

УДК 621.391

**СИСТЕМА ПЕРЕДАВАННЯ ДИСКРЕТНИХ ПАРЦІАЛЬНО КОДОВАНИХ СИГНАЛІВ З ВИПРАВЛЕННЯМ ПОМИЛОК**

*Брескін В.О., Розенвассер Д.М.*

*Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова,  
65029, Україна, м. Одеса, вул. Ковальська, 1.*

*onas\_tes\_roden@mail.ru*

**СИСТЕМА ПЕРЕДАЧИ ДИСКРЕТНЫХ ПАРЦИАЛЬНО КОДИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ С ИСПРАВЛЕНИЕМ ОШИБОК**

*Брескин В.А., Розенвассер Д.М.*

*Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова,  
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.*

*onas\_tes\_roden@mail.ru*

**TRANSMISSION SYSTEM OF DISCRETE PARTIAL CODED SIGNALS WITH ERROR CORRECTION**

*Breskin V.A., Rozenvasser D.M.*

*Odessa national academy of telecommunications n.a. O.S. Popov,  
1 Kovalska St., Odessa 65029, Ukraine.*

*onas\_tes\_roden@mail.ru*

**Анотація.** У статті розглянуті дві системи передавання дискретних парціально кодованих сигналів, які відрізняються методами модуляції. Пропоновані системи дозволяють збільшити захищеність сигналу від завад та збільшити відносну швидкість передавання.

**Ключові слова:** спектральна ефективність, КВЗЗ, виправлення помилок, АМ-2, КАМ-16

**Аннотация.** В статье рассмотрены две системы передачи дискретных парциально кодированных сигналов, которые отличаются методами модуляции. Предлагаемые системы позволяют увеличить защищенность сигнала от помех и увеличить относительную скорость передачи.

**Ключевые слова:** спектральная эффективность, КРОС, исправление ошибок, АМ-2, КАМ-16

**Abstract.** In this paper we consider two systems of discrete partial transfer of coded signals with different methods of modulation. The proposed systems can increase the signal to noise ratio and increase the relative transmission rate.

**Key words:** spectral efficiency, DFE, error correction, BASK, 16QAM

**Проблема** збільшення спектральної ефективності систем передавання (СП) була актуальною для СП на основі металічних кабелів і залишається актуальною для сучасних ефективних волоконно-оптичних систем передачі зі спектральним розділенням ВОСП – СРК (WDM). Ця проблема вирішується шляхом заміни простого, але неефективного методу модуляції за інтенсивністю, еквівалентного АМ-2, більш ефективними методами, що поєднують багатопозиційне кодування вихідного інформаційного сигналу з ефективними методами цифрової модуляції [1].

Будь-який метод збільшення спектральної ефективності пов'язаний з погіршенням захищеності і тому супроводжується використанням методів виправлення помилок. Найчастіше для цієї мети використовуються методи коректувального кодування (КК).

**Проте** всі методи КК, вводячи додаткові символи для контролю за появою помилки і її виправлення, збільшують швидкість каналних символів передавання порівняно з інформаційною швидкістю і зменшують спектральну ефективність.

**Мета цієї статті** – пояснити суть пропонованого альтернативного методу збільшення захищеності з покращенням спектральної ефективності [2, 3].

**Система передавання парціально кодованих сигналів з амплітудною модуляцією та виправленням помилок**

У цьому методі пропонується використання у системі передавання коректора з вирішувальним зворотним зв'язком (КВЗЗ), який використовується для виявлення та виправлення помилок у поєднанні з реєстратором помилок (РП) і пристроєм виправлення помилок (ПВП).

Система передавання дискретних парціально кодованих сигналів з амплітудною модуляцією АМ-2 [2] (рис. 1) складається з передавача, формуючого пристрою ФП, каналу зв'язку, ФНЧ, дискретизатора Д, пристрою віднімання ПВ, вирішувального пристрою ВП, кола зворотного зв'язку ЗЗ, реєстратора помилок РП та пристрою виправлення помилок ПВП. ФНЧ виконує дві функції: фільтрацію шумів та корекцію форми відгуку, наближуючи її до імпульсу Найквіста.

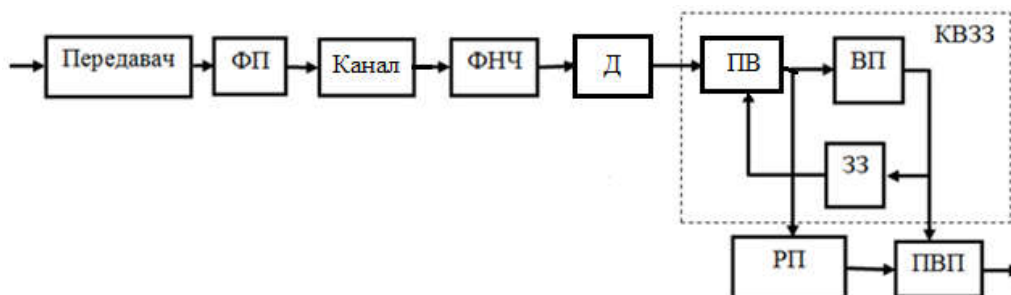


Рисунок 1 – Структурна схема СП дискретних парціально кодованих сигналів з амплітудною модуляцією та виправленням помилок

Розглянемо парціальний сигнал [4, 5, 6] з імпульсним відгуком  $g[k]$  з двома відліками:  $g[k] = 1, 2$ .

Обвідні парціальних імпульсів можуть мати різну форму. Найбільш розповсюдженою формою імпульсів у волоконно-оптичних системах передавання є гаусів імпульс.

Гаусів імпульс можна записати наступним чином:

$$s(t) = Ae^{-\frac{t^2}{2a^2}}.$$

Тоді його спектр дорівнює:

$$S(f) = Aa\sqrt{2\pi}e^{-2(\pi af)^2} = Be^{-2\left(\frac{\pi f}{b}\right)^2},$$

де  $B = A\sqrt{2\pi}a$  та  $b = 1/a$ .

Гаусів імпульс та парціальний сигнал з імпульсним відгуком  $g[k]$  подані на рис. 2.

Використовуючи властивості спектрів, що спектр суми дорівнює сумі спектрів та що при затримці сигналу на  $\tau$  фаза його складових отримує зсув на  $-2\pi f\tau$  та вважаючи, що  $b = 1$ , знайдемо нормований амплітудний спектр парціального сигналу з імпульсним відгуком  $g[k]$

$$S_{1,2}(f) = \left| e^{-2\pi^2\left(\frac{f}{f_T}\right)^2} + 2e^{-2\pi^2\left(\frac{f}{f_T}\right)^2} e^{-i2\pi\frac{f}{f_T}} \right| = e^{-2\pi^2\left(\frac{f}{f_T}\right)^2} \sqrt{5 + 4\cos 2\pi\frac{f}{f_T}}$$

де  $f_T$  – тактова частота,  $f_T = 1/T$ .

Нормовані спектри гаусового імпульсу та парціального сигналу подані на рис. 3.

Формування необхідного відгуку здійснюється формуючими пристроями, що включаються у систему передавання. Розглянемо використання ФП на передавальній стороні (рис. 1).

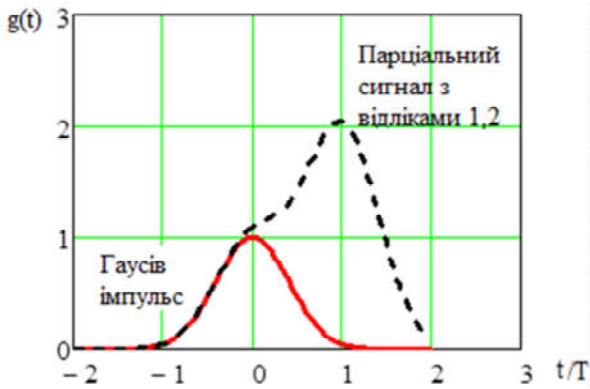


Рисунок 2 – Гаусів імпульс та парціальний сигнал з імпульсним відгуком  $g[k]$  (де  $T$  – тактовий інтервал)

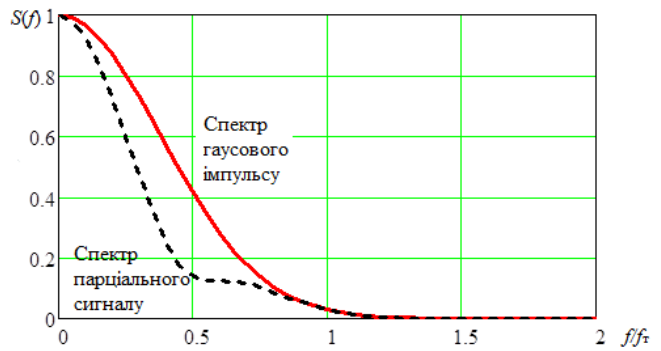


Рисунок 3 – Нормовані амплітудні спектри гаусового імпульсу та парціального сигналу з імпульсним відгуком  $g[k]$

При правильній роботі приймача пари біт на виході передавача і ПВП збігаються. При цьому, сигнал на виході пристрою віднімання практично (з точністю до шумової похибки) збігається з цифровим сигналом на виході вирішувального пристрою КВЗЗ.

Наприклад, для цифрового сигналу 10011100, ФП сформує парціальний сигнал з відліками 12013320, наведений на рис. 4.

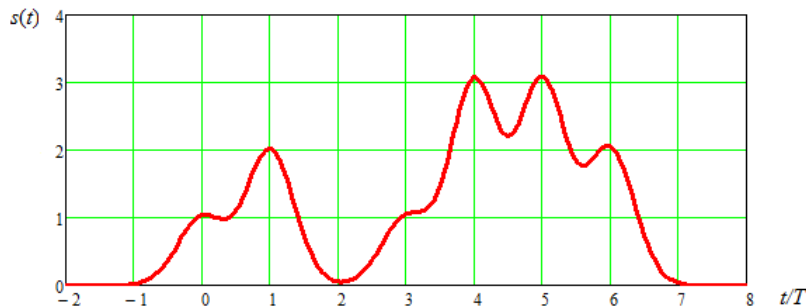


Рисунок 4 – Приклад парціального сигналу з імпульсним відгуком  $g[k]$  для послідовності 10011100

Якщо виникає помилка ВП за рахунок шумів на його вході, то на виході кола зворотнього зв'язку, і, як наслідок, на виході пристрою віднімання, з'являється специфічний багаторівневий двополярний сигнал, а значить на виході РП з'являється сигнал, який показує, що виявлена помилка.

Сигнал з виходу РП використовується для виявлення та виправлення помилок. Для цього розглянемо відгуки РП на поодинокі помилки біта для різних сполучень біт. Ці відгуки наведені нижче в табл. 1.

Таблиця 1 – Виправлення поодиноких помилок у пропонуванні СП з АМ-2

Точка схеми	Поодинока помилка <b>першого</b> символу з кожної пари			
Вихід передавача	1 0	1 1	0 0	0 1
Вихід ВП з поодинокією помилкою	0 0	0 1	1 0	1 1
Вихід пристрою віднімання	0 2	0 3	1 -2	1 -1
Вихід РП	Сигнал «Виявлена помилка»			

Видно, що появі поодинокі помилки однозначно відповідає одна з можливих комбінацій появи помилки і тому такий сигнал може використовуватися не тільки для виявлення, а й для виправлення помилки шляхом інвертування помилкового біта (рис. 1). РП подає сигнал на ПВП про те, що сталася помилка. ПВП інвертує перший біт з пари біт, яка надійшла на його вхід. Таким чином, помилка виправляється.

Недоліком цієї системи є те, що вона не може бути використана для двовимірних методів модуляції, зокрема для квадратурної амплітудної модуляції КАМ-4.

Технічним розв'язуванням такої задачі є розділення сигналу з виходу передавача на два підканали, об'єднання їх перед трактом, розділення на виході тракту та знову об'єднання за допомогою перемикача на вході приймача.

**Система передавання парціально кодованих сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією та виправленням помилок**

Система передавання дискретних парціально кодованих сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією [3] (рис. 5) відрізняється від попередньої тим, що з передавача двійковий цифровий сигнал надходить на вхід перемикача, який розділяє біти на два підканали, сигнали з двох підканалів об'єднуються на вході каналу, після якого знов роз'єднуються, помилки виправляються в кожному підканалі незалежно. Проблема невизначеності фази може вирішуватися різними способами, наприклад, за допомогою відносного кодування.

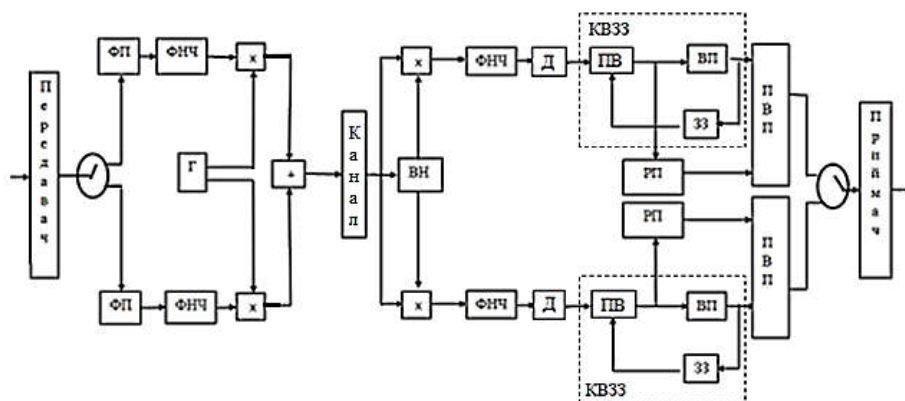


Рисунок 5 – Структурна схема СП дискретних парціально кодованих сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією

Відгуки РП наведені нижче в табл. 2.

Таблиця 2 – Виправлення поодиноких помилок у пропонуваній СП з КАМ-4

Точка схеми	Поодинока помилка <b>першого</b> символу			
Вхід формуючого пристрою	(-1) (+1)	(+1) (+1)	(-1) (-1)	(+1) (-1)
Вихід ФП	(-1) (-1)	(+1) (+3)	(-1) (-3)	(+1) (+1)
Вихід пристрою віднімання на першому такті	(>0,5) ....	(<0,5)...	(>0,5) ...	(<0,5) ...
Вихід РП з поодинокю помилкою на першому такті	(+1) ....	(-1) ....	(+1) .....	(-1) ....
Вихід пристрою віднімання на двох тактах	(>0,5) (-3)	(<0,5) (+5)	(>0,5) (-5)	(<0,5)(+3)
Вихід аналізуючого пристрою РП	(+1) (-3)	(-1) (+5)	(1) (-5)	(-1) (3)
Вихід РП	Сигнал «Виявлена помилка»			

Видно, що появі поодинокі помилки однозначно відповідає одна з можливих комбінацій появи помилки і тому такий сигнал може використовуватися не тільки для виявлення, а й для виправлення помилки шляхом інвертування помилкового біта (рис. 5). РП подає сигнал на ПВП про те, що сталася помилка. ПВП інвертує перший біт з пари біт, яка надійшла на його вхід. Таким чином, помилка виправляється.

**Ефективність використання системи передавання парціально кодованих сигналів з виправленням помилок**

Ефективність використання даних систем розраховується виходячи з імовірності виправлення поодиноких помилок.

Пропонована СП з АМ-2 задає чотири можливі рівні сигналу у часі 0, 1, 2, 3 (тобто такі самі як і при однополярній амплітудній модуляції АМо-4), що погіршує захищеність

(рис. 6) [6] порівняно з класичним АМ-2 – найбільш характерним для волоконно-оптичних систем передавання видом модуляції.

Зміна захищеності за рахунок зміни сигнального сузір'я  $\Delta A_{CC}$

$$\Delta A_{CC} = 20 \lg \left[ \frac{d_{\min, AM-4}}{d_{AM-2}} \right] = 20 \lg \left[ \frac{0,76 \sqrt{E_b}}{1,41 \sqrt{E_b}} \right] = -5,4 \text{ дБ},$$

де  $E_b$  – енергія на один біт,  $d_{AM-2}$  – відстань між канальними символами для модуляції АМ-2,  $d_{\min, AM-4}$  – мінімальна відстань між канальними символами для модуляції АМ-4.

Пропонована СП з КАМ задає чотири можливі рівні –3, –1, 1, 3 (тобто такі ж як і при двополярній амплітудній модуляції АМд-4 та при КАМ-16), що погіршує захищеність у порівнянні з АМ-2.

$$\Delta A_{CC} = 20 \lg \left[ \frac{d_{\min, КАМ-16}}{d_{AM-2}} \right] = 20 \lg \left[ \frac{1,26 \sqrt{E_b}}{1,41 \sqrt{E_b}} \right] = -1 \text{ дБ},$$

де  $d_{\min, КАМ-16}$  – мінімальна відстань між канальними символами для модуляції КАМ-16.

Зміна захищеності за рахунок парціального кодування  $\Delta A_{ПК}$

$$\Delta A_{ПК} = 20 \lg \left[ \frac{\sqrt{E_b}}{\sqrt{(\sqrt{E_b})^2 + (2\sqrt{E_b})^2}} \right] = -7 \text{ дБ}.$$

Якщо ж порівнювати не за середньою енергією, а за піковим значенням сигналу, то зміна захищеності при переході з дворівневого сигналу АМ-2 на чотирирівневий однополярний складе 9,5 дБ:

$$\Delta A_{CCпик} = 20 \lg \left[ \frac{A_{пик}}{3 A_{пик}} \right] = -9,5 \text{ дБ},$$

де  $A_{пик}$  – пікове значення сигналу, а при переході на чотирирівневий двополярний 3,5 дБ:

$$\Delta A_{CCпик} = 20 \lg \left[ \frac{A_{пик}}{1,54 A_{пик}} \right] = -3,5 \text{ дБ}.$$

З іншого боку, пропоновані системи дозволяють отримати вигравш за рахунок виправлення поодиноких помилок. При використанні запропонованих методів поодинокі помилки виправляються, та ймовірність помилки на виході схеми розраховується як ймовірність подвійної помилки, що забезпечує збільшення захищеності на 3,5 дБ при допустимості збільшення рівня сигналу (рис. 6) [7].

$$\Delta A_{ВП} = h^2(p_2) - h^2(p_1)$$

$$\Delta A_{ВП} = h^2(10^{-12}) - h^2(10^{-6}) = 17,1 \text{ дБ} - 13,6 \text{ дБ} = 3,5 \text{ дБ},$$

де  $h^2(p)$  – залежність відношення сигнал/шум від ймовірності помилки;  $h^2 = \frac{E_b}{N_0}$ ,  $N_0$  – спектральна густина потужності шуму;  $p_1$  та  $p_2$  – ймовірності помилки до виправлення поодиноких помилок та після виправлення відповідно.

Разом із запропованою СП можна каскадно використовувати перемежувач та завадостійкий код. Наприклад, код з подвійною перевіркою на парність (ППП) [8], який дозволяє виправити однократні помилки.

Якщо інформаційні біти записувати у матрицю розміром 100x100, та додавати у кожний стовпчик та кожний рядок по одному біту перевірки на парність, то швидкість такого коду складе 0,98, а надлишковість усього 2 %. Таке незначне зменшення спектральної ефективності дає перевагу такій конструкції порівняно з іншими методами корекції помилок.

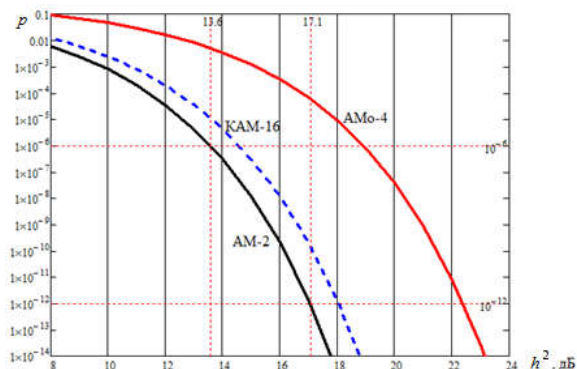


Рисунок 6 – Завадостійкість AM-2, AMo-4 та KAM-16

Застосування такого коду у каскадному з'єднанні з запропонованою СП вже дає можливість виправляти будь-які двократні помилки. У волоконно-оптичних системах передавання типовими є ймовірності помилки  $10^{-10}$ – $10^{-12}$ . За таких значень виправлення двократних помилок є достатнім. Це забезпечує додатковий вигравш по захищеності у 3,5 дБ.

Загальна зміна захищеності

$$\Delta A = \Delta A_{CC} + \Delta A_{БК} + \Delta A_{ВП}$$

Порівняння трьох методів передачі сигналів, кожен з яких забезпечує збільшення відносної швидкості в 2 рази по відношенню до системи передачі з AM-2, представлено в таблиці 3.

Таблиця 3 – Поліпшення захищеності СП з AM

Поліпшення захищеності по відношенню до СП з AM-2 за рахунок:	СП з AM-4	Пропонована СП	Пропонована СП з ППП
зміни сигнального сузір'я $\Delta A_{CC}$	-5,4 дБ	–	–
парціального кодування $\Delta A_{БК}$	–	-7 дБ	-7 дБ
виправлення помилок $\Delta A_{ВП}$	–	3,5 дБ	7 дБ
Разом $\Delta A$	-5,4 дБ	-3,5 дБ	0 дБ

З табл. 3 видно, що захищеність у пропонованих системах краща ніж у СП з AM-4.

Порівняння трьох методів передачі сигналів КАМ, кожен з яких забезпечує збільшення відносної швидкості в 2 рази по відношенню до КАМ-4 та в 4 рази по відношенню до системи передавання з AM-2, подано в табл. 4 (розрахунок за середніми значеннями сигналу) та 5 (розрахунок за піковими значеннями сигналу).

Таблиця 4 – Поліпшення захищеності СП з КАМ (розрахунок за середніми значеннями сигналу)

Поліпшення захищеності по відношенню до СП з AM-2 за рахунок:	СП з KAM-16	Пропонована СП	Пропонована СП з ППП
зміни сигнального сузір'я $\Delta A_{CC}$	-1 дБ	–	–
парціального кодування $\Delta A_{БК}$	–	-7 дБ	-7 дБ
виправлення помилок $\Delta A_{ВП}$	–	3,5 дБ	7 дБ
Разом $\Delta A$	-1 дБ	-3,5 дБ	0 дБ

Таблиця 5 – Поліпшення захищеності СП з КАМ (розрахунок за піковими значеннями сигналу)

Поліпшення захищеності по відношенню до СП з АМ-2 за рахунок:	СП з КАМ-16	Пропонована СП	Пропонована СП з ППП
зміни сигнального сузір'я $\Delta A_{\text{сигн}}$	-3,5 дБ	-3,5 дБ	-3,5 дБ
виправлення помилок $\Delta A_{\text{вп}}$	–	3,5 дБ	7 дБ
Разом $\Delta A$	-3,5 дБ	0 дБ	3,5 дБ

З табл. 4 та 5 видно, що пропоновані системи не забезпечують виграшу по захищеності при розрахунку за середніми значеннями сигналу та забезпечують більший виграш по захищеності порівняно з СП з КАМ-16 при розрахунку за піковими значеннями сигналу.

Таким чином, з проведеного аналізу видно, що пропонована система передавання парціально кодованих сигналів з використанням для виявлення та виправлення помилок ко-ректора з вирішальним зворотним зв'язком дозволяє збільшити спектральну ефективність системи передавання в 2 рази при використанні АМ і в 4 рази при використанні КАМ з ви-грашем по захищеності 3,5 дБ порівняно з класичними АМ і КАМ. Пропоноване додаткове використання каскадного з'єднання з перемешувачем та завадостійким кодом, що здійснює подвійну перевірку на парність, збільшує виграш по захищеності до 7 дБ.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Брескін В.А. Увеличение пропускной способности оптического канала волоконно-оптической системы передачи / В.А. Брескин, А.Д. Мазур, Д.М. Розенвассер // Электроника и связь. – Киев, 2012. – №6 – С. 131-136 .
2. Брескін В.О. Система прийому дискретних парціально кодованих сигналів з амплітудною модуляцією / В.О. Брескін, Д.М. Розенвассер – Патент на корисну модель № 89073 від 10.04.2014.
3. Брескін В.О. Система прийому дискретних парціально кодованих сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією / В.О. Брескін, Д.М. Розенвассер – Патент на корисну модель № 90004 від 12.05.2014.
4. Сукачев Э. А. Введение в теорию сигналов с управляемой межсимвольной интерференцией : Монография / Э. А. Сукачев, П.А. Шкулипа – Одесса: ВМВ, 2011. – 200 с.
5. Ильин Д.Ю. Повышение спектральной эффективности систем с парциальным кодированием [Текст] : Дис. канд. техн. наук: 05.12.02 / Ильин Дмитрий Юрьевич. – О., 2002. – 182 л.
6. Прокис Джон. Цифровая связь / Джон Прокис пер. с англ.; Под ред. Д.Д. Кловского. – М.: Радио и связь, 2000. – 800 с.
7. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение – [2-е изд.] / Скляр Б. – Вильямс, 2003.
8. Хэмминг Р.В. Теория кодирования и теория информации/ Хэмминг Р.В.: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1983. – 176 с.

#### REFERENCES:

1. Breskin V.A., Mazur A.D., Rozenvasser D.M. Increasing of bandwidth of the optical channel of fiber-optic transmission systems. Electronics & Communications. Kyiv, 2012. №6.
2. Breskin V.A., Rozenvasser D.M. System of partial discrete reception of coded signals with amplitude modulation - patent for utility model № 89073 from 10.04.2014.
3. Breskin V.A., Rozenvasser D.M. System of partial discrete reception of coded signals with quadrature amplitude modulation - patent for utility model № 90004 from 12.05.2014.
4. Sukachev E.A., Shkulipa P.A. «Introduction to the theory of signals with controlled inter-symbol interference», Monograph, Odessa: VMV, 2011: 200 p.
5. Ilyin D.Y. Increasing the spectral efficiency of a partial coding. Odessa National Academy of Telecommunications n.a. Popov O.S. – O., 2002. – 182 p.
6. Proakis J., Salehi M. Digital communications. McGraw-Hill Science/Engineering/Math; 3th edition; 2000, 936 p.
7. Sklar Bernard. Digital Communication. Fundamentals and Application. 2nd edition. – Prentice Hall, 2001. — 1079 p.
8. Hamming R.W. Coding and Information Theory, 2nd Ed. Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1986.