд}} = 10^{-2} \dots 10^{-4}$  (що відповідає зміні швидкості перебудови частоти від 100 до 10000 стр/с);

середня ймовірність помилки на біт при впливі завади у відповідь  $P_1 = 10^{-2}$ ;

середня ймовірність помилки на біт при відсутності завад у відповідь на вході демодулятора  $P_2 = 10^{-5}$ ;

ймовірність помилки подавлення сигналу  $P_{\text{под}} = 10^{-5}$ ;

ймовірність виявлення та подавлення сигналу  $P_{\text{п}} = 0,9$ ;

відстань між двома найбільш віддаленими антенами фазового пеленгатора  $d = 1$  м.

На рис. 2 зображено залежності відношення сигнал/завада  $Q_{\Sigma}^2$ , необхідного для подавлення ЗРЗ з ППРЧ від тривалості частотного елемента сигналу (швидкості перебудови частоти) для різних значень ширини сектору станції ЗВ  $S_3$ . Видно, що при зменшенні швидкості перебудови частоти ефективність станції завад для подавлення  $N_{\text{прд}}$  засобів радіозв'язку збільшується (подавлення ЗРЗ досягається при більших відношеннях сигнал/завада). Крім того, очевидно, що для підвищення ефективності радіоелектронного подавлення сукупності радіомереж станції завад доцільно звужувати сектор подавлення.

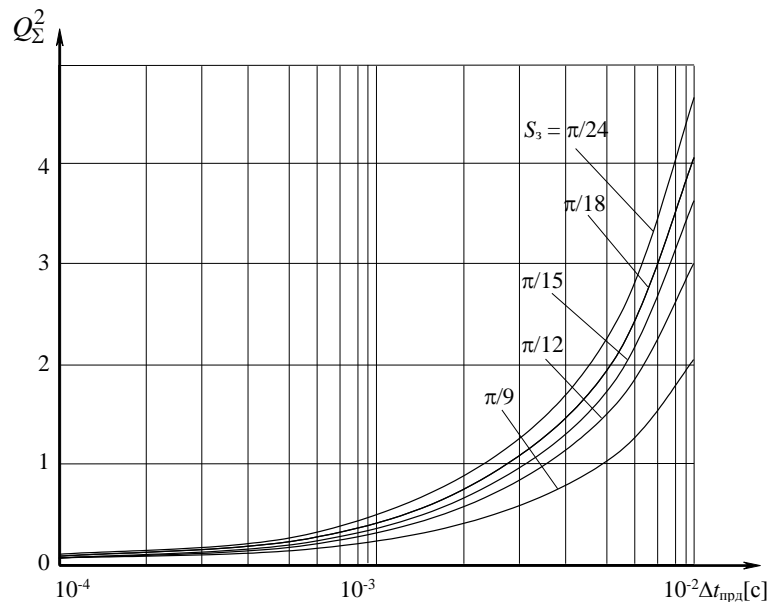


Рис. 2. Залежності відношення сигнал/завада від часу передачі сигналу для різних значень ширини сектору станції завад

На рис. 3 подано графік залежності відношення сигнал/завада від співвідношення ширини сектору станції ЗВ до ширини сектору, по якому розподілені передавачі радіозасобів ( $\alpha = S_3/S_{\text{РЗ}}$ ). Розрахунки проводились для тривалості частотного елемента сигналу  $\Delta t_{\text{прд}} = 2 \times 10^{-3}$  ( $v_{\text{пер}} = 500$  стр/с). Видно, що чим більшою є величина  $S_3$  і, відповідно,  $\alpha$ , тим більшою має бути потужність станції завад для подавлення ЗРЗ.

На рис. 4 зображено графіки залежності відношення сигнал/завада від тривалості частотного елемента сигналу для різних значень кількості ЗРЗ, що працюють на передачу (приймалося, що  $S_3 = 0,25S_{\text{РЗ}} = \pi/12$ ). З графіків видно, що чим більша кількість засобів радіозв'язку потрапляє до сектору станції ЗВ, тим більша потужність потрібна для їх подавлення.

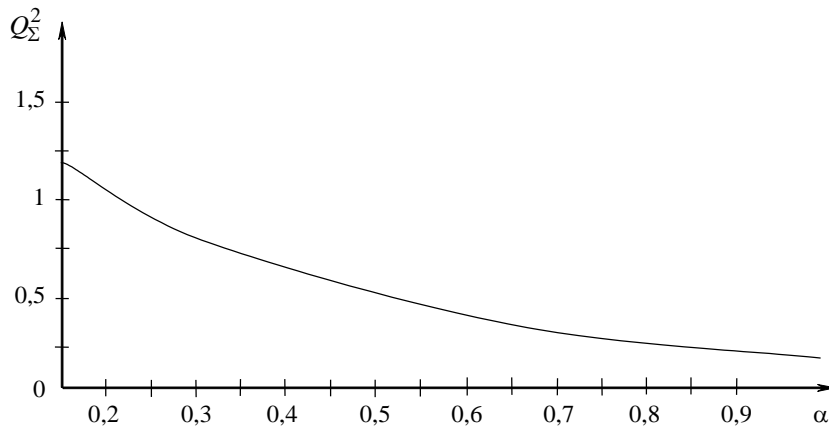


Рис. 3. Залежності відношення сигнал/завада від співвідношення ширини сектору станції завад у відповідь до ширини сектору, по якому розподілені передавачі радіозасобів

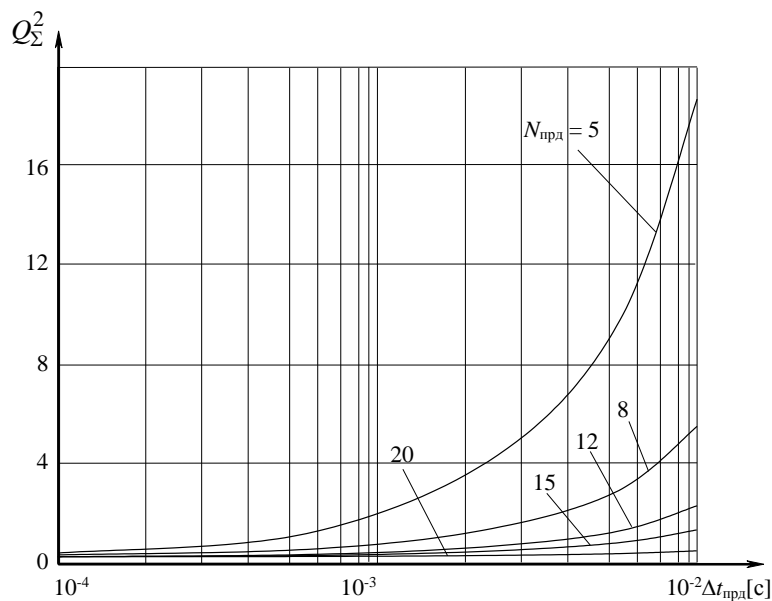


Рис. 4. Залежності відношення сигнал/завада від часу передачі сигналу для різних значень кількості передавачів ЗРЗ

**Висновки.** Таким чином, проведений аналіз показує, що якість зв'язку при впливі на систему радіозв'язку завад у відповідь залежить від енергетичних характеристик засобів радіозв'язку з ППРЧ, швидкості перебудови частоти, топології (взаємного розташування) ЗРЗ та станції завад у відповідь, кількості ЗРЗ у секторі подавлення, співвідношення сектору подавлення до сектору розташування радіозасобів, а також від часових можливостей станції завад.

Зокрема, ефективність станції завад у відповідь зменшується при збільшенні швидкості перебудови частоти, збільшенні кількості активних радіомереж (які одночасно працюють на передачу), збільшенні величини сектору, у якому розташовані засоби радіозв'язку.

Перспективним напрямом подальших досліджень є розробка методів та методик управління параметрами радіозасобів з ППРЧ на основі отриманих оцінок нижньої межі часу спостереження, потрібного для оцінювання із заданою ймовірністю і точністю частоти перехоплених сигналів з ППРЧ та необхідної кількості завад для подавлення сигналів декількох радіомереж з ППРЧ при використанні в апаратурі радіотехнічної розвідки селекції за напрямом приходу сигналів радіозасобів.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Современная радиоэлектронная борьба. Вопросы методологии / Агафонов А. А. и др. Под ред. В. Г. Радзиевского. М.: „Радиотехника”, 2006. 424 с.
2. Перунов Ю. М., Фомичев К. И., Юдин Л. М. Радиоэлектронное подавление информационных каналов систем управления оружием / Под ред. Ю. М. Перунова. М.: „Радиотехника”, 2003. 416 с.
3. Куприянов А. И., Сахаров А. В. Теоретические основы радиоэлектронной борьбы: Учеб, пособие. М.: Вузовская книга, 2007. 356 с.
4. Кондратьев А. Перспективный комплекс РРТР и РЭВ сухопутных войск США „Профет”. Зарубежное военное обозрение. 2008. № 7. С. 37 – 41.
5. Стрелецкий А. Американский перспективный наземный комплекс ведения радиоэлектронной войны „Вулфпак”. Зарубежное военное обозрение. 2002. № 10. С. 27 – 28.
6. Палий А. И. Радиоэлектронная борьба. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Воениздат, 1989. 350 с.
7. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты / Борисов В. И. и др. М.: 2000. 384 с.
8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. М.: Вильямс, 2003. 1104 с.
9. Помехоустойчивость систем радиосвязи с расширением спектра сигналов / В.И. Борисов и др. // Теория и техника радиосвязи, 1993. Вып. 1. С. 3 – 38.
10. Борисов В. И., Зинчук В. М., Лимарев А. Е. Помехозащищенность систем радиосвязи с расширением спектра сигналов методом псевдослучайной перестройки рабочей частоты. М.: Радио и связь, 2000. 384 с.
11. Кувшинов О. В., Глуцкий В. И., Ливенцев С. П. Вибір параметрів систем рухомого радіозв'язку з ППРЧ при впливі ретрансльованої завади. Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ “КПІ”. 2003. Вип. 6. С. 68 – 73.
12. Оценка воздействия ответных помех на системы радиосвязи с медленной ППРЧ / В.И. Борисов и др. Теория и техника радиосвязи, 1994. Вып. 1. С. 3 – 19.
13. Torrieri D. J. *Fundamental Limitations on Repeater Jamming of Frequency-Hopping*. IEEE Journal on Selected in Commn., 1989, May, v.7, № 4, 569 – 575 pp.
14. S. Talarico, M. C. Valenti, D. Torrieri. Optimization of an Adaptive Frequency-Hopping Network. IEEE Military Commun. Conf. (MILCOM), 2015. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://arxiv.org/pdf/1508.05694.pdf>.
15. Макаренко С.И., Иванов М.С., Попов С.А. Помехозащищенность систем связи с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты. Монография. СПб.: Свое издательство, 2013. 166 с.: ил.
16. X. Meng, R. Tao, and L. Jia. An intelligent anti-jamming frequency hopping system. *First International Conference on Pervasive Computing, Signal Processing and Applications (PCSPA)*, pp. 1053–1056, Harbin, China, September 2010.
17. L. Zhang, H. Wang, and T. Li. Anti-jamming message-driven frequency hopping – Part I: System design. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 70 – 79, January 2013.
18. L. Zhang and T. Li. Anti-jamming message-driven frequency hopping – Part II: Capacity analysis under disguised jamming. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 12, no. 1, pp. 80 – 88, January 2013.
19. Spectrally efficient jamming mitigation based on code-controlled frequency hopping / H. Wang, L. Zhang, T. Li, and J. Tugnait. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 3, pp. 728 – 732, March 2011.
20. Ольшанський В.В. Оцінка просторово-часових можливостей станцій завад у відповідь по подавленню радіозасобів з ППРЧ. Збірник наукових праць Військового інституту телекомунікацій та інформатизації НТУУ КПІ. 2013. № 1. С. 54 – 58