

УДК 621.317

**В. М. Кичак, д. т. н., проф.; О. О. Семенова, к. т. н.; О. О. Войцеховська;  
В. І. Макогон**

## **ФАЗО-ІМПУЛЬСНЕ КОДУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ В НЕЙРОННИХ МЕРЕЖАХ**

*Розроблено покращений метод фазо-імпульсного кодування інформації в нейронних мережах. Проведено оцінку похибок при виконанні операції синапсного множення. Запропонована електрична схема мультиплікатора вхідних сигналів нейронів і ваг синапсів. Виконано моделювання та дослідження схеми мультиплікатора вхідних сигналів і ваг синапсів на польових транзисторах у програмі MicroCap V.*

*Ключові слова:* фазо-імпульсний, нейронні мережі, кодування, синапс, похибка.

### **Вступ**

В останні роки інтенсивно вивчається можливість застосування апарату штучних нейронних мереж в задачах керування технічними об'єктами й технологічними процесами. Порівняно з адаптивними системами керування рівень невизначеності при використанні нейронних мереж може бути значно вищим, а головне, використання нейронних мереж не потребує аналітичного описання об'єкта керування.

Також нейронні мережі широко використовуються для розв'язання ряду задач у сучасних телекомунікаційних мережах і системах, зокрема:

- для ідентифікації супутникових каналів [1];
- при розробленні приймачів для CDMA – сигналів [2];
- для моделювання нелінійних НВЧ підсилювачів без пам'яті [3].

### **Постановка задачі**

Оскільки в біологічних нейронах сигнали є послідовностями імпульсів, у штучних нейронах також використовуються імпульсно-модульовані сигнали [4]. У нейронних мережах застосовуються чотири види кодування – амплітудно-імпульсне, частотно-імпульсне, широтно-імпульсне і фазо-імпульсне [5].

Згідно з [6] саме фазо-імпульсні елементи відрізняються від імпульсно-потенціальних та частотно-імпульсних простотою забезпечення багатофункціональності при мінімальній схемотехнічній надлишковості. Також основною перевагою фазо-імпульсних елементів над імпульсно-потенціальними та частотно-імпульсними є незалежність кількості їх компонентів від основи числення [6].

Саме тому мета цієї роботи полягає в дослідженні можливості та доцільності використання фазо-імпульсного кодування інформації в нейронних мережах.

Для цього поставлені такі задачі:

- розроблення методу фазо-імпульсного кодування інформації в нейронних мережах;
- оцінка похибок сигналів синапсів із фазо-імпульсним кодуванням;
- розробка, моделювання та дослідження схеми мультиплікатора вхідних сигналів і ваг синапсів на польових транзисторах.

### **Визначення методу фазо-імпульсного кодування**

Згідно з одним із способів здійснення синапсного множення, будь-який із параметрів імпульсу – амплітуда, частота, тривалість, зсув у часі – відповідає значенням вхідної інформації, а інший – вазі синапсу, два останні параметри є константами [4]. Аналіз

існуючих методів кодування сигналів нейронних мереж виконано в [7]. Недоліком існуючого методу фазо-імпульсного кодування є те, що нульовому значенню вхідного сигналу нейрону відповідає нульовий зсув фази імпульсної послідовності. Для усунення цього недоліку пропонуємо власний метод фазо-імпульсного кодування інформації в нейронних мережах.

Враховуючи все вищевикладене, виконуємо покращення існуючого методу фазо-імпульсного кодування інформації в нейронних мережах:

1. Приймаємо, що імпульси мають постійний період  $T$  і постійну тривалість  $\tau_0$  (рис. 1).

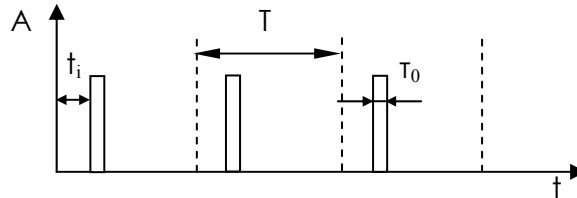


Рис. 1. Фазо-імпульсна послідовність

2. Нехай значення вхідного сигналу  $x_i$  є пропорційним зсуву імпульсів у часі  $t_i$ , тобто

$$t_i = t_\alpha \cdot x_i + t_\beta,$$

де  $t_\alpha, t_\beta$  – первинні зсуви імпульсів у часі.

3. Нехай значення ваги синапсу  $x_w$  є пропорційним амплітуді імпульсів  $A_s$ , тобто

$$A_w = A_\alpha \cdot x_w + A_\beta,$$

де  $A_\alpha, A_\beta$  – первинні значення амплітуди імпульсів.

4. Тоді, після виконання операції множення, амплітуда імпульсів  $A_s$  сигналу синапсу та їх зсув у часі визначається таким чином:

$$A_s = A_i + A_\gamma$$

$$t_s = t_i.$$

6. Вхідний сигнал нейрону визначаємо так:

$$A_n = \sum A_s$$

$$t_n = \sum t_s.$$

7. Вихідний сигнал нейрону визначаємо так

$$A = f(A_n)$$

$$t = f(t_n).$$

Отже, згідно із запропонованим методом кодування значення вхідної інформації нейрону задається зсувом імпульсів у часі – фазою імпульсної послідовності, а вага синапсу задається амплітудою постійної напруги і визначає амплітуду струму вихідної імпульсної послідовності, фаза якої збігається з фазою вхідної імпульсної послідовності, причому нульовому значенню вхідного сигналу нейрону відповідає первинний зсув фази, що й відрізняє цей метод від існуючих і дозволяє усунути можливість помилки через стрибок фази.

### Оцінка похибок сигналів синапсів з фазо-імпульсним кодуванням

Як відомо, завадостійкість синапсів залежить від похибок, які виникають при визначенні значень параметру вхідного сигналу й ваги синапсу. Розрахуємо похибку, яка виникає при виконанні операції синапсного множення. Похибка синапсу має дві складові [7]:

$$\delta = \delta_{\text{сиг}} + \delta_A,$$

де  $\delta_{\text{сиг}}$  – похибка визначення величини параметра вхідного сигналу,  $\delta_A$  – похибка визначення ваги синапсу.

Похибка визначення ваги синапсу обчислюється за формулою:

$$\delta_A = \frac{\Delta_A}{A_{\min}},$$

де  $\Delta_A$  – відхилення визначеної амплітуди напруги ваги синапсу від дійсного значення;  $A_{\min}$  – мінімальне значення амплітуди напруги ваги синапсу.

При застосуванні ФІМ-сигналів відхилення  $\Delta t = \frac{1}{2}(T - \tau_0)$ , тоді похибку синапсу з ФІМ-сигналами обчислюємо за таким виразом:

$$\delta_{\text{ФІМ}} = \frac{\Delta t}{t_{\min}} = \frac{T - \tau_0}{2t_{\min}}.$$

Графік залежності похибки синапсу від періоду сигналу для різних значень тривалості імпульсу й мінімального зсуву в часі наведений на рис. 2.

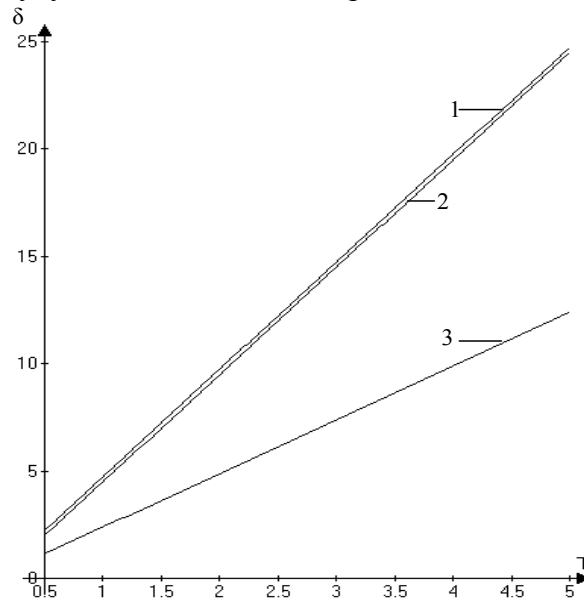


Рис. 2. Графік залежності похибки

У першому випадку  $t_{\min 1} = 0,1 \text{ мкс}$ ,  $\tau_{01} = 0,05 \text{ мкс}$ ; у другому випадку  $t_{\min 2} = 0,1 \text{ мкс}$ ,  $\tau_{02} = 0,1 \text{ мкс}$ ; у третьому випадку  $t_{\min 3} = 0,2 \text{ мкс}$ ,  $\tau_{03} = 0,05 \text{ мкс}$ .

Отже, можна стверджувати, що на похибку мало впливає величина тривалості імпульсу. Для зменшення похибки необхідно зменшувати період  $T$  і збільшувати мінімальну тривалість фази імпульсів  $t_{\min}$ .

### Фазо-імпульсний мультиплікатор

У праці [7] представлено мультиплікатор для широтно-імпульсних сигналів, виконаний на двох МДН-транзисторах, причому вихідний сигнал знімається з витоку першого транзистора. Для виконання операції синапсного множення фазо-імпульсних сигналів було розроблено мультиплікатор на двох польових транзисторах, причому вихідний сигнал знімається з витоку другого транзистора.

Розроблена електрична схема мультиплікатора вхідного сигналу нейрону і ваги синапсу, виконаного на двох польових транзисторах, представлена на рис. 3.

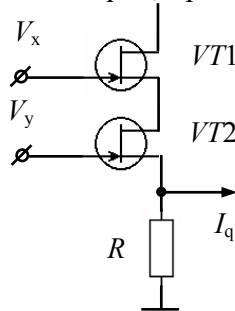
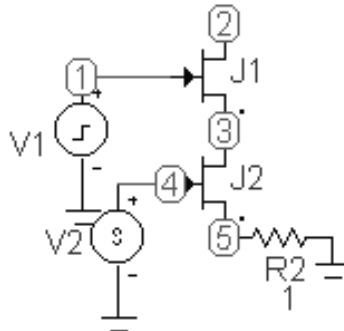


Рис. 3. Схема мультиплікатора на ПТ

На заслін першого транзистора  $VT1$  подається послідовність імпульсів, фаза яких визначає значення вхідної дії нейрону. На заслін другого транзистора  $VT2$  подається постійна напруга, величина якої визначає значення ваги синапсу. Струм витоку другого транзистора являє собою послідовність імпульсів, фаза яких збігається з фазою вхідної імпульсної послідовності, а амплітуда залежить від ваги синапсу.



Для перевірки працездатності мультиплікатора промодельюємо його роботу за допомогою програмного пакету MicroCap V. Схема матиме такий вигляд:

Вхідні імпульси, напруга синапсу і вихідні імпульси струму при  $t_i = 100\text{нс}$  і  $V_{\text{син}} = 0,1\text{В}$  зображені на рис. 4, при  $t_i = 300\text{нс}$  і  $V_{\text{син}} = 0,5\text{В}$  – на рис. 5.

Залежність амплітуди струму вихідної імпульсної послідовності від напруги синапсу наведена в табл. 1.

Таблиця 1

#### Залежність амплітуди струму вихідної імпульсної послідовності від напруги синапсу

Фаза вхідного сигналу нейрону	Амплітуда імпульсу вхідного сигналу нейрону	Фаза вихідного сигналу нейрону	Амплітуда імпульсу сигналу синапсу	Амплітуда імпульсу вихідного сигналу
0,125мкс	1 В	0,125мкс	0,1В	0,151мА
0,25мкс	1 В	0,25мкс	0,5В	0,179мА

Отже, фаза імпульсів вихідної послідовності збігається з фазою вхідного сигналу, а амплітуда імпульсів вихідної послідовності залежить від амплітуди напруги сигналу ваги синапсу, тобто виконується операція синапсного множення.

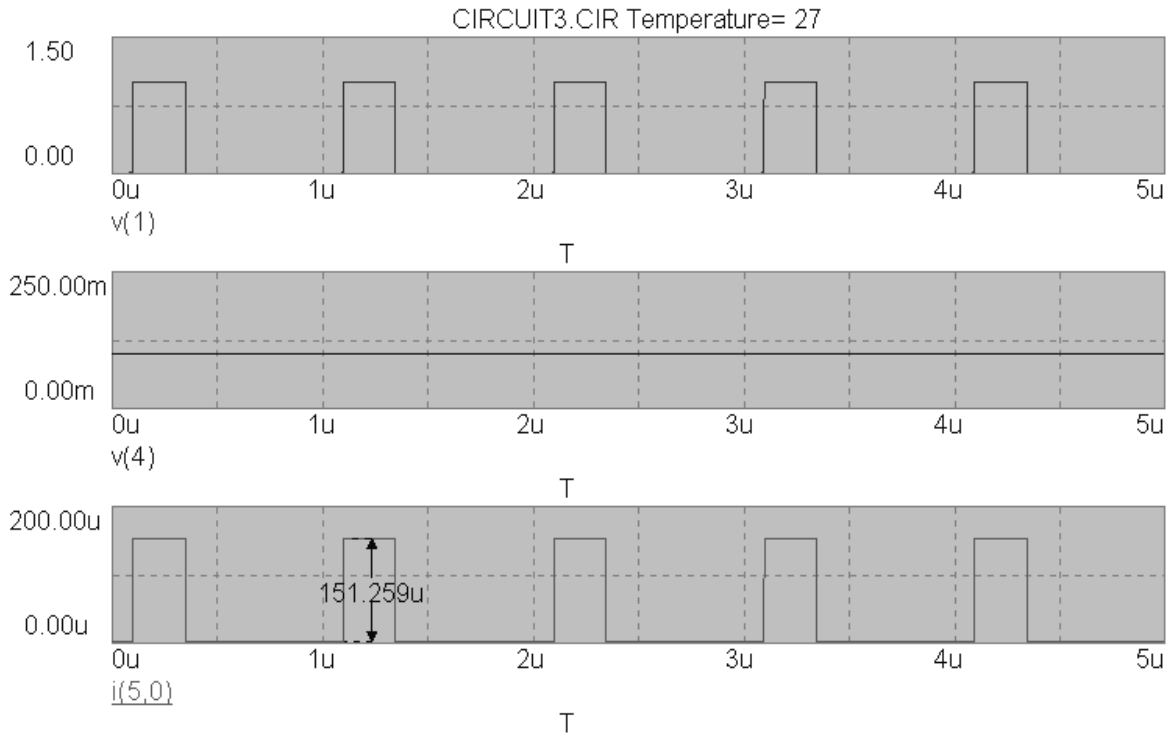


Рис. 4. Амплітудно-часові характеристики мультиплікатора

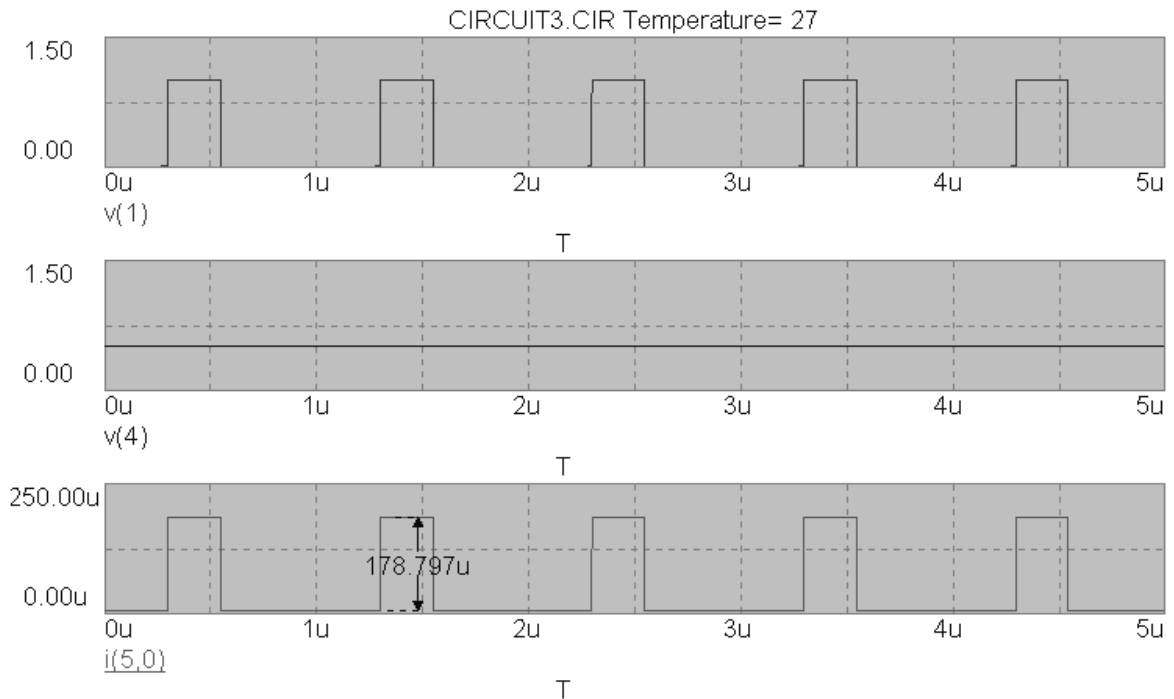


Рис. 5. Амплітудно-часові характеристики мультиплікатора

### Експериментальні дослідження

Для проведення експериментальних досліджень використаємо двозатворний МДН-транзистор – тетрод, що є конструктивним варіантом ПТ. Використаємо змішувальні властивості двозатворного транзистора у схемі фазоімпульсного мультиплікатора. Схема пристрою, що реалізує ефект мультиплікації вхідного сигналу та синапсу, зображена на рис. 6.

На перший затвор подається напруга синапсу, а на другий затвор – фазомодульована послідовність імпульсів. Залежність амплітуди імпульсів від напруги синапсу представлена в табл. 2, а осцилограми вхідних та вихідних сигналів на рис. 7, 8.

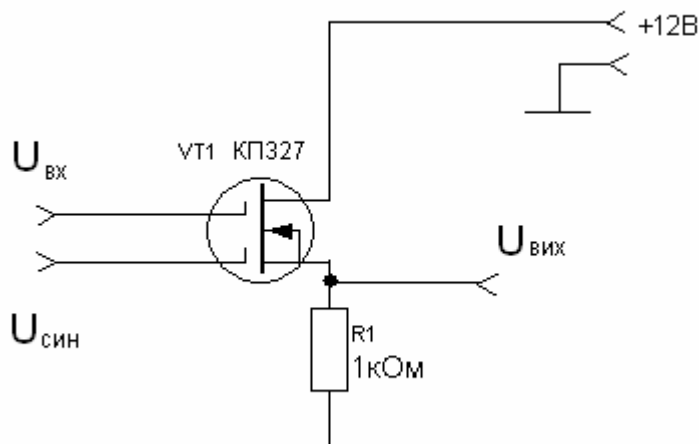


Рис. 6. Схема електрична принципова фазо-імпульсного мультиплікатора

Таблиця 2

Залежність амплітуди імпульсів від напруги синапсу

№	T, мс	$\tau$ , мс	$U_{\text{імп}}$ , В	$U_{\text{син}}$ , В	$U_{\text{в}}$ , В
1	400	200	1	1,5	0,8
1	400	200	1	0,25	0,3

З даних табл. 2 та осцилограм, зображених на рис. 7 – 9, можна зробити висновок, що при подачі на входи пристрою, схема якого зображена на рис. 6, відповідних сигналів, він виконує функції фазо-імпульсного мультиплікатора – множення вхідного сигналу нейрону та ваги синапсу, що підтверджує правильність розрахунків та моделювання.

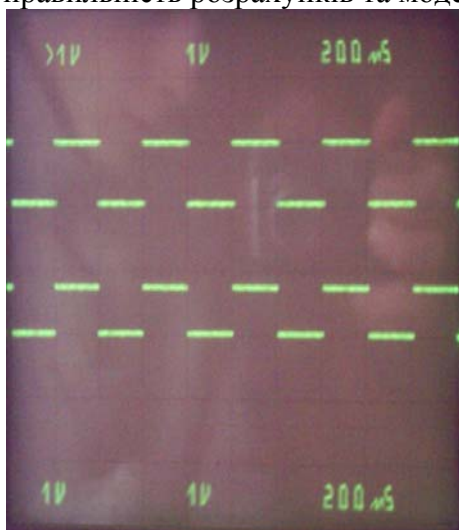


Рис. 7. Осцилограма вхідних та вихідних сигналів при  $U_{\text{імп}}=1$  В,  $U_{\text{син}}=1,5$  В

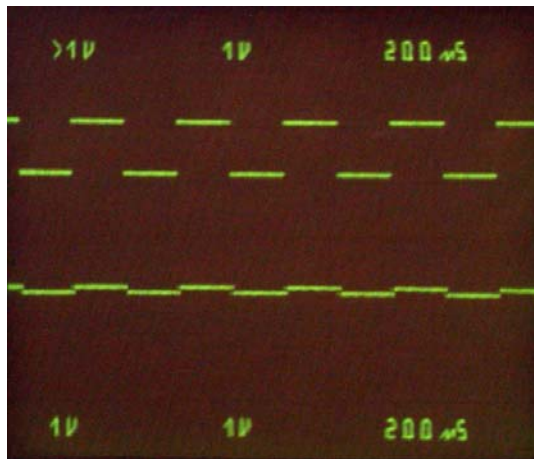


Рис. 8. Осцилограма вхідних та вихідних сигналів при  $U_{\text{імп}}=1 \text{ В}$ ,  $U_{\text{син}}=0,25 \text{ В}$

### Висновки

Запропоновано новий метод фазо-імпульсного кодування інформації в нейронних мережах. Його суть полягає в наступному: значення вхідної інформації нейрону задається зсувом імпульсів у часі – фазою імпульсної послідовності, а вага синапсу задається амплітудою постійної напруги і визначає амплітуду струму вихідної імпульсної послідовності, фаза якої збігається з фазою вхідної імпульсної послідовності, причому нульовому значенню вхідного сигналу нейрону відповідає первинний зсув фази, що і відрізняє даний метод від існуючих і дозволяє усунути можливість помилки через стрибок фази та спростити схеми нейронів.

Проведено оцінку похибок при виконанні операції синапсного множення. Показано, що величина похибки при синапсному множенні ФІМ-сигналів прямо пропорційна періоду й тривалості вхідного сигналу й обернено пропорційна мінімальному зсуву частоти.

Запропоновано електричну схему мультиплікатора вхідних сигналів нейронів і ваг синапсів, яка відрізняється від відомої тим, що може бути виконана на одному транзисторі. Виконано моделювання роботи мультиплікатора в програмі MicroCap V. Значення вхідної дії задається послідовностями імпульсів з різними зсувами частот. Вага синапсу визначається величиною напруги. На виході отримуємо послідовність імпульсів струму, часовий зсув яких збігається з часовим зсувом вхідного сигналу, а амплітуда струму залежить від значення ваги синапсу.

Проведені експериментальні дослідження розробленого мультиплікатора доводять правильність розрахунків і працездатність схеми.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. M. Ibnkahla, N. J. Bershad, J. Sombrin, F. H. Castanie. „Neural Network Modeling and Identification of Non-linear Channels with Memory: Algorithms, Applications and Analytic models” IEEE Trans. Signal Process, May 1998, P. 1208 – 1220.
2. M. Ibnkahla. "Applications of Neural Networks to Digital Communication a Survey" IEEE Signal Processing Magazine, November, 1997, P. 1186 – 1215.
3. M. Ibnkahla, J. Sombrin, F. H. Castanie, N. J. Bershad. "Neural Networks for Modeling Non-linear Memoryless Communication Channels", IEEE Trans. Commun.7, July, 1997, P. 768 – 771.
4. L. M. Reyneri, H.C. Withagen, J. A. Hegt, M. A. Chiaberge. Comparison between Analog and Pulse Stream VLSI Hardware for Neural Networks and Fuzzy Systems // Proc. of MICRONEURO 94, Int'l Conf. on Microelectronics for Neural Networks and Fuzzy Systems, Torino (I), September 1994, IEEE Computer Society Press, P. 77 – 86.
5. L. M Reyneri. Neuro-Fuzzy Hardware: Design, Development and Performance // Proc. of FEPCONN III, Skukuza (South Africa), 12 – 15 July, 1998, P. 78-102.
6. А. А. Молчанов, В. П. Волкогон, Ю. Х. Лоза, Г. И Яловега. Проектирование многофункциональных интегральных схем. – К.: Техніка, 1984. – 143 с.
7. L. M. Reyneri. A Performace Analysis of Pulse Stream Neural and Fuzzy Computing Systems // IEEE Trans. on

Circuits and Systems - II, Vol. 42, no. 10, October 1995, P. 642 – 660.

**Кичак Василь Мартинович** – д. т. н., професор, завідувач кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, тел. 598-219, e-mail: v.kuchak@mail.ru.

**Семенова Олена Олександрівна** – к. т. н., старший викладач кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, e-mail: Helene\_S@ukr.net.

**Войцеховська Ольга Олександрівна** – здобувач, інженер кафедри телекомунікаційних систем та телебачення, тел. 598-064, e-mail: rigel@svitonline.com.

**Макогон Віталій Іванович** – асистент кафедри телекомунікаційних систем та телебачення.  
Вінницький національний технічний університет.