

УДК 621.396.41

DOI: 10.31673/2412-9070.2023.035060

С. С. БУЧИК, доктор техн. наук, професор;

С. В. ТОЛЮПА, доктор техн. наук, професор,

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РАДІОСИГНАЛУ ЗА НЕЛІНІЙНИМИ СПОТВОРЕННЯМИ В РАДІОТРАКТІ

*Реалізація можливостей систем зв'язку істотно залежить від якісних показників системи керування і її матеріальної основи — безпосередньо системи зв'язку, особливо під час повномасштабного вторгнення росії на територію нашої держави. Сьогодні готовність, імовірісно-часові та оперативно-технічні характеристики систем керування і зв'язку є такими ж важливими показниками, як кількість і якість засобів протидії ворогу. З метою підвищення ефективності функціонування мобільних компонент систем спеціального зв'язку планується широке використання в їх складі засобів і систем радіозв'язку (СРЗ). Це дасть змогу розв'язати сучасні проблеми з неперервності та стійкості керування вже найближчим часом і відкриває подальші перспективи на поліпшення оперативно-технічних характеристик системи спеціального зв'язку в цілому.*

*У процесі побудови систем радіозв'язку широко використовується метод ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (Orthogonal Frequency Division Multiplexing — OFDM). Велика увага приділяється питанням побудови сигнально-кодових конструкцій (СКК), які уможливають підвищення швидкості передавання інформації з обмеженнями на енергетику та ширину смуги робочих частот. У статті запропоновано методику, яка полягає в побудові сигнально-кової конструкції з оптимальними за критерієм максимуму частотної ефективності параметрами при обмеженні на значення ймовірності помилкового приймання сигналів за умов нелінійних спотворень сигналу в радіотракті, що дає змогу підвищити швидкість передавання інформації під час обмежень на енергетику та ширину смуги робочих частот (підвищити частотну ефективність системи). Підвищення частотної ефективності СРЗ із OFDM через узгодження форми переданих сигналів і виду модуляції з параметрами каналу зв'язку без додаткового розширення смуги пропускання каналу і збільшення потужності передавача є досить актуальним завданням.*

**Ключові слова:** радіосигнал; завадостійкість; енергетична ефективність; сигнально-кодова конструкція.

### Вступ

Реалізація можливостей систем зв'язку істотно залежить від якісних показників системи керування та її матеріальної основи — системи зв'язку, особливо під час повномасштабного вторгнення росії на територію нашої держави. Нині готовність, імовірісно-часові та оперативно-технічні характеристики систем керування і зв'язку є такими ж важливими показниками, як кількість і якість засобів протидії ворогу.

Необхідність оброблення великих обсягів інформації та скорочення термінів її проходження між органами керування з метою якісного і своєчасного ухвалення рішень; потреби в автоматизованих системах керування (АСК), високошвидкісному обміні даними; підвищення вимог до мобільності та економичності системи зв'язку — усі ці фактори визначають потребу у збільшенні питомих швидкостей передавання інформації наявними каналами і трактами в системах зв'язку.

Для підвищення ефективності функціонування мобільних компонент систем спеціального зв'язку планується широке використання в їх складі засобів і систем радіозв'язку (СРЗ). Це дасть можливість розв'язати сучасні проблеми щодо неперервності та стійкості керування вже найближчим часом і відкрити подальші перспективи на поліпшення оперативно-технічних характеристик системи спеціального зв'язку в цілому.

Зараз у всьому світі широко використовується метод ортогонального частотного розділення з мультиплексуванням (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM). Дослідженням цього методу активно приділяють увагу як вітчизняні, так і зарубіжні вчені [1-5].

Широко він використовується і в процесі побудови систем радіозв'язку. Особлива увага надається питанням побудови сигнально-кодових конструкцій (СКК), які дають можливість підвищити швидкість передавання інформації з обмеженнями на енергетику та ширину смуги робочих частот (підвищити частотну ефективність системи) [6; 7]. Нарощення частотної ефективності СРЗ із OFDM завдяки узгодженню форми переданих сигналів і виду модуляції з параметрами каналу зв'язку без додаткового розширення смуги пропускання каналу і збільшення потужності передавача є досить актуальним завданням.

© С. С. Бучик, С. В. Толюпа, 2023

Основна частина

Аналіз ефективності систем радіозв'язку показує, що використання багатопозиційної модуляції хоча й уможливорює підвищення швидкості передавання порівняно з двійковою модуляцією, але не дає змоги наблизитися до пропускної здатності ні за частотною, ні за енергетичною ефективністю. Використання ж коригувальних кодів разом із двійковою модуляцією дозволяє наблизитися до пропускної здатності, близької до межі Шеннона.

Задача підвищення енергетичної ефективності в радіотракті має комплексний характер і становить цілу низку аспектів, основними з яких є два: енергетичні витрати на функціонування апаратури; енергетичні витрати на передавання інформації, тобто витрати енергії, яка спрямовується безпосередньо в телекомунікаційний тракт [9]. У деяких наукових працях запропоновано рішення другого аспекту задачі завдяки формуванню принципово нової, порівняно з ІКМ, структури цифрового сигналу. Під час перетворення початкового сигналу (стандартного сигналу ІКМ) такі характеристики системи, як необхідна смуга частот, завадостійкість та інформаційна швидкість передавання, потрібно зберегти незмінними, такими самими, як і у відповідних структур ІКМ-сигналів. Це дасть можливість застосовувати даний спосіб на робочих СРЗ [9].

У реальних багатопроменевих каналах зв'язку крім адитивного шуму виникає міжсимвольна інтерференція (МСІ), спричинена пам'яттю каналів. Реакція каналу на послідовність вхідних сигналів зумовлює взаємне накладення сигналів на виході каналу. Якщо нормувати за потужністю амплітудно-частотну характеристику каналу, то можна сказати, що МСІ призводить до значної зміни відстаней між сигналами на виході каналу і, що особливо важливо, до зменшення мінімальної відстані між ними.

Розглянемо підхід до кодування в каналах із МСІ, заснований на синтезі таких сигнально-кодових конструкцій, які зважають на «деформацію» простору сигналів під час передавання по реальному каналу. Основою цього підходу є можливість перетворення каналів із МСІ в сукупність гауссових каналів без пам'яті, тобто без МСІ, але таких, що відрізняються один від одного скалярним коефіцієнтом передавання або відношенням сигнал/шум. Алгоритм оптимізації вибору СКК для СРЗ із OFDM подано на рис. 1.

Сутність методики полягає в побудові сигнально-кодової конструкції з оптимальними за критерієм максимуму частотної ефективності параметрами з обмеженням на значення ймовірності помилкового приймання сигналів за умов селективних завмирань і нелінійних спотворень [10;11].

Постановка задачі.

**Задано:** параметри передавального пристрою і каналу зв'язку  $\Psi = \{\psi_i\}$ ,  $i = 1, \overline{10}$ , де  $\psi_1, \dots, \psi_{10}$  — відповідно потужність корисного сигналу, відношення сигнал/шум, вид модуляції, швидкість передавання інформації, смуга пропускання каналу зв'язку, розмірність ансамблю сигналів, коефіцієнт нелінійних спотворень сигналу в радіотракті, довжина кодової комбінації, швидкість коригувального коду, величина кодової відстані.

**Необхідно:** побудувати OFDM-СКК, яка максимізує частотну ефективність СРЗ  $\beta_F$  у разі виконання обмеження на значення допустимої ймовірності помилкового приймання сигналів  $P_{\text{пом}} \leq P_{\text{пом. доп}}$ .

**Обмеження:** розмірність ансамблю сигналів  $2 \leq M \leq 256$ ; вид коригувального коду — згортковий код зі швидкістю  $R = 0,5-0,9$ ; ймовірність помилкового приймання сигналів  $P_{\text{пом}} \leq 10^{-5}$ .

Завдання визначення параметрів СКК із максимальними показниками частотної ефективності

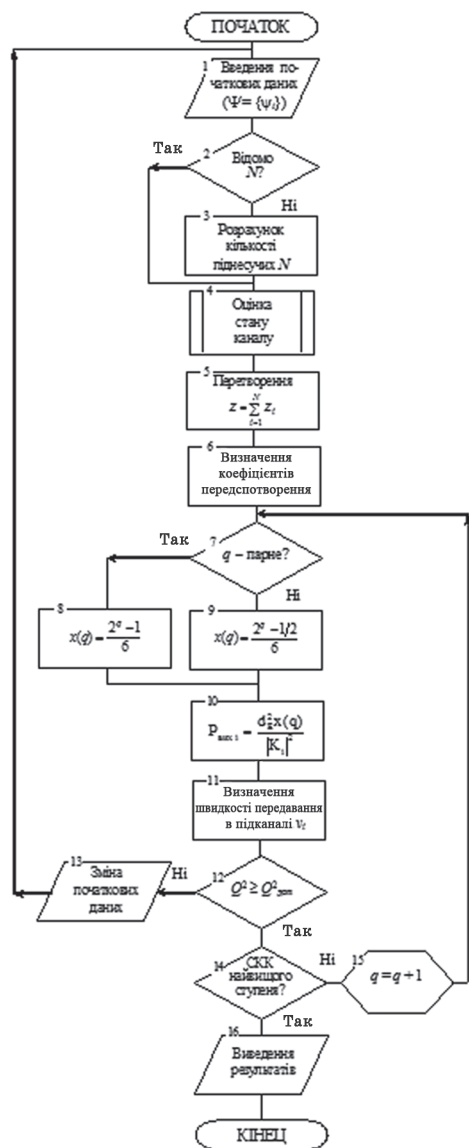


Рис. 1. Алгоритм оптимізації вибору СКК для СРЗ із OFDM

зводяться до типової оптимізаційної задачі. Система рівнянь для розв'язання оптимізаційної задачі має вигляд

$$\begin{cases} \beta_F = F_1(v_i, \Delta F, M, K_3, n, R, d) = \max; \\ P_{\text{пом}} = F_2(v_i, P_c, M, n, R, d) \leq P_{\text{пом, доп}}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $n$  — довжина кодової комбінації;  $P_c$  — потужність сигналу;  $M$  — розмірність ансамблю сигналів;  $R$  — швидкість коригувального коду;  $d$  — кодова відстань.

Методика вибору OFDM-СКК для систем радіозв'язку має такі етапи.

- *Уведення вихідних даних.* Уводяться параметри передавального пристрою і каналу зв'язку  $\Psi = \{\psi_i\}$ , а також значення допустимої величини ймовірності помилкового приймання сигналів  $P_{\text{пом, доп}}$ .

- *Вибір кількості підносійних.* Під час проходження групового сигналу з OFDM через нелінійні радіотракти радіозасобів порушується ортогональність підносійних, що призводить до їх взаємного впливу і, врешті, до зниження завадостійкості приймання сигналів.

- *Оцінювання передатної характеристики каналу зв'язку.* На цьому етапі за допомогою методу, запропонованого в [3], оцінюється стан багатопробеневого каналу зв'язку.

- *Перетворення каналу з міжсимвольними спотвореннями в сукупність гауссівських каналів без пам'яті.* У реальних частотно-обмежених каналах зв'язку крім адитивного шуму виникає міжсимвольна інтерференція, спричинена пам'яттю каналів. Реакція каналу на послідовність вхідних сигналів зумовлює взаємне накладення сигналів на виході каналу. Якщо нормувати за потужністю амплітудно-частотну характеристику каналу, то можна сказати, що МСІ призводить до значної зміни відстаней між сигналами на виході каналу і, що особливо важливо, до зменшення мінімальної відстані між ними.

У гауссівського каналу із МСІ (ГКМСІ) вхід і вихід каналу пов'язані виразом [4]

$$Z = K_h X + B, \quad (2)$$

де  $X$  — відліки переданого сигналу на вході каналу;  $B$  — відліки білого гауссівського шуму (БГШ);  $K_h$  — матриця каналу ( $L_0 \times L$ ), елементами якої є компоненти вагової послідовності  $\{h_n\}_{n=0}^{l-1}$ .

При цьому параметр  $l$  визначає пам'ять каналу, оскільки кожний відлік сигналу на вході являє собою лінійну комбінацію  $l$  переданих відліків. Якщо тривалість (кількість відліків) захисного інтервалу  $l_0$  більша або дорівнює пам'яті каналу  $l - 1$ , то блоки на виході каналу перекриваються. Отже, умова  $l_0 \geq l$  є умовою відсутності міжблокової інтерференції. Довжина блока на виході більша, ніж на вході, і дорівнює  $L_0 = L + l - 1$ .

Для такого каналу справедливо таке твердження. Якщо потужність БГШ на виході ГКМСІ дорівнює  $P_{\text{ш}}$ , а середня потужність сигналу на його виході обмежена величиною  $P_{\text{сеп}}$ , то пропускну здатність ГКМСІ, власні значення якого  $|K_0| \geq |K_1| \geq \dots \geq |K_{L-1}|$ , можна дістати з виразу

$$C = v_0 \frac{1}{L} \sum_{i=0}^M \frac{1}{2} \log_2 \left[ |K_i|^2 \frac{L}{M} \left( \frac{P_{\text{ш}}}{P_{\text{сеп}}} + \frac{1}{L} \sum_{m=0}^M \frac{1}{|K_m|^2} \right) \right]; \quad v_0 = v_0 \frac{L}{L_0} = \frac{1}{1 + l_0/L}, \quad (3)$$

де  $v_0$  — відносна швидкість передавання в разі введення захисних інтервалів між сигнальними блоками;  $M \leq L - 1$  — найбільше число, для якого вхідна потужність визначатиметься за формулою

$$P_M = P_{\text{сеп}} \frac{L}{M} + P_{\text{ш}} \left[ \frac{L}{M} \sum_{m=0}^M \frac{1}{|K_m|^2} - \sum_{m=0}^M \frac{1}{|K_m|^2} \right] > 0.$$

При  $L \rightarrow \infty$  ГКМСІ перетворюється в гауссівський канал без пам'яті (ГКБП), входом якого є стаціонарна випадкова послідовність  $\{Z_K\}_{K \rightarrow -\infty}^{\infty}$ , а виходом — стаціонарна випадкова послідовність  $\{\tilde{Z}_K\}_{K \rightarrow -\infty}^{\infty}$ .

У результаті описаного раніше перетворення ГКМСІ в сукупність незалежних паралельних ГКБП вхід і вихід кожного каналу пов'язані виразом

$$Z_i = K_i X_i + B_i, \quad i = \overline{0, L-1}.$$

- *Визначення параметрів передспотворення сигналів.* Розглянемо підхід до кодування в каналах із МСІ, заснований на синтезі таких сигнально-кодових конструкцій, які беруть до уваги «деформацію» простору сигналів під час передавання по реальному каналу.

Для оптимізації параметрів групового сигналу з OFDM вводиться передспотворення сигналу на передаванні  $X_i = \frac{1}{|K_i|} \xi_i$ , і корекція на прийманні  $\xi_i = b_i Z_i$ , де  $b_i = e^{-j \arg K_i}$ .

- *Визначення середньої потужності сигналу на виході підканалу.* Якщо вихідний канал має істотну нерівномірність амплітудно-частотної характеристики у смузі Найквіста, то здобуті канали можуть бути досить різні. Розходження характеристик підканалів має враховуватися в процесі побудови сигналів і СКК.

Зазвичай у паралельних підканалах із передспотвореннями використовуються різні алфавіти сигналів із фазовою маніпуляцією (ФМ) та з квадратурною амплітудною модуляцією (КАМ), але з тією самою мінімальною відстанню Евкліда  $d$ , що не залежить від номера підканалу  $i$ . Необхідність розгляду цього варіанта пояснюється можливістю побудови на його основі ефективних сигналів і сигнально-кодових конструкцій [5].

Середня потужність на виході  $i$ -го підканалу має вигляд

$$P_{\text{вих}i} = P_{q_j} / |K_i|^2, \quad m_{j-1} \leq i \leq m_j - 1, \quad (4)$$

де  $P_{q_j} = d_E^2 x(2^{q_j})$  — середня потужність сигналу КАМ на виході підканалів із номерами  $m_{j-1}$  до  $m_j - 1$ , а

$$x(q) = \begin{cases} (2^q - 1/2)/6, & q = 2n - 1, \\ (2^q - 1)/6, & q = 2n, \quad n = 1, 2, \dots \end{cases} \quad (5)$$

Середня потужність на виході групового каналу з OFDM обмежена значенням  $P_{\text{сер}}$

$$\frac{1}{N} \sum_{i=0}^{M_1-1} P_{\text{вих}i} \leq P_{\text{сер}}. \quad (6)$$

Підставивши вираз (4) у формулу (6), дістанемо

$$d_E^2 \sum_{j=1}^Q x(2^{q_j}) \frac{1}{N} \sum_{i=m_{j-1}}^{m_j-1} \frac{1}{|K_i|^2} \leq P_{\text{сер}}. \quad (7)$$

З огляду на те, що

$$\frac{1}{N} \sum_{i=m_{j-1}}^{m_j-1} \frac{1}{|K_i|^2} = f_m(m_j) - f_m(m_{j-1}),$$

де  $f_L(M) = \frac{1}{L} \sum_{i=0}^{M-1} \frac{1}{|K_i|^2}$ , матимемо

$$d_E^2 \sum_{j=1}^Q x(2^{q_j}) [f_L(m_j) - f_L(m_{j-1})] \leq P_{\text{сер}}. \quad (8)$$

• *Розрахунок максимальної швидкості передавання в кожному підканалі.* Максимальна швидкість у кожному підканалі за фіксованого  $q_j$  визначається в такий спосіб:

$$v(q_j, P_{q_j} / P_{\text{ш}}) = v(q_j, d_E^2 \varphi(2^{q_j}) / P_{\text{ш}}). \quad (9)$$

• *Визначення максимальної швидкості передавання групового сигналу.* Сумарна швидкість у каналі з OFDM задається виразом

$$v = v_0 \frac{1}{N} \sum_{j=1}^Q s_j v(q_j, d_E^2 x(2^{q_j}) / P_{\text{ш}}), \quad (10)$$

де  $s_j = m_j - m_{j-1}$ ,  $m_0 = 0$  — кількість підканалів з однаковим алфавітом КАМ.

Оптимізація розглянутого варіанта за швидкістю з обмеженою середньою потужністю сигналу на вході каналу зводиться до вибору оптимального розбиття паралельних ГКБП на групи з однаковою швидкістю, оптимального вибору алфавітів КАМ і мінімальної відстані  $d$  в них.

Максимально можлива швидкість для каналу з OFDM з передспотвореннями та довільними алфавітами КАМ у кожному з паралельних підканалів за умови, що мінімальна відстань у всіх алфавітах постійна і дорівнює  $d$ , задається виразом

$$v_{\text{max}} \max_{d>0} \max_{s_j=1,2,\dots} \max_{q_j=1,2,\dots} v_0 \frac{1}{N} \sum_{j=1}^Q m_j v \left( q_j, \frac{d_E^2 x(2^{q_j})}{P_{\text{ш}}} \right) \quad (11)$$

за обмежень, наведених раніше, на допустиму середню потужність сигналу на вході каналу з OFDM, а  $s_j = m_j - m_{j-1}$ ,  $m_0 = 0$ ,  $0 < m_1 < m_2 < \dots < m_Q \leq M_1$  — розбиття множини підканалів на групи з  $v_j$  паралельних каналів, у кожному з яких використовується однаковий алфавіт КАМ із середньою потужністю

$$P_{q_j} = d_E^2 x(2^{q_j}).$$

Отже, ми здобули східчасту конструкцію, в якій переданий блок у результаті віртуальних перетворень на передавальному і приймальному боці перетворить систему до  $N$  паралельних каналів, з яких  $m_1$  модулюються КАМ-2,  $m_2$  сигналів модулюються КАМ-4,  $m_3$  сигналів модулюються КАМ-8 тощо. Останні  $m_q$  сигналів модулюються КАМ- $2^q$ . Криві заводстійкості в разі оптимального приймання сигналів із квадратурною амплітудною модуляцією при  $M = 2 \dots 128$  наведено на рис. 2.

Тепер на дану сигнальну конструкцію можна «накладати» коригувальний код і одержувати СКК.

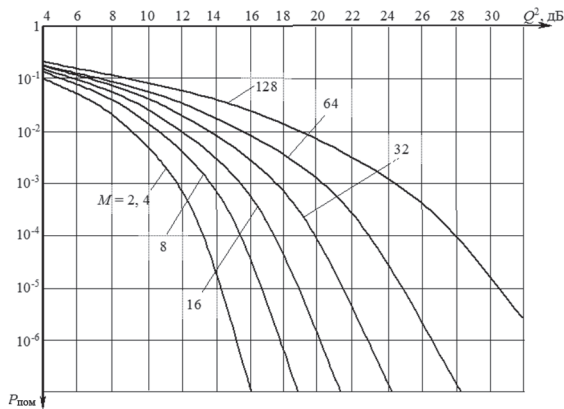


Рис. 2. Криві завадостійкості сигналів із багатопозиційною квадратурною амплітудною модуляцією

Для побудови імітаційної моделі було застосовано метод прямого ймовірнісного моделювання, який полягає в генерації послідовності реалізацій вихідних випадкових процесів і функціональному перетворенні їх відповідно до структури модельованої системи і, нарешті, до статистичного оброблення послідовності реалізацій на виході системи.

Ефективність застосування розробленої методики оцінюється за формулою

$$\Delta\beta_F = \frac{\beta_F^* - \beta_F}{\beta_F} 100\%,$$

де  $\beta_F^*$  — коефіцієнт використання смуги пропускання каналу зв'язку в системі радіозв'язку із застосуванням запропонованої методики вибору СКК;  $\beta_F$  — коефіцієнт використання смуги пропускання каналу зв'язку в системі радіозв'язку без зміни параметрів СКК.

Застосування адаптивної зміни виду СКК залежно від рівня селективних завмирань у каналі дає можливість підвищити частотну ефективність системи і, відповідно, збільшити пропускну здатність системи радіозв'язку.

Ефект від упровадження запропонованої методики полягає в підвищенні показників частотної ефективності СРЗ. Так, синтезовані за допомогою розробленої методики СКК з багатопозиційною квадратурною амплітудною модуляцією і згортковими кодами дає змогу збільшити частотну ефективність СРЗ на 2,5...4 дБ за різного ступеня глибини селективних завмирань сигналу в каналі зв'язку.

#### Список використаної літератури

1. Xuanjie Luo. *The application of OFDM in optical fiber communication systems*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019. Vol. 332, Issue 4. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 332 042010.
2. *Mathematical model of orthogonal frequency distribution and multiplexing (OFDM) signals* / I. Gorbunenko, O. Zamula, V. Morozov, S. Rodionov // Radiotekhnika, 2019. 3(198). P. 32–43.
3. *ASCO-OFDM based VLC system throughput improvement using PAPR precoding reduction techniques* / Sara M. Farid, Mona Z. Saleh, Hesham M. Elbadawy, Salwa H. Elramly // Optical and Quantum Electronics, 2023. 10.1007/s11082-023-04651-w, 55, 5.
4. Samir M. Hameed, Atheer A. Sabri, Sinan M. Abdulsatar. *Filtered OFDM for underwater wireless optical communication* // Optical and Quantum Electronics, 2022. 10.1007/s11082-022-04359-3, 55, 1.
5. Стеклов В. К., Беркман Л. Н., Кільчицький Є. В. *Оптимізація та моделювання пристроїв і систем зв'язку: підруч. для вищ. навч. закл. Київ: Техніка, 2004. 576 с.*
6. Кувшинов О. В. *Оцінка ефективності сигнально-кодових конструкцій з багатопозиційною частотною маніпуляцією*. Київ: зб. наук. праць ВІТІ НТУУ «КПІ», 2002. Вип. 4. С. 138–144.
7. Кувшинов О. В. *Методика вибору сигнально-кодових конструкцій в системах рухомого радіозв'язку* // Зв'язок. 2002. № 3. С. 30–34.
8. Toliupa S. V., Parkhomenko I. I. *Methodology of selecting optimal parameters of OFDM- SCC in conditions of selective stopping in radio path*. Science and Education a New Dimension // Natural and Technical Sciences, III(8), Issue: 73, Будапешт. 2015. С. 81–85.
9. Toliupa S., Vabenko T. *The method of forming and signal processing aimed at improving stealth and energy efficiency* // Радиотехніка та телекомунікації. 2017. №2. С. 121–130.
10. Міночкін Д. А., Борисов І. В. *Метод контролю стану каналу зв'язку із селективними завмираннями*. Київ: зб. наук. праць ВІТІ НТУУ «КПІ», 2006. Вип. 3. С. 66–71.

#### Висновки

У запропонованій методиці оптимальні параметри OFDM-СКК визначаються для випадку передавання інформації по каналу зв'язку за умов селективних завмирань із урахуванням нелінійних спотворень сигналу в радіотракті. Раціональні параметри СКК для конкретного стану каналу зв'язку визначаються зі скінченної кількості допустимих варіантів, що дає змогу спростити практичну реалізацію модемного обладнання адаптивних систем радіозв'язку.

Для оцінювання ефективності запропонованої методики було проведено імітаційне моделювання роботи OFDM-системи за різного ступеня глибини селективних завмирань сигналу в каналі зв'язку.

11. Метод синтезу демодуляторів сигналів у тропосферних каналах за наявності частотно-селективних замирань / Л. Н. Беркман, С. В. Козелков, О. С. Панкратова [та ін.] // Зв'язок. 2017. № 1. С. 8–12.

S. Buchyk, S. Toliupa

#### OPTIMIZATION OF RADIO SIGNAL PARAMETERS WITH NONLINEAR DISTORTIONS IN THE RADIO TRACK

The realization of the possibilities of communication systems depends significantly on the quality indicators of the management system and its material basis - the communication system itself, especially during the full-scale invasion of Russia on the territory of our state. Currently, the readiness, probabilistic-temporal and operational-technical characteristics of control and communication systems are as important indicators as the number and quality of means of countering the enemy. In order to increase the effectiveness of the functioning of the mobile components of the special communication systems, it is planned to make extensive use of radio communication equipment and systems in their composition. This will allow solving the existing problems of continuity and stability of management already in the near future and opens further prospects for improving the operational and technical characteristics of the special communication system as a whole

Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) is widely used in the construction of radio communication systems. A lot of attention is paid to the construction of signal-code structures (SCC), which allow to increase the speed of information transmission with restrictions on energy and bandwidth of operating frequencies. The article proposes a technique that consists in building a signal-code structure with optimal parameters according to the criterion of maximum frequency efficiency while limiting the probability of false reception of signals in the conditions of nonlinear signal distortions in the radio path, which allows to increase the speed of information transmission with restrictions on energy and bandwidth operating frequencies (increase the frequency efficiency of the system). Increasing the frequency efficiency of SRS with OFDM by matching the form of the transmitted signals and the type of modulation with the parameters of the communication channel without additional expansion of the channel bandwidth and increasing the transmitter power is a rather urgent task.

**Keywords:** radio signal; immunity to interference; energy efficiency; signal-code design.

