

БОЙКО Ю.М., НОВІКОВ Д.В.

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0003-0603-7827

e-mail: boiko\_julius@ukr.net

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ КАНАЛЬНОГО КОДУВАННЯ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ З OFDM

В роботі представлено результати дослідження методів підвищення завадостійкості телекомунікаційних каналів з OFDM. Досліджено структуру OFDM-сигналу. Проведено оцінку впливу структури сигналів OFDM на завадостійкість їх передачі в умовах впливу ефекту міжсимвольної інтерференції у багатопроменевому каналі. Дані рекомендації щодо вибору форми сигналів OFDM з метою протидії впливу міжсимвольної інтерференції за рахунок оптимізації тривалості імпульсної послідовності. Досліджено поведінку сигналів OFDM за наявності міжсимвольної інтерференції в АБГШ та Релеєвському каналі. Здійснено порівняння ефективності сигнально-кодових конструкцій на основі каскадних кодів у випадку їх застосування в каналах з OFDM. Встановлено, що оптимальний по швидкодії і обчислювальній складності підбір схеми та алгоритму декодування завадостійкого коду дозволяє знайти компроміс щодо конструювання каскадних схем у каналах з OFDM і отримати в кінцевому результаті задовільний вииграш у продуктивності.

Ключові слова: OFDM, завадостійкість, кодування, модуляція, ортогональні піднесучі.

BOIKO JULIY M., NOVIKOV DMITRY V.

Khmelnytskyi National University

## EVALUATION OF CHANNEL CODING EFFICIENCY IN OFDM TELECOMMUNICATIONS

The paper presents the results a study of methods for increasing the noise immunity of telecommunication channels with OFDM. The structure of the OFDM signal is investigated. The influence of the structure OFDM signals on the noise immunity of their transmission under the influence of the effect of intersymbol interference in a multipath channel is estimated. Recommendations are given on the choice of the OFDM signal form in order to counteract the influence of intersymbol interference by optimizing the duration of the pulse sequence. The behaviour of OFDM signals in the case of intersymbol interference in the AWGN and the Rayleigh channel is investigated. Recommendations for counteracting interference influence on the quality of communication are given. A comparison is made of the efficiency signal-code constructions based on concatenated codes in the case of their application in channels with OFDM. The article presents the results of the development models of effective coding in telecommunications with OFDM based on concatenated codes, taking into account the coding rate and the number of decoding iterations to ensure the specified noise immunity indicators. At the current stage of implementation of modern telecommunication technologies, the use of channel coding plays a key role in increasing the performance of channels that use OFDM. The main contribution of channel coding in combination with time and frequency interleaving is the formation of inter-bit communication in the data stream transmitted on separate carriers in the signal spectrum in such a way that the transmitted information data in the fading channel can be updated in the receiving equipment. In general, in this case, having frequency selectivity creates a certain advantage through frequency diversity. Thus, the presence of information about the state of the channel in the case of channel coding creates the prerequisites for obtaining a certain gain. Optimal in terms of speed and computational complexity, the selection of the scheme and algorithm for decoding the error-correcting code makes it possible to find a compromise in the design of concatenated circuits in channels with OFDM and ultimately obtain a satisfactory gain in performance.

Keywords: OFDM, noise immunity, coding, modulation, orthogonal subcarriers.

### Постановка проблеми

В процесі впровадження технології LTE (Long-Term Evolution) були сформовані основні вимоги до систем четвертого і п'ятого поколінь мобільного зв'язку (4G, 5G) [1]. Формування цих вимог обумовлювалось наявністю нових типів послуг які користувач буде вимагати у наступних додатках. В цьому випадку, послуги передачі даних стануть відігравати значну роль в порівнянні з передачею чистого голосу і зокрема за рахунок актуального запиту користувачів на мобільні IP-додатки. Затребуваною стане високошвидкісна передача даних 100Мбіт/с і вище, яка крім того повинна бути доступною у випадку високої мобільності та на високих швидкостях транспортних засобів. Підвищується актуальність надання асиметричних послуг передачі даних між висхідною та низхідною лінією передачі, коли переважним сценарієм стає випадок передачі низхідною лінією більшого трафіку, а отже застосовується більша швидкість у порівнянні з висхідною лінією [2].

Для виконання всіх цих детальних системних вимог метод передачі OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing - мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів), який застосовується у широкосмуговому радіоканалі [1], був обраний як ефірний інтерфейс для низхідної лінії зв'язку в рамках стандартизації четвертого і п'ятого поколінь бездротових систем телекомунікацій завдяки його гнучкості та адаптивності у технічному дизайні системи. З наведених вище міркувань потрібно наголосити на тому, що система радіопередачі для 4G та 5G повинна забезпечувати велику гнучкість та адаптивність на різних рівнях, починаючи від найвищого рівня (вимоги програмного рівня) до найнижчого рівня (середовища передачі, фізичного рівня, тобто рівня радіоканалу).

У первинній схемі частотного ущільнення, повна смуга частот сигналу розподіляється на  $n$ -ну кількість підканалів на піднесучих які не перекриваються [3–7]. Тоді кожний з каналів модулюється окремим символом і далі  $n$ -каналів мультиплекуються за частотою. Для усунення взаємного впливу та виникнення міжканальних завад слід було уникати їх частотного перекриття. Однак, такий стан речей обумовлює

неефективне використання ресурсу спектру. Таким чином, вирішення проблеми підвищення ефективності частотного ресурсу відбувалось в напрямку використання частотного мультиплексування з підканалами, які перекривались і рознесеними за частотою піднесучими [2].

Сьогодні техніка передачі OFDM знаходиться на стадії застосування до широкосмугових систем зв'язку, інтегрованих у середовище стільникового мобільного зв'язку [1].

На поточному етапі впровадження сучасних інформаційних технологій застосування каналного кодування відіграє ключову роль у підвищенні продуктивності каналів у яких застосовується OFDM.

Концепція організації систем OFDM створює передумови для підвищення ефективності каналного кодування, а саме підвищення протидії у виникненні завмирань у каналах передачі [2, 3]. Головний вклад каналного кодування в поєднанні з часовим та частотним перемешуванням полягає в утворенні міжбітового зв'язку в потоці даних, що передаються на окремих несучих у спектрі сигналу таким чином, що інформаційні дані які передаються в каналі із завмираннями можна поновити в приймальній апаратурі. Загалом, в цьому випадку наявність частотної вибірності створює певну перевагу у вигляді частотного рознесення. Таким чином, наявність інформації щодо стану каналу у випадку каналного кодування, створює передумови для отримання певного виграшу. Саме частотна характеристика каналу поряд з відношенням сигнал/шум на піднесучих – це та інформація щодо стану каналу яка утворює перевагу у випадку OFDM [2].

Таким чином, в статті ставиться задача визначення впливу структури сигналів OFDM на завадостійкість їх передачі в умовах впливу ефекту міжсимвольної інтерференції у багатопробієвому каналі. Потрібно описати особливості багатопробієвого каналу з сигналами OFDM, зокрема в контексті протидії впливу міжсимвольної інтерференції, за рахунок оптимізації тривалості імпульсної послідовності. Потрібно дослідити поведінку сигналів OFDM за наявності міжсимвольної інтерференції як в каналі з адитивним білим гаусівським шумом (АБГШ) так і в Релеєвському каналі та надати рекомендації щодо протидії завадовим впливам на якість зв'язку. Паралельно в роботі потрібно здійснити порівняння ефективності сигнально-кодових конструкцій на основі каскадних кодів у випадку їх можливого застосування в каналах з OFDM. Дослідження будуть проводитись в каналах з використанням цифрової фазової та амплітудної модуляції різного порядку.

#### Аналіз останніх джерел

Для забезпечення умов високошвидкісної передачі даних по радіоканалу, альтернативою класичному підходу описаному у [5] і який ґрунтується на передачі за допомогою однієї несучої, є підхід який враховує можливість передачі даних з максимальною затримкою у випадку багатопробієвого розповсюдження в порівнянні з тривалістю символу та має концепцію OFDM. В цьому випадку загальна ідея передавання OFDM полягає у розділенні всієї доступної смуги частот пропускання на низку вузькосмугових підканалів, що передаються на еквідистантних частотах (рис. 1).

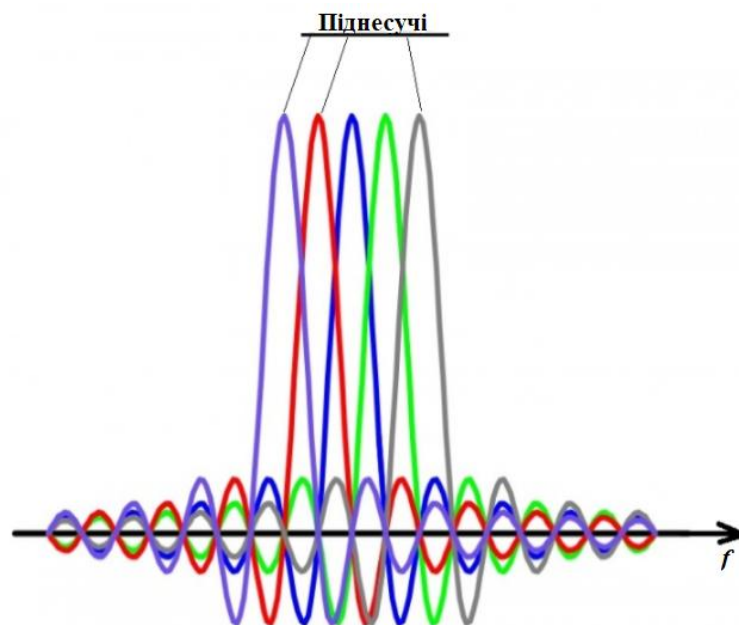


Рис. 1. Розміщення піднесучих в частотній області при формуванні сигналів з ортогональним частотним рознесенням каналів

Представимо сигнали OFDM основної смуги пропускання наступним чином [3]:

$$u_l(t) = \operatorname{Re} \left\{ \frac{1}{T_{\text{см}}} \sum_{l=0}^{\infty} \left\{ \sum_{k=0}^{N-1} U_l[k] \Psi_{l,k}(t) \right\} \right\}, \quad (1)$$

де у формулі (1)  $\Psi_{l,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k(t-lT_{cm})}, & 0 < t \leq T_{cm} \\ 0, & \text{в інших випадках} \end{cases}$  –  $l$ -й сигнал на  $k$ -й піднесучій;  $T_{cm} = T_c N$  – часовий інтервал передачі  $N$  символів, який обумовлений процедурою послідовно-паралельного перетворення (див. схему на рис. 2).

Або:

$$u_l(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} U_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{cm})}, \quad (2)$$

Після дискретизації неперервного сигналу (2) отримаємо:

$$u_l[n] = \sum_{k=0}^{N-1} U_l[k] e^{j2\pi kn/N} \text{ для } n = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3)$$

де  $t = lT_{cm} + nT_c$ ;  $T_c = T_{cm}/N$ ;  $f_k = k/T_{cm}$ .

Зазначимо, що в рівнянні (3) використовується  $N$  – точкове зворотне перетворення Фур'є для багатопозиційних фазової (ФМ) та амплітудної (АМ) модуляції символів, які містять данні  $\{U_l[k]\}_{k=0}^{N-1}$  для обчислення яких можна застосувати алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ).

Таким чином, якщо математично описати передані в каналі символи як  $s_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} U_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{cm})}$ , то внаслідок ортогональності піднесучих їх можна відновити наступним чином:

$$\begin{aligned} S_l[k] &= \frac{1}{T_{cm}} \int_{-\infty}^{\infty} s_l(t) e^{-j2\pi k f_k(t-lT_{cm})} dt = \frac{1}{T_{cm}} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_{i=0}^{N-1} U_l[i] e^{j2\pi f_i(t-lT_{cm})} \right\} e^{-j2\pi k f_k(t-lT_{cm})} dt \\ &= \sum_{i=0}^{N-1} U_l[i] \left\{ \frac{1}{T_{cm}} \int_{-\infty}^{\infty} e^{j2\pi (f_i - f_k)(t-lT_{cm})} dt \right\} \\ &= U_l[k] \end{aligned} \quad (4)$$

або в дискретному вигляді:

$$\begin{aligned} S_l[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} s_l(n) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} = \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} U_l[i] e^{\frac{j2\pi in}{N}} \right\} e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} = \\ &= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} U_l[i] e^{j2\pi (i-k)n/N} = U_l[k] \end{aligned} \quad (5)$$

Отже, рівняння (5) представляє собою  $N$  – точкове перетворення Фур'є  $\{s_l(n)\}_{n=0}^{N-1}$ , для якого можна застосувати алгоритм швидкого перетворення Фур'є.

Таким чином у відповідності до представлених математичних моделей схему формування і обробки сигналів у випадку OFDM можна представити рис. 2. На схемі рис. 2 символи  $U_l[k]$  модулюють піднесучі  $f_k = k/T_{cm}$  (на рис. 2 умовно показано випадок, коли  $N=6$ ), які можна обробити у демодуляторі на підставі застосування правил ортогональності. Символ OFDM утворено з  $N$  символів в паралельному форматі, причому, складовий утворений символ має тривалість  $T_{cm} = T_c N$ . Модуляція на піднесучих може бути реалізована за допомогою зворотного швидкого перетворення Фур'є. Демодуляція реалізується на приймальному боці на основі прямого швидкого перетворення Фур'є.

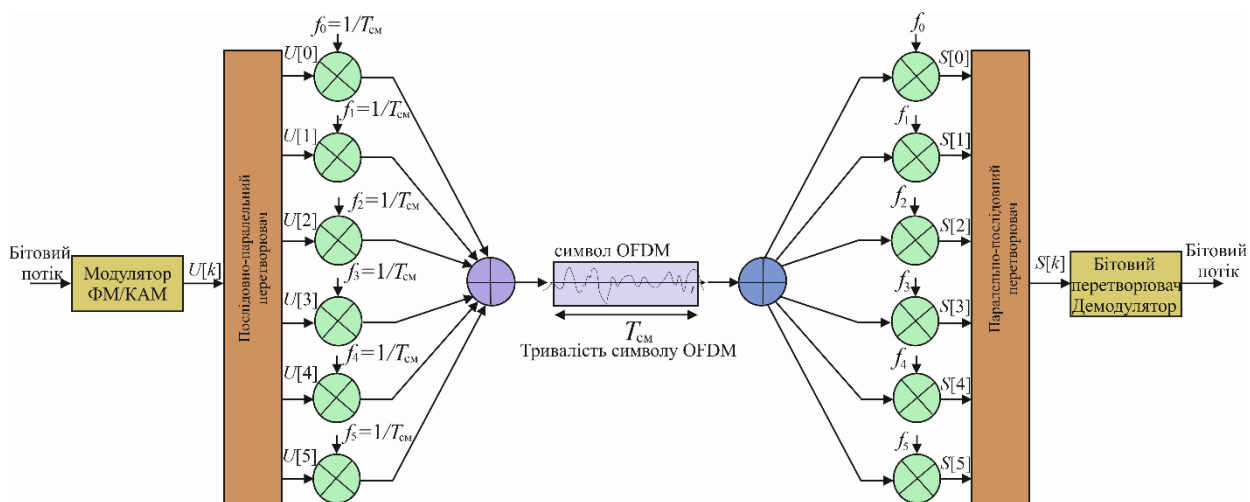


Рис. 2. Блок-схема формування та обробки сигналів у системі OFDM

Розгорнуту (повну) блок-схему каналу з OFDM з завадостійким кодуванням представлено на рис. 3.

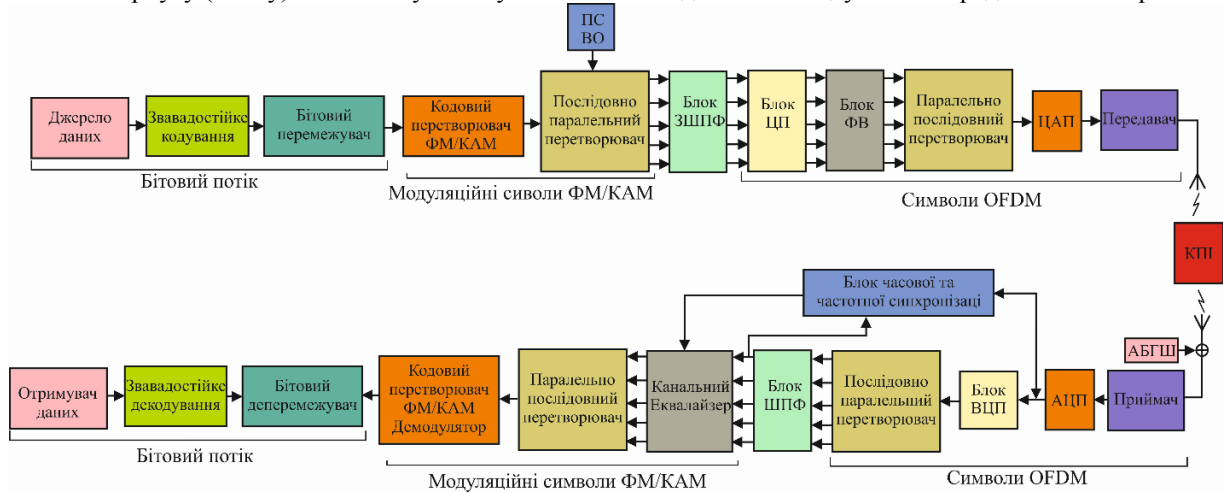


Рис. 3. Розгорнута блок-схема інформаційного каналу з OFDM: ПС ВО – пілотний символ, віртуальний оператор; ЗШПФ – зворотне швидке перетворення Фур'є; ЦП – циклічний префікс; ФВ – формувач віконної функції; ЦАП – цифро-аналоговий перетворювач; ВЦП – відновлення циклічного префіксу; ШПФ – швидке перетворення Фур'є; АБГШ – адитивний білий гаусівський шум; КПП – канал передачі інформації

Розглянемо  $l$ -й OFDM-сигнал  $u_l[t] = \sum_{k=0}^{N-1} U_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{\text{см}})}$ , у телекомунікаційному каналі з імпульсною характеристикою  $h_l(t)$ :

$$s_l(t) = u_l(t) \cdot h_l(t) + \xi_l(t) = \int_0^\infty h_l(\tau) u_l(t - \tau) d\tau + \xi_l(t), \quad (6)$$

де  $\xi_l(t)$  – доданок який характеризує наявність адитивного білого гаусівського шуму (АБГШ).

У випадку  $nT_c = nT_{\text{см}}/N$  представимо рівняння (6) в дискретному вигляді:

$$s_l[n] = u_l[n] \cdot h_l[n] + \xi_l[n] = \sum_{m=0}^{\infty} h_l[m] u_l[n - m] + \xi_l[n], \quad (7)$$

де  $u_l[n] = u_l(nT_c)$ ;  $s_l[n] = s_l(nT_c)$ ;  $h_l[n] = h_l(nT_c)$ ;  $\xi_l[n] = \xi_l(nT_c)$ .

Особливість багатопроменевого каналу з сигналами OFDM полягає у протидії впливу міжсимвольної інтерференції за рахунок оптимізації тривалості імпульсної послідовності.

Основні переваги OFDM пов'язані з значною стійкістю до завмирань в наслідок багатопроменевого розповсюдження, можливість більш ефективного використання смуги частот (завдяки властивості адаптивної зміни потужності і об'єму бітового потоку даних) тощо, дозволяють розглядати таку технологію в розрізі її важливого застосування з метою провадження бездротових і дротових інформаційних технологій наступних поколінь.

Важлива задача ефективного провадження OFDM полягає у визначенні зміни ймовірності виникнення бітових помилок в таких системах за рахунок спотворень пов'язаних з впливом на збереження ортогональності окремих піднесучих. Основними чинниками таких спотворень можна розглядати як ефекти швидкого завмирання, джиттер, частотні зсуви, нелінійні спотворення тощо. Основна дія усіх перелічених факторів спрямовується у кінцевому рахунку на виникнення перехресних завад між піднесучими сигналами OFDM. Наслідком утворення завад в пакеті OFDM - піднесучих є неможливість забезпечення оптимального приймання сигналів внаслідок відходу від забезпечення умов ортогональності піднесучих. На перший план при виникненні описаних явищ, виходить питання надійної ідентифікації даних, оцінка каналу та питання синхронізації.

#### Методика підвищення завадостійкості символів OFDM

Розглянемо принципи формування захисного інтервалу у структурі OFDM-сигналу. Існує два підходи щодо реалізації захисного інтервалу. В першому випадку використовують доповнення з нульовим заповненням (НЗ) до структури OFDM сигналу. В другому випадку застосовується циклічне розширення сигналу за допомогою циклічного префіксу (ЦП див. на рис. 4). На рис. 5 представлено ілюстрація впливу ефекту міжсимвольної інтерференції для кожної піднесучої OFDM сигналу.

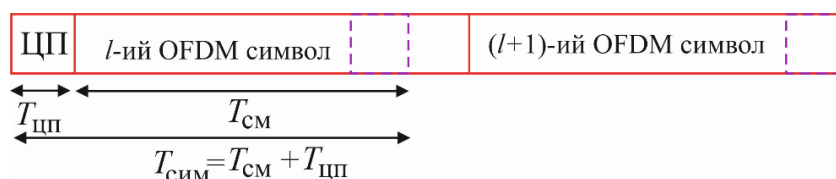


Рис. 4. Структура OFDM сигнал із захисним інтервалом

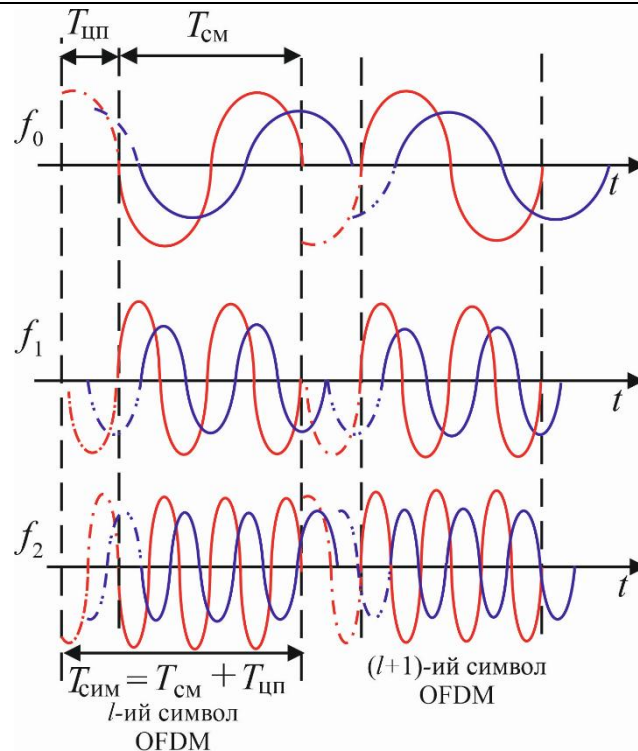


Рис. 5. Ілюстрація впливу ефекту міжсимвольної інтерференції для кожної піднесучої OFDM сигналу

Задача ЦП полягає у розширенні OFDM сигналу шляхом копіювання останніх відліків сигналу до початкової частини конструкції. Якщо позначити тривалість ЦП у відліках як  $T_{\text{цп}}$  тоді розширену тривалість конструкції символів OFDM можна представити як:  $T_{\text{сим}} = T_{\text{см}} + T_{\text{цп}}$  (рис. 4) та рис. 5.

На рис. 5 представлено вплив явища міжсимвольної інтерференції на окремі піднесучі символи OFDM за рахунок багатопроменевого розповсюдження сигналів. З рис. 5 встановлюємо, що у випадку, якщо тривалість ЦП встановити більше або рівною максимальній затримці у багатопроменевому каналі, вплив міжсимвольної інтерференції конкретного символу OFDM на наступний символ обмежується захисним інтервалом (на рис. 5 цей ефект схематично показано пунктирними лініями). Звідки можна констатувати, що вплив одного символу на інший не впливає на процедуру ШПФ наступного символу OFDM, який має часовий проміжок  $T_{\text{см}}$ . Отже, у випадку коли захисний інтервал обраний таким чином, щоб він перевищував максимальну затримку багатопроменевому каналу, існує можливість підтримувати ортогональність між піднесучими. В цьому випадку неперервність кожної затриманої піднесучої гарантується наявністю у складі символу ЦП, а їх ортогональності між собою зберігається на часовому проміжку  $T_{\text{см}}$ .

Крім того, може виникати зміщення символів за рахунок зриву символної синхронізації задача якої спрямована на протидію співпадіння заголовка OFDM символу з початковою точкою вікна утвореного проведенням процедури ШПФ. Тобто коли початкова точка вікна ШПФ знаходиться раніше ніж кінець попереднього символу із затримкою виникає міжсимвольна інтерференція, а у випадку коли вона розміщена пізніше за початок ходу символу можливе виникнення як міжсимвольної, так і міжчастотної інтерференції (зокрема між піднесучими) рис. 6.

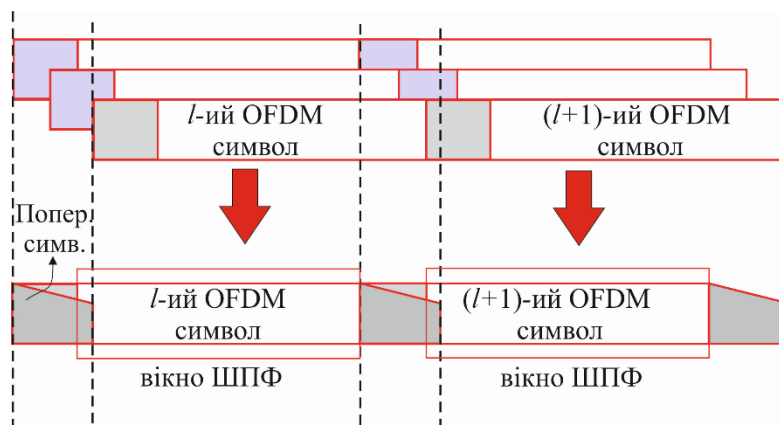


Рис. 6. Ілюстрація виникнення явища міжсимвольної інтерференції між символами OFDM з довжиною циклічного префіксу коротшою за максимальну затримку в багатопроменевому в каналі

Організація OFDM-сигналу може бути здійснена утворенням захисного інтервалу із нульовим заповненням. Така конструкція актуальна для широкосмугових і надширокосмугових систем на основі OFDM. На рис. 6 представлено символи OFDM-сигналу з НЗ і впливом міжсимвольної інтерференції на піднесучі. Наявність незначної затримки у багатопроменовому каналі утворює картину коли символи OFDM ефективної довжини (розглянемо випадок коли тривалість НЗ більша ніж максимальна затримка багатопроменового каналу) мають розриви в межах вікна ШПФ. Таким чином частина захисного інтервалу наступного OFDM  $k$ -символу копіюється і додається до заголовка наступного символу з метою запобігання утворення міжчастотної інтерференції (між частотами піднесучих). Так як НЗ утворено нульовою послідовністю, фактична довжина символу OFDM з НЗ буде коротша ніж довжина символу OFDM який містить ЦП і циклічний суфікс (ЦС). В цьому випадку можна акцентувати увагу на тому, що довжина прямокутного вікна для передачі буде коротша. Отже, на відміну від конструкції OFDM-символу яку розглянуто на рис.6 символ OFDM який сформовано з НЗ буде мати спектральну щільність потужності (СЩП) з меншою позасмуговою пульсацією і більшою позасмуговою потужністю, що дозволить передавати більшу потужність.

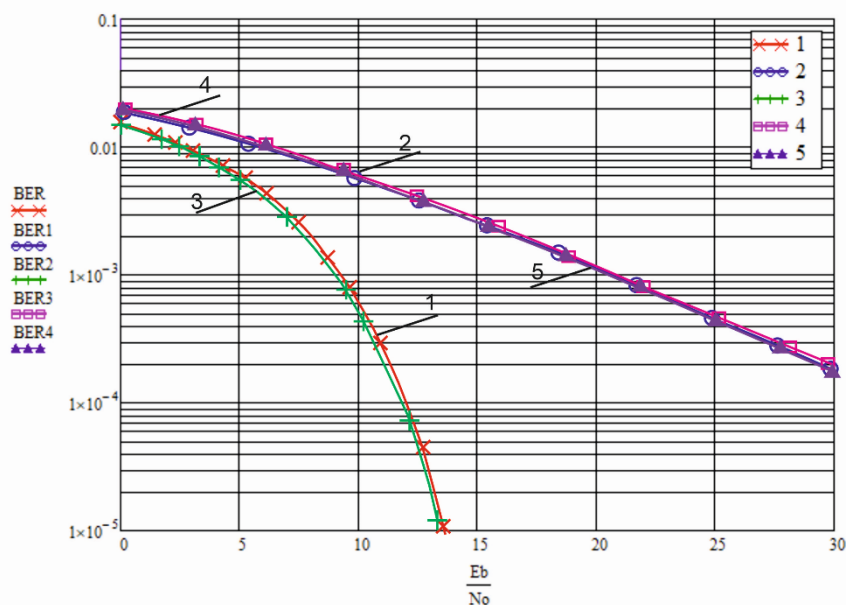


Рис. 7. Графік завадостійкості каналу з OFDM та довжиною захисного інтервалу у 16 символів: 1 – АБГШ – аналітична крива; 2 – Релесвський канал – аналітична крива; 3 – АБГШ – випадок без захисного інтервалу; для каналу з ЦП який дорівнює 16 символів; для каналу з НЗ яке вибиралось довжиною 16 символів

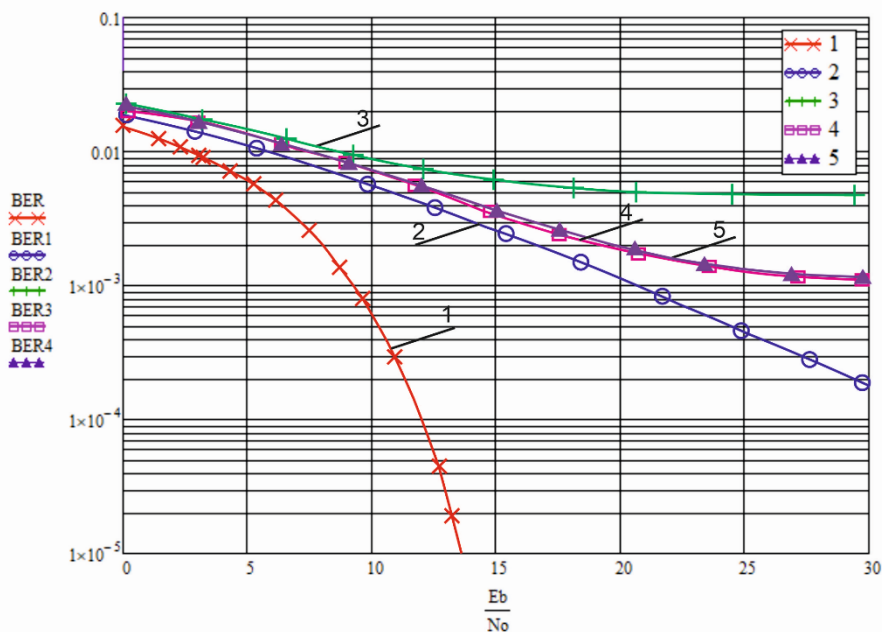


Рис. 8. Графік завадостійкості каналу з OFDM та довжиною 3 символи: 1 – АБГШ – аналітична крива; 2 – Релесвський канал - аналітична крива; 3 – АБГШ – випадок без захисного інтервалу; для каналу з ЦП який дорівнює 3 символи; для каналу з НЗ яке вибиралось довжиною 3 символи



На рис. 7 представлено результати моделювання завадостійкості телекомунікаційного каналу з OFDM за наявності міжсимвольної інтерференції. Досліджували вплив на завадостійкість довжини захисного інтервалу який може складатись як з ЦП, ЦС та і мати ділянку з НЗ. В процесі дослідження використовували 64-х точкове ШПФ, а також резервували 16 віртуальних піднесучих. Використовували сигнали типу KAM-16. Дослідження проводили для двох каналів: АБГШ та каналу з Релєєвським завмиранням (максимальна затримка до п'ятнадцяти символів). Зокрема на рис. 7 довжина захисного інтервалу вибиралась у 16 символів.

Наступний рис. 8 дозволяє оцінити як впливає довжина захисного інтервалу на тренд кривої завадостійкості.

Аналіз рис. 7 та 8 дозволяє встановити, що вплив міжсимвольної інтерференції на ймовірність бітової помилки в Релєєвському каналі з багатопроменим завмиранням становиться наочним (криві 4 та 5 на рис. 8) за результатами зменшення довжини захисного інтервалу. В кінцевому результаті такий процес приводить до мінімального рівня помилок як показано на рис. 8, кривими 3, 4, 5.

#### Методика підвищення завадостійкості систем OFDM з ефективним кодуванням

Не дивлячись на істотні переваги OFDM, в каналах зв'язку при прийманні таких сигналів можливий випадок коли глибокі завмирання які супроводжують передачу таких сигналів здійснюють селективний вплив на одні піднесучі шляхом їх пригнічення, а на інші, навпаки, шляхом їх підсилення. Така картина в кінцевому рахунку приводить до збільшення середнього відношення сигнал/шум і в каналі з OFDM виникають ефекти вибіркового завмирання.

Одним з методів протидії таким ефектам в каналах з OFDM є метод результати дослідження якого приведено нижче в статті і який ґрунтується на застосуванні методів кодування з прямим виправленням помилок (FEC) [8–14].

На рис. 9 представлена схема для дослідження системи передачі з OFDM і каналним кодуванням на основі каскадного коду (зовнішній кодер на основі коду Ріда-Соломона (РС), внутрішній кодер – на основі турбо-коду [10, 13, 14] (ТК)). Як слідє з схеми (рис. 9), вхідні фрейми ТК групуються, кожен блок пакетів формує кадр OFDM який, як було описано вище в статті, починається з символу синхронізації за яким слідє опорний символ. Перший символ використовувався з метою визначення часового відліку початку кадру і оцінки зсуву частоти, а другий використовувався для оцінки частотної характеристики каналу.

В ТК використовували різні генераторні поліноми (7, 5), (37, 21) та (117, 121) і швидкості кодування: 1/3, 1/2, 2/3, 3/4. Один пакет ТК утворювався 1632-бітами з перемеженими блоками. Модуляцію піднесучих OFDM здійснювали за допомогою цифрових багатопозиційних сигналів ФМ-4 та KAM-16 (64) [9] та програмованою зміною довжини захисного інтервалу.

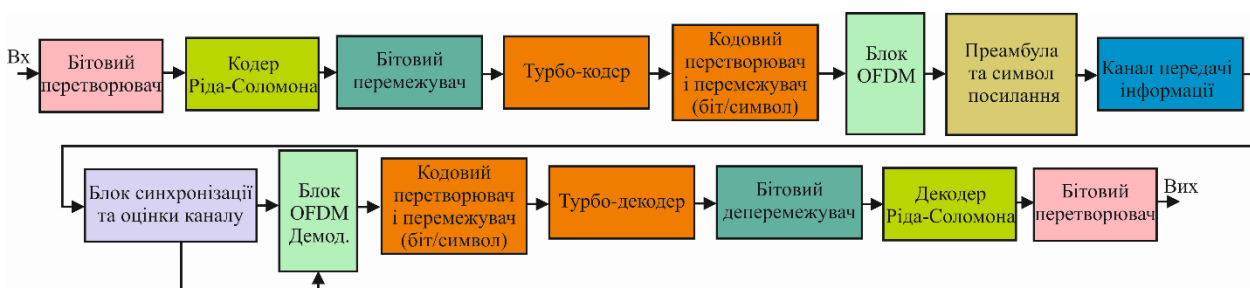


Рис. 9. Блок-схема формування та обробки сигналів у системі OFDM з процедурою каскадного кодування

На рис. 10 представлено синтезовану схему (Simulink-програмну модель) телекомунікаційного каналу з OFDM та каскадним кодуванням кодами з прямим виправленням помилок (конструкція РС+ТК) згідно рис. 9.

Продуктивність системи оцінювалась проведенням низки експериментів чисельного моделювання у різних конфігураціях схем кодування/декодування у каналі з АБГШ. Для проведення досліджень використано конструкції розміром по сто кадрів (фреймів) які містили по двадцять пакетів кожна. Програмно модель мала установки щодо відомої структури інформації, що передавалась в каналі, крім того у випадку дослідження ефективності кодування механізм синхронізації був організований як ідеальний.

Процес дослідження включав кроки щодо визначення впливу структури ТК на продуктивність каналу також оцінювався вплив кількості ітерацій декодування, швидкості кодування та форми сигнально-кодової конструкції. В експерименті досліджувались характеристики ТК як складового кодера в каналі з OFDM. Ідея застосування каскадної конструкції, полягала у досягненні продуктивності каналу на рівні ймовірності бітової помилки  $BER=10E-9$ . В роботах [13, 14] доказано, що такий підхід дозволить усунути ефект насичення притаманний ТК і таким чином дозволить підвищити продуктивність каналу з OFDM в цілому.

В схемі на рис. 9 запропоновано використати зовнішній перемежувач з метою забезпечення вірного розподілу помилок утворених згрупованими ділянками пошкоджених даних які можуть надходити до каналу від складового згорткового кодера ТК [6].

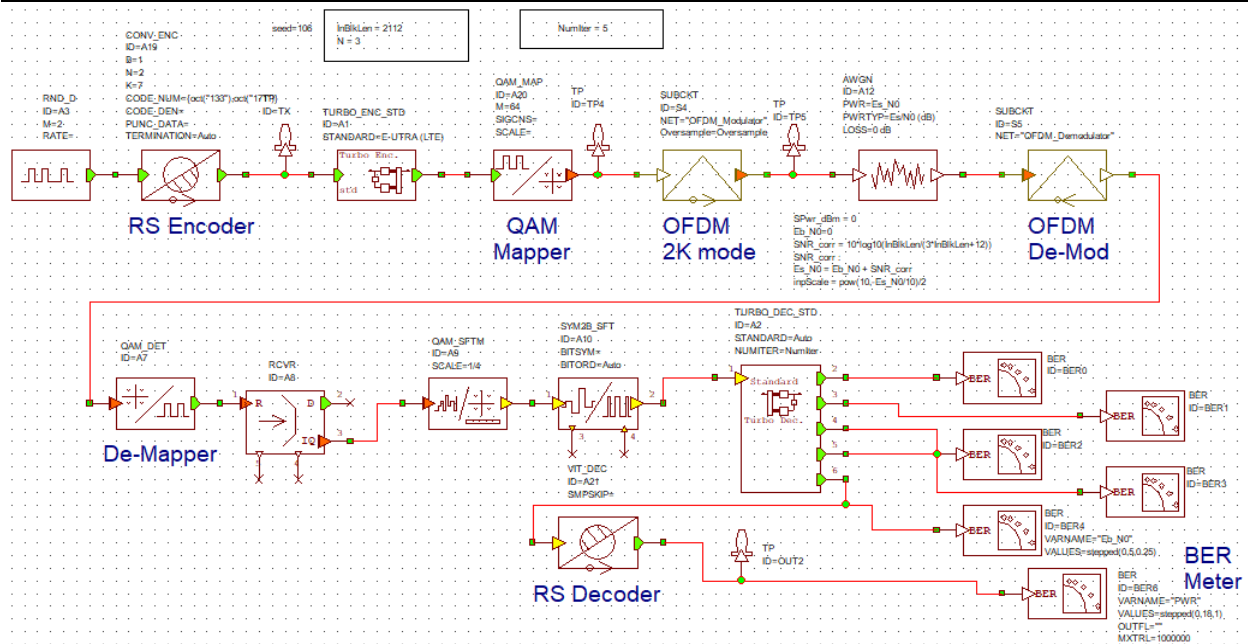


Рис. 10. Simulink-модель формування та обробки сигналів у системі OFDM з процедурою каскадного кодування

Спектр сигналу OFDM на передавальному (TX) та приймальному боці (RX) каналу представлено на рис. 11.

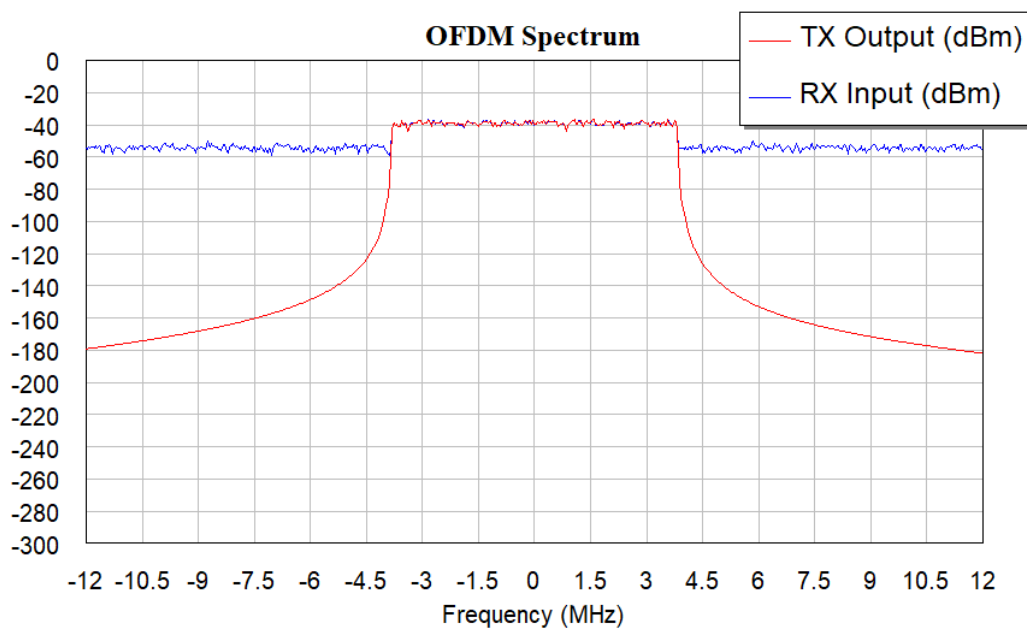


Рис. 11. Спектр сигналу OFDM на передавальному (TX) та приймальному боці (RX) каналу

На рис. 12 представлено отримані графіки завадостійкості телекомунікаційного каналу з сигналами OFDM та каскадним кодуванням (PC+TK) для конфігурації кодів (37, 21) та (117, 121), 5 – ітерацій і швидкість кодування 1/3 за різних схем модуляції. Використовувались багатопозиційні сигнали ФМ-4 та КАМ-16.

Результат моделювання свідчить на втрати продуктивності у випадку підвищення рівнів модуляції, причому для випадку однакової структури коду (37, 21) при використанні ФМ-4 та КАМ-16 падіння продуктивності складало близько 3,9 дБ тоді як перехід до структури коду (117, 121) для аналогічного виду сигналів призвів до втрати продуктивності до 3,1 дБ.



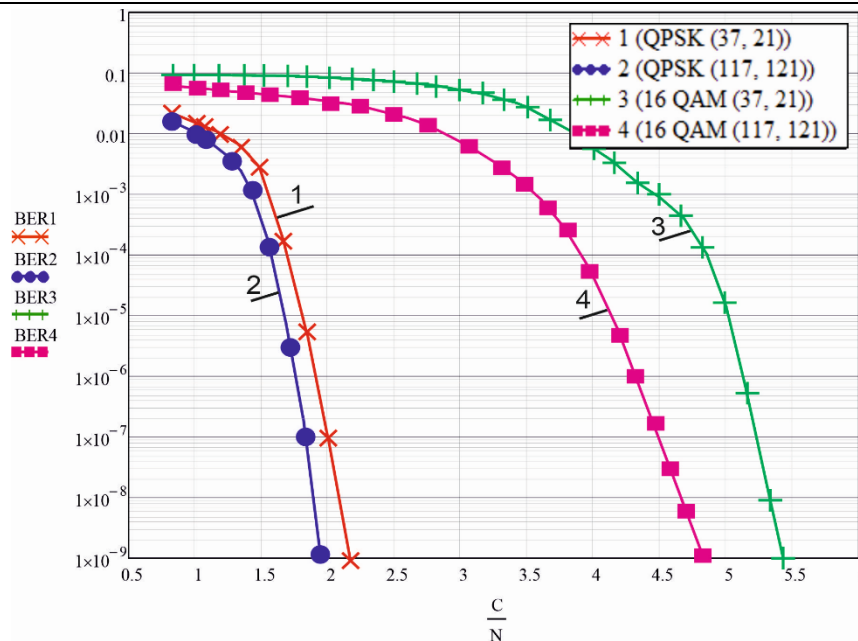


Рис. 12. Графіки завадостійкості сигналів OFDM з каскадним кодуванням (PC\_TK): 1 – ФМ-4 (37, 21); 2 – ФМ-4 (117, 121); 3 – КАМ -16 (37, 21); КАМ – 16 (117, 127)

### Висновки

В роботі представлено результати дослідження методів підвищення завадостійкості каналів з OFDM в сучасних телекомунікаціях. Досліджені питання щодо форми OFDM-символів дозволили встановити, що тривалість захисного інтервалу може змінюватись містити як ЦП і ЦС так і НЗ. Таким чином, визначено продуктивність системи OFDM щодо впливу довжини захисного інтервалу на ймовірність бітової помилки в телекомунікаційному каналі. В дослідження використано конструкції 64-точкового ШПФ для сигналу OFDM, із 16 віртуальними піднесучими у багатопробієвих каналах із замираннями типу АГБШ і Релея (максимальна затримка у символах дорівнювала 15 вибірок). Встановлено, що вплив міжсимвольної інтерференції на ймовірність бітової помилки в Релеєвському каналі з багатопробієвим замиранням становиться наочним за результатами зменшення довжини захисного інтервалу.

Результати дослідження приведені у статті дозволяють стверджувати, що продуктивність схеми каскадного кодування у OFDM-каналі залежить від кількості ітерацій декодування, а також структури сигнально-кодової конструкції. Збільшення довжини кодової послідовності підвищує продуктивність схеми, однак безпосередньо впливає на складність декодування. Збільшення кількості ітерацій підвищує продуктивність декодування однак впливає на швидкодію і відповідно обчислювальну складність декодування.

### Література

1. Бойко Ю. Transmission of control information in 5G broadband telecommunication systems / Ю. Бойко, І. П'ятін, Л. Карпова, І. Пархомей // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2021. – Т. 1. – № 38. – С. 82–95.
2. Shengli Z. OFDM Basics. OFDM for Underwater Acoustic Communications / Z. Shengli, W. Zhaohui. – USA : Wiley Telecom, 2014. – P. 23–38.
3. Prasad R. OFDM for Wireless Communications Systems / R. Prasad. – London : Artech House, Inc., 2004. – P. 292.
4. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение / Б. Скляр. – Москва : Вильямс, 2016. – 1104 с.
5. Бойко Ю. М. Теоретичні аспекти підвищення завадостійкості й ефективності обробки сигналів в радіотехнічних пристроях та засобах телекомунікаційних систем за наявності завад : монографія / Ю. М. Бойко, В. А. Дружинін, С. В. Толупа. – Київ : Логос, 2018. – 227 с.
6. Бойко Ю. М. Дослідження ефективності алгоритмів канального кодування в захищених телекомунікаційних системах передавання інформації / Ю. М. Бойко, Д. А. Макаришкін, О. І. Пасічник // Зв'язок: загальногалуз. наук.-вироб. журн. – Київ, 2016. – № 5. – С. 56–67.
7. Narasimhamurthy A. OFDM Systems for Wireless Communications / A. Narasimhamurthy, M. Banavar, C. Tepedelenlioglu. – USA : Morgan & Claypool, 2010. – P. 78.
8. Пятін І. С. Моделювання цифрової системи зв'язку з завадостійким кодуванням / І. С. Пятін, В. В. Сергеев // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2017. – № 6. – С. 89–91.
9. Пятін І. С. Дослідження сигналів з багатопозиційною модуляцією / І. С. Пятін, В. В. Мішан, І. В. Вершкова // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 2019. – № 1. – С. 88–96.

10. Пятін І.С. Дослідження каскадних кодів та турбокодів / І. С. Пятін, В. В. Мішан, Д. В. Вершков // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2018. – № 6, т. 1. – С. 85–91.
11. Zhurakovskiy B. Increasing the efficiency of information transmission in communication channels / B. Zhurakovskiy, J. Boiko, V. Druzhynin, I. Zeniv, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2020. – Т. 19. – № 3. – С. 1306–1315.
12. Zhurakovskiy B. Coding for information systems security and viability / B. Zhurakovskiy, S. Toliupa, S. Otrokh, V. Kuzminykh, H. Dudarieva, V. Zhurakovskiy // Інформаційні технології і безпека. – 2020. – Р. 71–84.
13. Бойко Ю. М. Формування та дослідження телекомунікаційної системи з каскадним кодуванням із використанням турбокодів / Ю. М. Бойко // Телекомунікаційні та інформаційні технології : наук. журн. / Держ. ун-т телекомунікацій. – Київ, 2016. – № 4. – С. 29–41.
14. Бойко Ю. М. Можливості турбокодів щодо підвищення енергетичного виграшу в каналах передавання інформації / Ю. М. Бойко // Зв'язок. – Київ, 2016. – № 2. – С. 16–25.

#### References

1. Boiko J. Transmission of control information in 5G broadband telecommunication systems / J. Boiko, I. Piatin, L. Karpova, I. Parkhomei // Adaptivni systemy avtomatichnoho upravlinnia. – 2021. – Т. 1. – № 38. – С. 82–95.
2. Shengli Z. OFDM Basics. OFDM for Underwater Acoustic Communications / Z. Shengli, W. Zhaohui. – USA : Wiley Telecom, 2014. – P. 23–38.
3. Prasad R. OFDM for Wireless Communications Systems / R. Prasad. – London : Artech House, Inc., 2004. – P. 292.
4. Sklyar B. Cifrovaya svyaz. Teoreticheskie osnovy i prakticheskoe primeneniye / B. Sklyar. – Moskva : Vilyams, 2016. – 1104 s.
5. Boiko J. M. Teoretychni aspekty pidvyshchennia zavodostiikosti y efektyvnosti obrobky syhnaliv v radiotekhnichnykh prystroiah ta zasobakh telekomunikatsiinykh system za naiavnosti zavod : monohrafiia / J. M. Boiko, V. A. Druzhynin, S. V. Toliupa. – Kyiv : Lohos, 2018. – 227 s.
6. Boiko J. M. Doslidzhennia efektyvnosti alhorytmiv kanalnoho koduvannia v zakhyshchennykh telekomunikatsiinykh systemakh peredavannia informatsii / J. M. Boiko, D. A. Makaryshkin, O. I. Pasichnyk // Zviazok: zahalnohaluz. nauk.-vyrob. zhurn. – Kyiv, 2016. – № 5. – С. 56–67.
7. Narasimhamurthy A. OFDM Systems for Wireless Communications / A. Narasimhamurthy, M. Banavar, C. Tepedelenliouglu. – USA : Morgan & Claypool, 2010. – P. 78.
8. Piatin I. S. Modeliuvannia tsyfrovoy systemy zviazku z zavodostiikym koduvanniam / I. S. Piatin, V. V. Serheiev // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2017. – № 6. – С. 89–91.
9. Piatin I. S. Doslidzhennia syhnaliv z bahatopolytsiinoiu moduliatsiieiu / I. S. Piatin, V. V. Mishan, I. V. Vershkova // Vymiriuvalna ta obchysliuvalna tekhnika v tekhnolohichnykh protsesakh. – 2019. – № 1. – С. 88–96.
10. Piatin I.S. Doslidzhennia kaskadnykh kodiv ta turbokodiv / I. S. Piatin, V. V. Mishan, D. V. Vershkov // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2018. – № 6, т. 1. – С. 85–91.
11. Zhurakovskiy B. Increasing the efficiency of information transmission in communication channels / B. Zhurakovskiy, J. Boiko, V. Druzhynin, I. Zeniv, O. Eromenko // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. – 2020. – Т. 19. – № 3. – С. 1306–1315.
12. Zhurakovskiy B. Coding for information systems security and viability / B. Zhurakovskiy, S. Toliupa, S. Otrokh, V. Kuzminykh, H. Dudarieva, V. Zhurakovskiy // Інформаційні технології і безпека. – 2020. – Р. 71–84.
13. Boiko J. M. Formuvannia ta doslidzhennia telekomunikatsiinoi systemy z kaskadnym koduvanniam iz vykorystanniam turbokodiv / J. M. Boiko // Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii : nauk. zhurn. / Derzh. un-t telekomunikatsii. – Kyiv, 2016. – № 4. – С. 29–41.
14. Boiko J. M. Mozhyvosti turbokodiv shchodo pidvyshchennia enerhetychnoho vyhrashu v kanalah peredavannia informatsii / J. M. Boiko // Zviazok. – Kyiv, 2016. – № 2. – С. 16–25.

Рецензія/Peer review : 22.09.2021 р.

Надрукована/Printed : 10.10.2021 р.