

УДК 623.618.2

Ю.В. Стасев<sup>1</sup>, Д.О. Медведєв<sup>2</sup>, І.Є. Лещенко<sup>1</sup><sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків<sup>2</sup> Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

## УМОВИ ЗАСТОСУВАННЯ СИГНАЛЬНО-КODOВИХ КОНСТРУКЦІЙ В ПЕРЕШКОДОЗАХИЩЕНИХ СИСТЕМАХ ЗВ'ЯЗКУ ТА УПРАВЛІННЯ

В роботі розглянута можливість забезпечення активного завадо- та імітозахисту у системах і засобах зв'язку, захисту їх від засобів радіоелектронної розвідки й радіоелектронної боротьби. Встановлено, що для вирішення поставлених завдань застосовується реалізація динамічного режиму функціонування. Доведено теореми недешифрованості динамічного режиму функціонування і визначено необхідні та достатні умови для шляхів його досягнення.

**Ключові слова:** радіоелектронна протидія, динамічний режим функціонування, ентропія розкриття, сигнально-кодові конструкції, система зв'язку.

### Вступ

#### Постановка проблеми у загальному вигляді.

Забезпечення активного завадо- та імітозахисту у системах і засобах зв'язку та захист їх від засобів радіоелектронної розвідки й радіоелектронної боротьби евентуального супротивника можливо при реалізації динамічного режиму функціонування.

Для оцінки ефективності динамічного режиму функціонування використовується міра невизначеності відносно використання в системах і засобах зв'язку ансамблю сигнально-кодових конструкцій та їх конкретного вигляду, що назвемо ентропією розкриття.

**Мета статті** – розробка достатніх та необхідних умов динамічного режиму функціонування захисту системи зв'язку та управління.

**Аналіз останніх досягнень і публікацій.** Проведені дослідження показали, що розв'язання проблеми підвищення якості функціонування системи зв'язку можливе за рахунок:

– застосування змішаної стратегії поведінки системи зв'язку, що полягає у випадковому виборі алгоритму функціонування системи та використовуваних сигнально-кодових конструкцій (зменшення ймовірності постановки оптимальної перешкоди);

– вибору структури і параметрів системи зв'язку, що збільшують часткові показники якості її функціонування;

– збільшення ймовірності розпізнавання діючої стратегії радіоелектронного подавлення і класу завад та зміни алгоритму функціонування системи зв'язку.

Забезпечувати виконання цих умов, як показали дослідження, можливо при реалізації динамічного режиму функціонування цифрової системи зв'язку.

### Постановка задачі та викладення матеріалів дослідження

Розв'язання задачі забезпечення необхідних показників завадозахищеності, скритності та імітотійкості радіоканалу управління досягається за рахунок сигналів і кодів з поліпшеними властивостями. Враховуючи реальну структуру коду, як сигнали переважно використовують ортогональні системи сигналів [1; 2; 3].

Використання регулярної структури сітки з М частот приводить до більшої уразливості радіоканалу при деяких видах навмисних завад і, в першу чергу, по відношенню до структурних завад [2; 4; 5; 6], під якими розумітимемо гармонічні (полігармонічні) завади, що мають вид модуляції, аналогічний сигналам, які передають; смугу частот; швидкість і крок перестройки за частотою; частоти, що відрізняються структурою (законом) ПСП, управляючих побудовою фази, і частоти сигналу. Можливо подібні завади є оптимальними з погляду завадопостановника [2; 4; 5; 6; 7; 8].

Для того, щоб зберегти корисні властивості використовуюваного класу сигналів і забезпечити їх достатню захищеність від оптимальної навмисної завади, необхідно позбавити завадопостановника можливості погодити структуру завади з сигналом. Цього ефекту можна досягти, якщо кожен послідовний інформаційний символ передавати складним символом із змінюваною в часі структурою, що задається спеціальним датчиком ПСП, строго синхронізованим з аналогічним датчиком на приймальній стороні [2; 4], тобто організувавши в радіоканалі режим періодичної зміни параметрів. Оскільки закон формування ПСП (зміни частот або форм ФМ сигналів) завадопостановнику невідомий, то він не

може досягти повної оптимізації завади із сигналом і вимушений обмежитися лише частковою оптимізацією за основними параметрами сигналу (смуга, розділені частоти, швидкість маніпуляції і т.д.). Випадок, коли здійснюються спроби визначити закон керуючих послідовностей, припускає великі часові та матеріальні витрати, а також переслідує іншу мету – постановку імітаційних завод.

Кількісною оцінкою показника заводозахищеності радіоканалу є ймовірність його подавлення навмисними заводами  $P_{\text{под}}$ . Ймовірність  $P_{\text{под}}$  характеризуватимемо ймовірністю помилки на виході другої вирішувальної схеми (декодера), яка визначається із залежності вигляду

$$P_{\text{под}} = P_{\text{пом}}^{\text{к}}(P_{\text{пом}}^{\text{с}}), \quad (1)$$

де  $P_{\text{пом}}^{\text{к}}$ ,  $P_{\text{пом}}^{\text{с}}$  – ймовірність помилок відповідно на сигнальному рівні й рівні контуру кодування.

Визначення  $P_{\text{пом}}^{\text{с}}$  за наявності багатоканально-го приймача припускає розгляд випадку  $M$  гіпотез постановки навмисних завод [1; 3], що є важковирішуваним завданням. Уникнути цього можна, якщо замінити реальний багатоканальний приймач адекватною в значенні збереження показників заводостійкості моделлю радіоканалу з двома каналами обробки, а при розрахунках  $P_{\text{пом}}^{\text{с}}$  використовувати адитивні межі Буля-Бонферроні [1; 8]. Так, для випадку найгіршої заводої обстановки (ураження  $M-1$  підканалів) з нерівності Буля-Бонферроні маємо

$$P_{\text{пом}}^{\text{с}} = (M-1)P_{\text{пом дв}}^{\text{с}}, \quad (2)$$

де  $P_{\text{пом дв}}^{\text{с}}$  – ймовірність помилки у двоканальному приймачі.

Ймовірність помилки  $P_{\text{пом дв}}^{\text{с}}$  визначимо виходячи із співвідношення [1]:

$$P_{\text{пом дв}}^{\text{с}} = P_{\text{р}}^{\text{ф}} \cdot (P_{\text{пом}}(s, n) + 1 - P_{\text{р}}^{\text{ф}}) \cdot P_{\text{пом}}(s, \text{ш}), \quad (3)$$

де  $P_{\text{р}}^{\text{ф}}$  – ймовірність розвідки основних параметрів сигналів-переносників;

$P_{\text{пом}}(s, n)$  – складова ймовірність помилки, яка характеризується наявністю в робочому каналі навмисної завади;

$P_{\text{пом}}(s, \text{ш})$  – складова ймовірність помилки, яка характеризується присутністю в каналі лише власних шумів приймача.

За аналогією з [1] ймовірність  $P_{\text{р}}^{\text{ф}}$  визначатимемо як відношення кількості виставлених структурних завод  $G$  до кількості  $L$  можливих (розділених) підканалів, тобто

$$P_{\text{р}}^{\text{ф}} = G / L, \quad (4)$$

де  $G = \overline{L}$ .

У свою чергу, кількість  $L$  характеризується відношенням смуги частот радіоканалу  $\Delta F_{\text{к}}$  до смуги  $\Delta F_{\text{с}}$ , тобто

$$L = \Delta F_{\text{к}} / \Delta F_{\text{с}}. \quad (5)$$

Тривалість елемента ЧФМ сигналу визначається із співвідношення вигляду

$$\tau_{\text{е}} = \frac{m \cdot \kappa}{R_{\text{і}} \cdot B \cdot N} = \frac{m \cdot R_{\text{к}}}{R_{\text{і}} \cdot B}, \quad (6)$$

ширина спектра сигналу

$$\Delta F_{\text{с}} = \frac{B \cdot 2 \cdot R_{\text{і}}}{m \cdot R_{\text{к}}}.$$

У результаті одержимо, що величина  $L$  визначається

$$L = \frac{\Delta F_{\text{к}} \cdot m \cdot R_{\text{к}}}{B \cdot 2 \cdot R_{\text{і}}}. \quad (7)$$

Як уже вказувалося, найбільш небезпечними для даного класу сигналів є гармонічні (полігармонічні) заводи, схожі за структурою основних параметрів на робочі сигнали. Дослідження заводозахищеності радіоканалу проводитимемо в припущенні постановки даного класу навмисних завод. Відомо [1; 8], що ефект рівномірно фазоманіпульованої гармонійної, синфазної за високою частотою і синхронної за тактами з сигналом завод зводиться до ефекту дії гауссівського шуму з рівномірним спектром тієї ж середньої потужності за умови, що база ФМ послідовності  $B \geq 50$ . Дане обмеження врахуємо при виведенні розрахункових співвідношень і отриманні оцінок заводозахищеності радіоканалу.

Можна показати [1; 8], що в разі використання ЧФМ сигналів на етапі їх розрізнення проста ретрансляція завади недоцільна, оскільки при некогерентному прийомі не враховується знак при накладенні синфазних і квадратурних складових сигналу. Якщо ж з ймовірністю 1/2 чергувати таку заваду і заваду з протилежними частотами, тобто за допомогою гетеродинування перетворювати робочу частоту в її обернену і навпаки, то оскільки в приймальному сигналі не містяться протилежні частоти, а їх фази називаються невідомими, когерентність складання ретранслюючої завади після гетеродинування буде порушена [1; 8].

Таким чином, ймовірність  $P_{\text{пом}}(s, n)$  при некогерентному розрізненні квазіортогонального ЧФМ сигналу на фоні структурної завади визначимо, використовуючи вираз (1):

$$P_{\text{пом}}(s, n) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{P_{\text{с}} \cdot B \cdot (1 - R_{\text{с}})}{P_{\text{ш}} + P_{\text{нн}}}\right), \quad (8)$$

де  $R_{\text{с}}$  – коефіцієнт АФВК застосовуваних сигналів;

$P_{ш}$  – потужність складової шуму в смузі  $\Delta F_c$  ;

$P_{пн}$  – потужність навмисної завади в смузі підканалу.

В умовах активної дії на радіоканал потужних навмисних завад і наявності у заводопостановника можливостей забезпечення відношення  $W = P_{пн}/P_c$  в інтервалі  $40 \leq W \leq 60$  (дБ) [1; 3] у подальших розрахунках можна нехтувати складовою в (8) по відношенню до  $P_{пн}/P_c$  як величиною значно меншого порядку і переписати дане співвідношення у вигляді

$$P_{пом}(s, n) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{B \cdot (1 - R_6)}{P_{пн}/P_c}\right). \quad (9)$$

Вважатимемо, що складова потужності навмисної завади  $P_{пн}$  у кожному з  $G$  підканалів однакова і дорівнює  $P_{пн}/G$ , тобто вираз (9) можна записати у вигляді

$$P_{пом}(s, n) = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{B \cdot (1 - R_6)}{W/G}\right). \quad (10)$$

Складова ймовірності помилки  $P_{пом}(s, ш)$  визначається виходячи із співвідношення вигляду [2; 3; 8; 13]:

$$P_{пом}(s, ш) = \frac{1}{2} \exp(-H_c^2 / 2), \quad (11)$$

де  $H_c^2 = E_c / N_0$  – відношення сигнал-шум на вході розв'язувального пристрою.

Таким чином, після підстановки (7), (9), (11) в (2) і (1) ймовірність помилки в каналному символі на сигнальному рівні визначимо із співвідношення

$$P_{пом}^s = (M-1) \left[ \frac{Q \cdot B \cdot 2R_i}{\Delta F_k \cdot m \cdot R_k} \cdot \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{B(1-R_6)}{W/Q}\right) + \frac{G \cdot B \cdot 2R_i}{\Delta F_k \cdot m \cdot R_k} \cdot \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{B(1-R_6)}{W/G}\right) + \left(1 - \frac{G \cdot B \cdot 2R_i}{\Delta F_k \cdot m \cdot R_k}\right) \cdot \frac{1}{2} \exp(-H_c^2 / 2) \right]. \quad (12)$$

На рис. 1 зображений графік залежності  $P_{пом}^k$  від відносної кількості підканалів, уражених навмисними завадами  $G/L$ , розрахованими за співвідношенням (12) при  $\Delta F = 2$  ГГц,  $R_i = 1,2$  кбіт/с,  $W = 40$  дБ,  $B = 128$ ,  $m = 6$ ,  $R_k = 0,7$ ,  $N = 63$ .

З аналізу поданого рисунка видно, що оптимальною для заводопостановника є організація всього 0,4 % (від загальної кількості підканалів) структурних завад.

На рис. 2 – 5 зображені графіки, що пояснюють залежність при різних значеннях  $R_6$  і фіксованих значеннях  $B = 128$ ,  $m = 5$ .

Аналіз кривих, наведених на цих рисунках, до-

зволяє побачити, що з одного боку, для кожного значення  $R_6$ ,  $H_6^2$  спостерігається явно виражений максимум, що відповідає оптимальному значенню  $R_k$ , з іншого боку – досягнення необхідних значень вірогідності повідомлень, які передаються в радіоканалі (наприклад ділянка в межах  $10^{-3}$ – $10^{-5}$ , виділена вертикальними лініями на рисунках), можливе за рахунок оптимального вибору енергетичних параметрів  $H_6^2$  радіоканалу і відносної швидкості кодування для цього випадку.

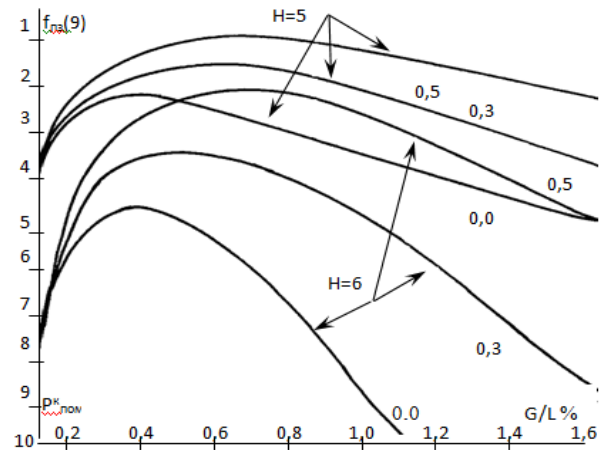


Рис. 1. Залежність  $P_{пом}^k$  від  $G/L$

Таким чином, аналіз рис. 1 та виразу (12) показує, що залежність ймовірності помилки від параметрів сигнально-кодових конструкцій має складний вигляд

$$f_{пз} = \phi(B, R_6, N) \quad (13)$$

при фіксованих ( $\Delta F_k$ ,  $W$ ,  $R_i$ ,  $H_6^2$ ) і оптимальних ( $G$ ,  $R_k$ ).

Вплив величини  $m$  на ймовірність  $P_{пом}^k$  при фіксованих  $B = 128$ ,  $H_6^2 = 6$  дБ і різних значеннях  $R_6$  показано на рис. 2 – 5 зображені графіки залежності  $P_{пом}^k$  від  $R_6$  і  $R_k$  при  $m = 6$ ,  $B = 128$ ,  $H_6^2 = 5$  дБ.

Аналіз даних, наведених на цих рисунках, показує, що із зменшенням величин  $m$  і  $H_6^2$  відмінність між значеннями показника  $P_{пом}^k$  залежно від значень  $R_6$  скорочується в значній мірі. Так, використання квазіортогональних ФМ сигналів з  $R_6 = 0,3$  і  $R_6 = 3,4$  при  $m = 6$ ,  $B = 128$ ,  $H_6^2 = 5$  дБ (рис. 3) приводить до відмінності заводозахисності в 1,25 дБ. У той же час для даних значень  $R_6$ ,  $B$  значення показника  $f_{скр}^s$  радіоканалу підвищиться на 3 порядки.

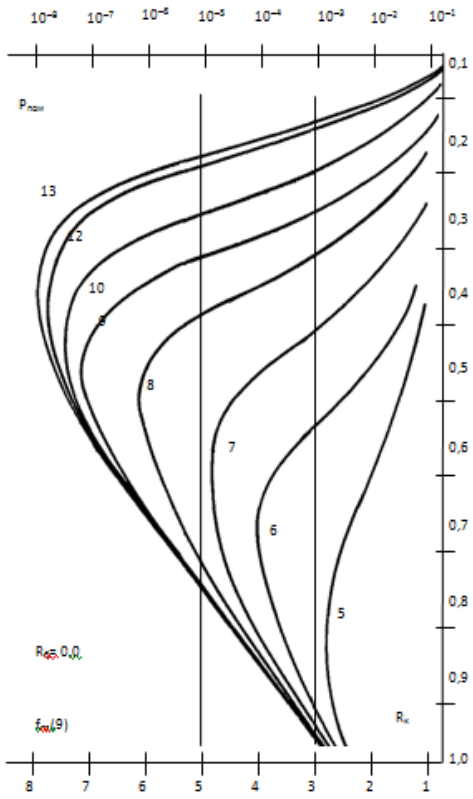


Рис. 2. Залежність  $P_{\text{пом}}(f_{\text{пз}})$  від  $R_k$  при  $R_b = 0,0$

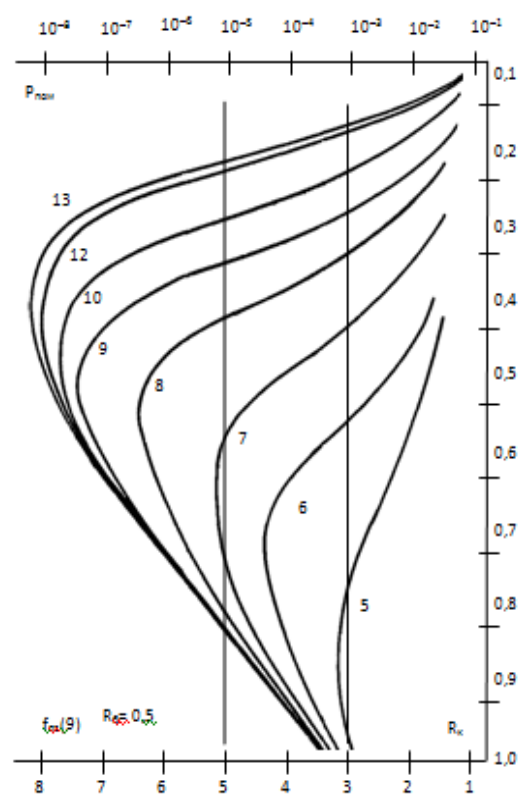


Рис. 4. Залежність  $P_{\text{пом}}(f_{\text{пз}})$  від  $R_k$ ,  $H_0^2$  (дБ) при  $R_b = 0,4$

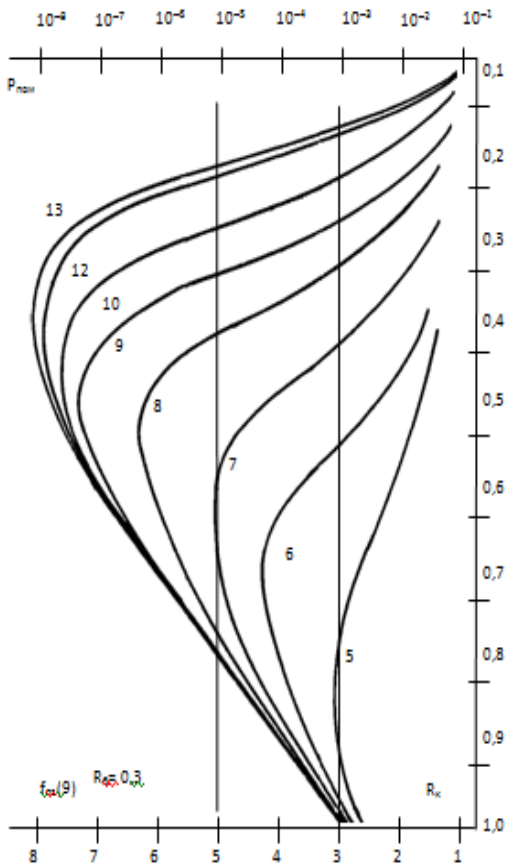


Рис. 3. Залежність  $P_{\text{пом}}(f_{\text{пз}})$  від  $R_k$ ,  $H_0^2$  (дБ) при  $R_b = 0,3$

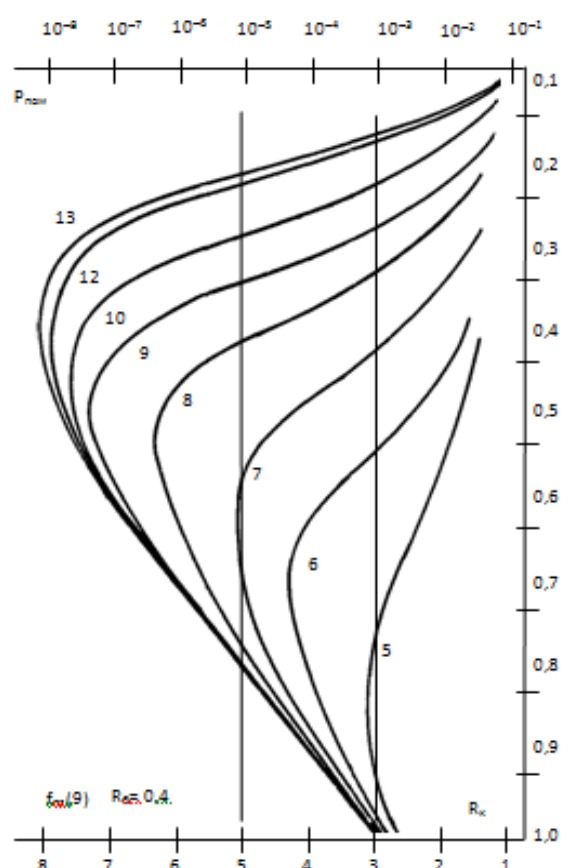


Рис. 5. Залежність  $P_{\text{пом}}(f_{\text{пз}})$  від  $R_k$ ,  $H_0^2$  (дБ) при  $R_b = 0,5$

## Висновки і напрями подальших досліджень

Таким чином, наведені вище співвідношення дозволяють, на відміну від відомих методик оцінки врахувати сумісне застосування в радіоканалі з параметрами, які вимірюються, ортогональних ЧФМ сигналів і завадостійких кодів, провести дослідження з метою вибору і обґрунтування параметрів сигнально-кової конструкції. Повної оптимізації необхідних параметрів радіоканалу при використанні даного математичного апарата досягти не можна, оскільки необхідно враховувати інші показники якості функціонування радіоканалу.

## Список літератури

1. Науменко М.І. Теорія сигнально-кодових конструкцій: монографія / М.І. Науменко, Ю.В. Стасев, О.О. Кузнецов, С.П. Євсєєв. – Х.: ХУПС, 2008. – 541 с.
2. Стасев Ю.В. Несимметричные теоретико-кодовые схемы с использованием алгеброгеометрических кодов / Ю.В. Стасев, А.А. Кузнецов // Кибернетика и системный анализ: Международный научно-теоретический журнал. – К.: Институт кибернетики НАН Украины. – 2005. – № 3. – С. 47-57.

3. Стасев Ю.В. Умови реалізації динамічного режиму функціонування захисту системи зв'язку та управління / Ю.В. Стасев, О.О. Мелешенко, І.О. Ткаченко // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2016. – Вип. 2(139). – С. 53-55.

4. Кларк Дж. Кодирование с исправлением ошибок в системах цифровой связи: Пер. с англ. / Дж. Кларк, Дж. Кейн. – М.: Радио и связь, 1987. – 392 с.

5. Мак-Вильямс Ф.Дж. Теория кодов, исправляющих ошибки / Ф.Дж. Мак-Вильямс, Н.Дж.А. Слоэн. – М.: Связь, 1979. – 744 с.

6. Блейхут Р. Теория и практика кодов, контролируемых ошибок: Пер. с англ. / Р. Блейхут. – М.: Мир, 1986. – 576 с.

7. Сорока Л.С. Основы теории минимально-избыточных сигналов. Математические методы и средства обработки / Л.С. Сорока. – Х.:МОУ, ОНИИ ВС, 2005. – 280 с.

8. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Изд. 2-е, испр.: Пер. с англ. / Б. Скляр. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2003. – 1104 с.

Надійшла до редколегії 21.10.2016

**Рецензент:** д-р техн. наук проф. Г.А. Кучук, Національний технічний університет «ХПІ», Харків.

## УСЛОВИЯ РЕАЛИЗАЦИИ СИГНАЛЬНО-КODOVЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПОМЕХОЗАЩИЩЕННЫХ СИСТЕМАХ СВЯЗИ И УПРАВЛЕНИЯ

Ю.В. Стасев, Д.О. Медведев, И.Е. Лещенко

В работе рассмотрена возможность обеспечения активной помехо- и имитозащиты в системах и средствах связи, защиты их от средств радиоэлектронной разведки и радиоэлектронной борьбы. Установлено, что для решения поставленных задач применяется реализация динамического режима функционирования. Доказаны теоремы недешифруемости динамического режима функционирования и определены необходимые и достаточные условия для путей его достижения.

**Ключевые слова:** радиоэлектронное противодействие, динамический режим функционирования, энтропия раскрытия, сигнально-кодовые конструкции, система связи.

## CONDITIONS OF IMPLEMENTATION SIGNAL-CODE CONSTRUCTIONS IN ANTI-INTERFERENCE COMMUNICATION AND CONTROL SYSTEMS

Y.V. Stasev, D.O. Medvedev, I.E. Leshchenko

The paper considers the possibility of providing an active noise-and simulation protection systems and means of communications, protecting them from the means of electronic intelligence and electronic warfare. It was found that for the task implementation applies a dynamic mode of operation. Theorems nedeshif-bility of the dynamic mode of operation and defined the necessary and sufficient conditions for the ways to achieve it.

**Keywords:** electronic countermeasures, the dynamic mode of operation, dis-covering entropy, signal-code construction, the communication system.