

УДК 621.376, 621.39

## МЕТОД ФОРМУВАННЯ ВИБІРОК СИГНАЛІВ З АМПЛІТУДНОЮ МОДУЛЯЦІЄЮ БАГАТЬОХ СКЛАДОВИХ ДЛЯ НАВЧАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

DOI 10.36994/2788-5518-2021-02-02-12

**Горбатий І.В.**, д.т.н., проф. Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. [giv@polynet.lviv.ua](mailto:giv@polynet.lviv.ua)

**Цимбалюк І.Р.** Національний університет «Львівська політехніка», Львів, Україна. [zymbaliuk@gmail.com](mailto:zymbaliuk@gmail.com)

**Анотація.** У статті запропоновано метод формування зразків сигналів з амплітудною модуляцією багатьох складових (АМБС) для навчання нейронних мереж. Такий метод базується на використанні методики попереднього розрахунку символічних точок сигналу з АМБС за специфічним заданим параметром, формуванні комірок Вороного навколо цих точок та заповненні цих комірок варіаціями символічних точок із урахуванням впливу завад. Отримані варіації символічних точок із урахуванням впливу завад надалі переносять на часову площину, а з використанням їх координат на цій площині формують масиви зразків сигналів АМБС для навчання нейронних мереж.

**Ключові слова:** амплітудна модуляція багатьох складових (АМБС), обробка сигналів, нейронна мережа, діаграма Вороного.

## METHOD FOR FORMING DATASETS OF SIGNALS WITH AMPLITUDE MODULATION OF MANY COMPONENTS FOR NEURAL NETWORKS LEARNING

**Ivan Horbatiy**, Dr.Habil., Prof. Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. [giv@polynet.lviv.ua](mailto:giv@polynet.lviv.ua)

**Ivan Tymbaliuk**. Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. [zymbaliuk@gmail.com](mailto:zymbaliuk@gmail.com)

**Abstract.** The article proposes a method for forming datasets of signals with amplitude modulation of many components for neural networks learning. The method is based on the use of the method of preliminary calculation of symbolic points of the AMMC signal and subsequent formation of special cells around the obtained points. The method of preliminary calculation uses a specific input parameter and based on it determines the number of points on the AMMC signal constellation and their location. Next, the boundaries of the Voronoi cell are formed around the origin in the signal constellation. The cell is randomly filled with an array of variations of the signal symbol under the influence of interference. The resulting array is further interpreted for other symbolic points, forming a Voronoi diagram for the entire

*AMMC signal constellation. The obtained arrays of points are transferred to the time plane, forming sets of modulated signals with amplitude or phase noise. The obtained modulated signals are sampled, at the sampling points interpretations of Voronoi cells in the time plane are formed. Points from these cells form samples of AMMC signals with interference for neural networks. This method is suitable for types of modulation in which non-rectangular grids will be formed when drawing conditional lines between adjacent points of the signal constellation.*

**Keywords:** *amplitude modulation of many components (AMMC), signal processing, neural network, Voronoi diagram.*

## Вступ

Хоча використання нейронних мереж для обробки радіосигналів пропонувалось ще понад три десятиліття тому [1], найбільшій популярності вони набули саме в останнє десятиліття завдяки більшій комп'ютеризації суспільства і особливо отриманню в загальний доступ досконалих програмних засобів машинного вивчення. Таким чином, машинному вивченню знайшлося практичне застосування в обробці радіосигналів – зокрема застосування нейронних мереж активно впроваджується в медичній діагностиці (наприклад, при обробці сигналів електроенцефалографа) та у радарних системах для збільшення їх точності. Також має деякий потенціал використання нейронних мереж для обробки інформаційних радіосигналів у режимі реального часу. По темі обробки інформаційних сигналів було раніше запропоновано інтерпретовані нейронні мережі для знешумлення графових сигналів [2], автоасоціативні нейронні мережі для знешумлення сигналів [3], нейронні мережі для усунення конкретних специфічних видів шумів [4]. Ця стаття ставить за мету запропонувати такий метод генерування зразків сигналів з АМБС, який дасть змогу найбільш точно імітувати вхідний сигнал радіопередавальної системи, з доданими завадами. Система спроектована таким чином, щоб надавати нейронним мережам найбільш точні репрезентації реальних радіосигналів з можливістю детального налаштування цієї системи.

Обраний вид модуляції для генерування – АМБС, новий вид амплітудно-фазової маніпуляції, який характеризується більшою завадостійкістю, ніж сигнали КАМ аналогічного порядку (порівняння зроблені за однакових потужностей цих сигналів) [5].

Сам сигнал АМБС  $U_{\text{АМБС}}(t)$  формують як суму його  $N$  компонентів, які відрізняються початковими фазами  $\varphi_0 + \varphi_n$  (рад):

$$U_{\text{АМБС}}(t) = U_n a_n U_{m_n}(t) \cos(\omega_0 + \varphi_0 + \varphi_n), \quad (1)$$

де  $a_n$  – коефіцієнт пропорційності  $n$ -ного підканалу модулятора,  $U_{m_n}(t)$  – модулючі сигнали на  $n$ -их входах модулятора.

Відстань між сусідніми точками сигнального сузір'я АМБС (з трьома складовими) визначається наступним чином:

$$d_{\text{сигн}} = U(M_U - 1), \quad (2)$$

де  $U$  – максимальна можлива амплітуда модульованого сигналу, а  $M_U$  – кількість рівномірно віддалених рівнів.

Результуюче сигнальне сузір'я АМБС з трьома складовими можна умовно поділити на рівносторонні трикутники з довжиною сторін  $d_{\text{сигн}}$  (Рис. 1).

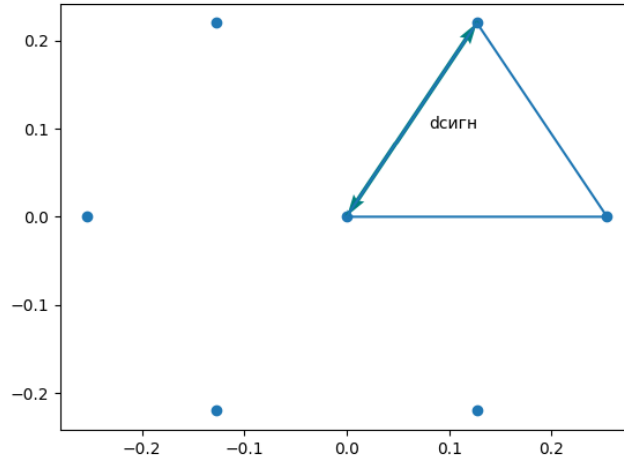


Рис. 1. Фрагмент сітки сигнального сузір'я сигналу АМБС

### Методика попереднього розрахунку символічних точок сигналу з АМБС за заданим параметром

Перш ніж формувати сигнали АМБС у часовій площині, потрібно розрахувати розташування кожної сигнальної точки, що відповідає бажаному сигналу.

Як стартовий параметр було обрано перпендикулярну осі абсцис медіану  $d_m$  умовного рівностороннього трикутника, якими формується сигнальне сузір'я АМБС. З заданою в якості стартового параметра медіаною  $d_m$  відстань між сусідніми точками сузір'я знаходиться наступним виразом:

$$d_{\text{сигн}} = 2 \frac{d_m}{\sqrt{3}}. \quad (3)$$

Все сигнальне сузір'я АМБС можна умовно поділити на горизонтальні рівні, кількість яких обчислюється наступним виразом:

$$N_y = \frac{1}{d_m} + 1. \quad (4)$$

Максимальна кількість точок на одному горизонтальному рівні визначається співвідношенням:

$$N_x = \frac{1}{\left(\frac{d_m}{\sqrt{3}}\right)}. \quad (5)$$

Горизонтальні рівні діляться на парні (до яких входить і нульовий) та непарні, які відрізняються наявністю зсуву точок, розташованих на цих рівнях, вбік на відстань  $d_{\text{сигн}}/2$ .

Розташування кожної точки на осі абсцис на парних горизонтальних рівнях обчислюємо наступним чином:

$$x_i = \begin{cases} \frac{i \cdot d_{\text{сигн}}}{2} \text{ для } i \in \{0; N\} \\ -\frac{i \cdot d_{\text{сигн}}}{2} \text{ для } i \in \{N; 2N + 1\} \end{cases}, \quad (6)$$

де  $i \in \{0; 2Nx+1\}$ .

Розташування кожної точки на осі абсцис на непарних горизонтальних рівнях обчислюємо наступним чином:

$$x_i = \begin{cases} \frac{d_M}{2} + \frac{i \cdot d_{\text{сигн}}}{2} \text{ для } i \in \{0; N\} \\ \frac{d_M - i \cdot d_{\text{сигн}}}{2} \text{ для } i \in \{N; 2N + 1\} \end{cases}, \quad (7)$$

де  $i \in \{0; 2Nx+1\}$ .

Розташування точок на осі ординат, у свою чергу, визначається таким співвідношенням:

$$y_j = \begin{cases} j \cdot d_M \text{ для } j \in \{0; Ny\} \\ -j \cdot d_M \text{ для } j \in \{Ny; 2Ny\} \end{cases}. \quad (8)$$

Отже, маючи  $NyNx$  точок, та розмістивши їх на сигнальному сузір'ї, отримуємо сукупність точок. Точки, що відповідають сигналам з амплітудами, які перевищують максимально можливу амплітуду модульованого сигналу, вважатимемо зайвими. Такі точки потрібно усунути з сузір'я, оскільки вони знаходяться за межами кола з радіусом, рівним нормованій максимально можливій амплітуді модульованого сигналу  $U$  (Рис. 2).

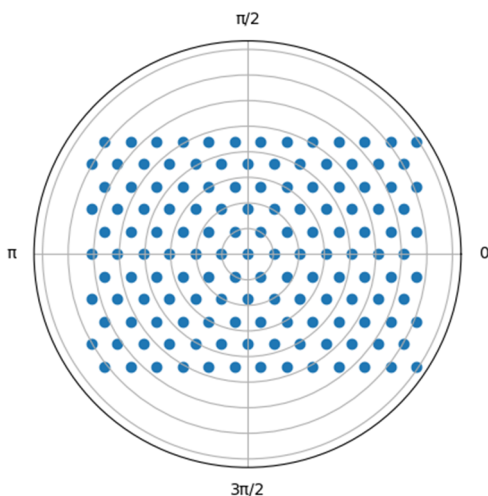


Рис. 2. Отримане «невідфільтроване» сигнальне сузір'я АМБС

Точки з координатами  $[x_i, y_j]$ , залишаємо в складі сузір'я, якщо для них виконується нерівність

$$\sqrt{X_i + Y_j} < U. \quad (9)$$

В результаті отримуємо набір точок  $P_{ij}$  з координатами  $[x_i, y_j]$ , які і утворюють сузір'я (Рис. 3) сигналу, що вже є репрезентацією повноцінного АМБС-сигналу. Сигнал з сузір'ям, зображеним на рис. 3, розрахований з довжини медіани  $dM = 0.22U$  і містить 55 точок, тобто є сигналом 55-АМБС.

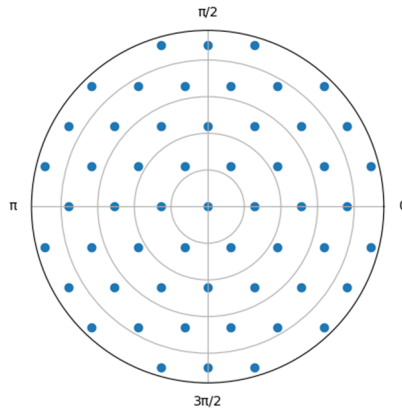


Рис. 3. Отримане сигнальне сузір'я 55-АМБС

### Метод формування вибірок сигналів з АМБС за наявності завад

Отримавши координати кожної точки бажаного виду модуляції, можливо сформувати набір можливих відхилень кожної точки від її звичного місця розташування. Для цього для множини точок сигнального сузір'я необхідно побудувати діаграму Вороного, яка дасть змогу найбільш ефективно розбити простір навколо окремих точок, керуючись відстанями між ближніми точками.

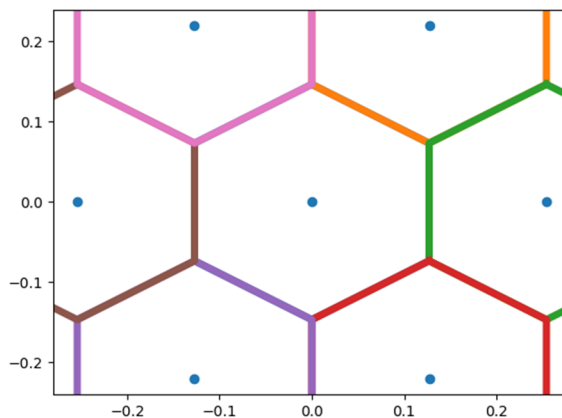


Рис. 4. Межі комірок Вороного у АМБС-сигналі

Діаграму Вороного формують розбиттям простору навколо окремих точок (вершин Вороного) на підплощини, які містять лише точки, які ближче до конкретної вершини, ніж до будь-яких інших, утворюючи комірки Вороного. Межі комірок представляють собою прямі лінії, які є рівновіддаленими до двох точок, які ці межі розділяють (Рис. 4).

Таблиця 1.  
Координати найближчих до нульової точок

| № | 1                      | 2                       | 3                      | 4                       | 5                        | 6                       |
|---|------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------|-------------------------|
| x | $\frac{d_M}{\sqrt{3}}$ | $\frac{2d_M}{\sqrt{3}}$ | $\frac{d_M}{\sqrt{3}}$ | $-\frac{d_M}{\sqrt{3}}$ | $-\frac{2d_M}{\sqrt{3}}$ | $-\frac{d_M}{\sqrt{3}}$ |
| y | $d_M$                  | 0                       | $-d_M$                 | $-d_M$                  | 0                        | $d_M$                   |

Вищезгадані прямокутні трикутники ще раз ділимо лініями, які перетинають середину гіпотенузи під прямим кутом, утворюючи менший прямокутний трикутник, що дає змогу знайти вже кути комірки Вороного.

Таблиця 2.  
Координати кутів комірки Вороного

| № | 1                | 2                      | 3                      | 4                 | 5                       | 6                       |
|---|------------------|------------------------|------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------------|
| x | 0                | $\frac{d_M}{\sqrt{3}}$ | $\frac{d_M}{\sqrt{3}}$ | 0                 | $-\frac{d_M}{\sqrt{3}}$ | $-\frac{d_M}{\sqrt{3}}$ |
| y | $\frac{2}{3d_M}$ | $\frac{1}{3d_M}$       | $-\frac{1}{3d_M}$      | $-\frac{2}{3d_M}$ | $-\frac{1}{3d_M}$       | $\frac{1}{3d_M}$        |

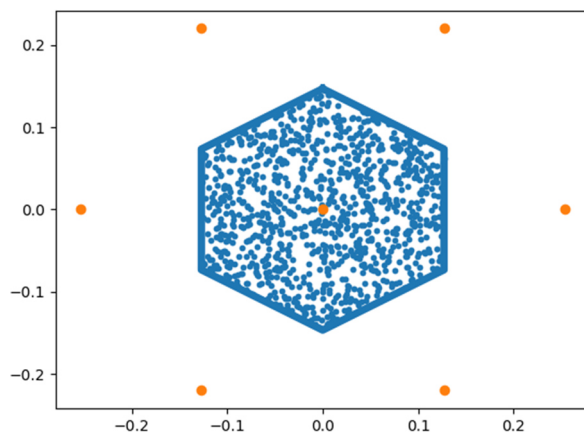


Рис. 5. Комірка Вороного з наповнюючими її точками

У випадку АМБС достатньо розрахувати комірку Вороного лише для однієї точки, оскільки всі комірки мають однакову форму, і отриману комірку можна «накладати» на інші точки. Для цього вибираємо точку з нульовими

координатами і шість найближчих точок до неї. Розрахунок координат цих точок базується на властивості прямокутних трикутників зі сторонами  $30^\circ$  і  $60^\circ$ , на які діляться медіаною рівносторонні трикутники сітки АМБС.

Отримані координати кутів комірки дають змогу означити межі, в яких необхідно формувати множину точок, що представлятимуть собою різні «зашумлені» варіації сигналу, що відповідає нульовому символу (точці в початку координат). Точки для цієї множини генеруємо випадковим чином. Для кращої однорідності комірку розбиваємо на шість трикутників і точки з кожного додаємо до загальної множини. Для навчання нейронної мережі, яка імітувала роботу приймача 8-АМБС було сформовано загалом 800 фрагментів сигналів (по 100 на кожен символ), отже потрібно по 134 точки в кожному умовний трикутник, аби отримати 804 фрагменти, з яких ми будемо вибирати точки випадковим чином задля збільшення ефективності роботи кінцевої системи (Рис. 5).

Взявши координати отриманої множини точок та додавши до них координати будь-якої сигнальної точки сузір'я АМБС, можна отримати аналогічну комірку для цієї конкретної точки.

Було взято сигнал 55-АМБС і вибрано 4 випадкові точки його сузір'я для їх «зашумлення» (Рис. 6).

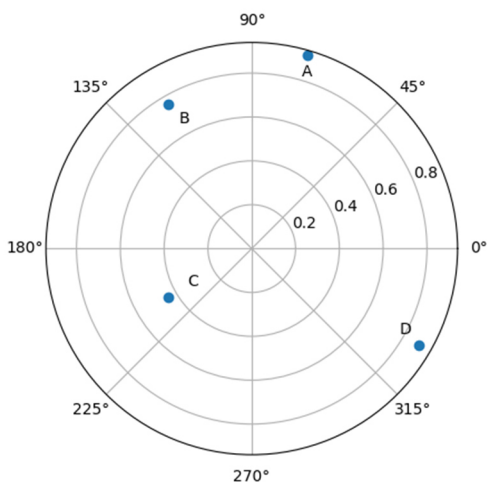


Рис. 6. Обрані випадковим чином точки сузір'я 55-АМБС

Часове представлення сигналу, який відповідає певній точці сузір'я, обчислюють за наступною формулою:

$$S(t) = \sqrt{x^2 + y^2} * \sin(t + \tan^{-1}(y/x)), \quad (10)$$

де  $x$  та  $y$  – координати точки сузір'я (або координати випадкової «зашумленої» точки з комірки).

Варто зауважити, що попередня формула (10) також виконує функцію переведення координат точок (які раніше були обраховані для прямокутної

системи в координат) в полярну систему координат. Тепер можна зобразити отримані сигнали в часовій площині і також їх дискретизувати. Згідно з теоремою Котельникова, нам потрібно не менше двох точок на період сигналу, щоб сигнал потім можна було відновити. Визначаємо 4 точки на період і «накладаємо» на кожен масив значень попередньо розраховані комірки Вороного (Рис. 7).

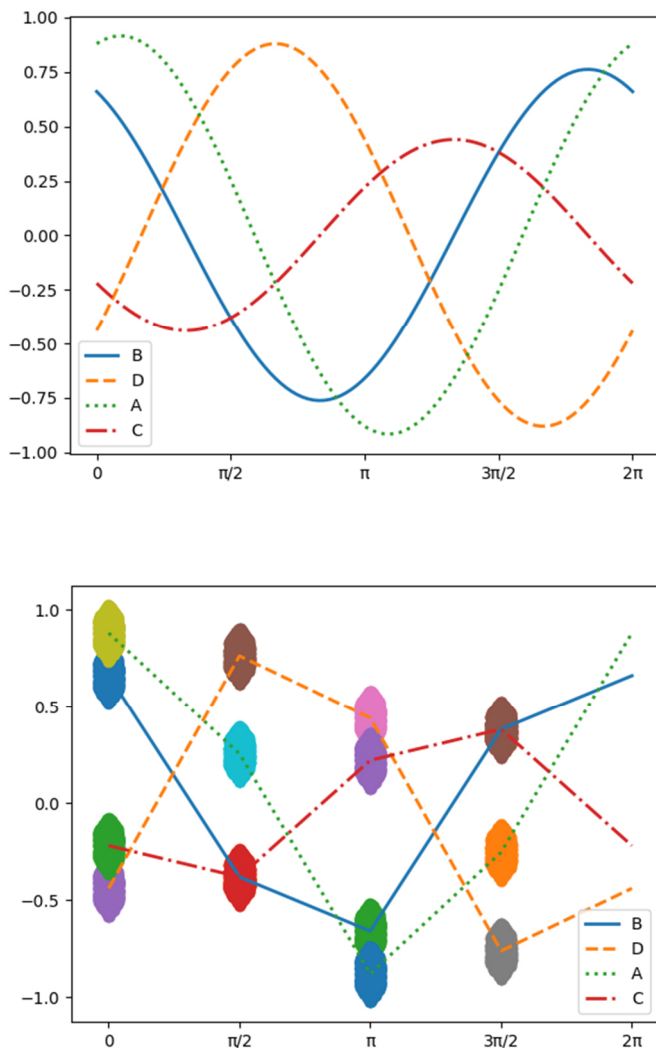


Рис. 7. Сигнали випадкових точок сузір'я до дискретизації (зверху) та їх дискретне представлення із «накладеними» на дві точки зонами Вороного.

Отримані координати точок у часовій площині зберігаємо у файл і надалі використовуємо для навчання нейронної мережі. Текстовий .csv файл сигналу В містить 100 рядків, а кожен рядок містить 8 чисел – координати  $x_0, y_0, x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3$ .

Запропонований метод формування зразків сигналів з АМБС для навчання нейронних мереж після його вдосконалення також може використовуватись для формування сигналів з квадратурною амплітудною модуляцією. Для цього в коді програми потрібно встановити рівність евклідової відстані  $d_{\text{сигн}}$  та медіани  $d_M$ , що в свою чергу зробить зсув між горизонтальними складовими таким, що дорівнює нулю, утворивши в результаті сузір'я із прямокутною сіткою сигнальних точок. Межі комірок, відповідно, потрібно буде окреслити у формі квадрата, сторони якого дорівнюють  $d_{\text{сигн}}$ , і, відповідно, максимальне відхилення вершини комірки по тій чи іншій координаті від номінального значення становитиме  $\pm d_{\text{сигн}}/2$ .

Співставлення прямокутної та шестикутної комірок сигнальної точки показує теоретичну перевагу шестикутної комірки внаслідок покриття всіх ближчих точок (Рис. 8).

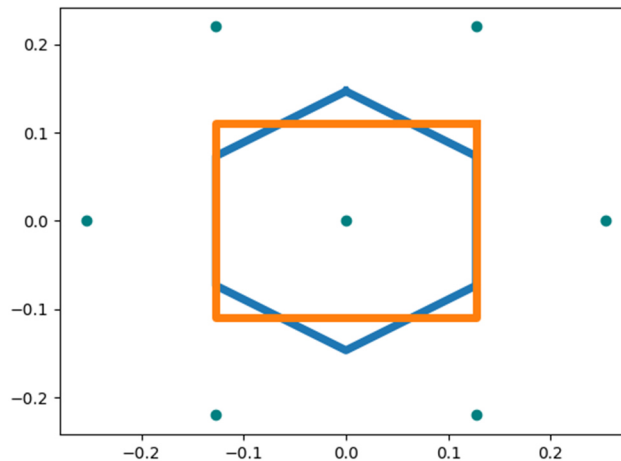


Рис. 8. Порівняння прямокутної та шестикутної комірок сигнальної точки

### Висновки

Використання діаграм Вороного для демодуляції сигналів АМБС вже на теоретичному рівні показує деякий потенціал в порівнянні з простим заданням максимального значення шуму за рахунок розбиття сигнальних сузір'їв на площини, кожна точка яких є найближчою саме до центру площини, в якій вона знаходиться. А використання нейронних мереж спрощує задачу використання діаграм Вороного у обробці сигналів АМБС, оскільки чисто апаратна обробка сигналів за таким принципом набагато складніше реалізовується, а саме з

використанням нейронних мереж реалізувати практичну реалізацію методу системи обробки сигналів АМБС, яка володітиме всіма раніше розрахованими її перевагами над іншими поширеними видами модуляції.

Запропонований метод формування зразків сигналів з АМБС може використовуватись для навчання нейронних мереж, призначених для роботи у складних умовах – тобто в сильно зашумлених середовищах, або в системах, де достовірність приймання є більш важливою за швидкість передавання.

### Література

1. Malkof, D. B. A Neural Network for Real-Time Signal Processing [Текст] / D. B. Malkoff // Advances in Neural Information Processing Systems (NIPS 1989), 1989. – Vol. 2. – pp. 248–255.
2. Graph Unrolling Networks: Interpretable Neural Networks for Graph Signal Denoising [Текст] / S. Chen, Y. C. Eldar, L. Zhao // IEEE Transactions on Signal Processing, 2021. -Vol. 69. – pp 3699–3713.
3. Vlahovic, N. Noise reduction by using autoassociative neural networks [Текст] / N. Vlahovic, G. Kvascev // 13th Symposium on Neural Networks and Applications (NEUREL) : pros. of int. conf. – Belgrade, 2016. – 5 p.
4. Owaki, Sh. Equalization of optical nonlinear waveform distortion using neural-network based digital signal processing [Текст] / Sh. Owaki, M. Nakamura // 21st OptoElectronics and Communications Conference (OECC) : pros. of int. conf. – Niigata, 2016. – pp. 1–3.
5. Gorbatyy, I. V. Investigation of the technical efficiency of state-of-the-art telecommunication systems and networks with limited bandwidth and signal power [Текст] / I. V. Gorbatyy. // Automatic Control and Computer Sciences, 2014. – Vol. 48. – pp. 47–55.