УДК 621.37

БІТОВА СИНХРОНІЗАЦІЯ СИСТЕМИ З КОРЕЛЯЦІЙНО-ЧАСОВОЮ ШУМОВОЮ МАНІПУЛЯЦІЄЮ

Первунінський С. М., *д.т.н., професор, зав. кафедри ПЗАС,*
cherkpervun@rambler.ru
Вовченко О. В., *асистент кафедри ПЗАС,*
vovchenkoalexandr@gmail.com
Черкаський державний технологічний університет
бульв. Шевченка, 460, м. Черкаси, 18006, Україна

Анотація. *В роботі розглядаються питання синхронізації автокореляційного приймача системи передачі даних з кореляційно-часовою шумовою маніпуляцією (КЧШМ). Запропоновано новий принцип обробки прийнятого сигналу, що дозволяє виділяти сигнал синхронізації на кожному тактовому інтервалі. Проведено аналіз ефективності запропонованого методу синхронізації.*

Ключові слова: *шумові сигнали, КЧШМ, бітова синхронізація, адитивний білий гаусів шум.*

BIT SYNCHRONIZATION OF THE SYSTEM WITH CORRELATION DELAY SHIFT KEYING

Pervuninskiy S. M., *Dr.Tech.Sc., professor, head of SAS department,*
cherkpervun@rambler.ru
Vovchenko O. V., assistant of *SAS department,*
vovchenkoalexandr@gmail.com
Cherkasy State Technological University,
Shevchenko blvd, 460, Cherkasy, 18006, Ukraine

Abstract: *In the article the problems of the synchronization of autocorrelated receiver of data transmission system with correlation delay shift keying are considered. New concept of received signal processing, which allows to enhance the synchronization signal on every clock interval, is offered. The efficiency of the offered synchronization method is analyzed.*

Keywords: *noise signals, CDSK, bit synchronization, additive white gaussian noise.*

Вступ. Питання застосування шумових сигналів для передачі даних цікавлять фахівців, починаючи з 60–70-х років минулого століття. В наш час зростання вимог до захищеності інформації, обмеженості частотного ресурсу продовжує привертати увагу дослідників телекомунікаційних систем з шумовими сигналами [1]. Це пояснюється перспективами використання шумових сигналів, що мають велику базу і за рахунок зниження спектральної щільності сигналу дозволяють вести передачу даних, маскуючись під випадкові шумові процеси каналу зв’язку [2].

На сьогодні стрімкий розвиток дискретних систем з шумовими сигналами привів до зростання уваги до проблем розробки ефективної синхронізації між передавачем та приймачем у системі зв‘язку. Без надійної системи синхронізації безпомилкове демоделювання прийнятого сигналу неможливе [3].

Мета роботи – проаналізувати роботу модема з КЧШМ та синтезувати схему обробки шумового сигналу на стороні приймача, що виробляє синхроімпульси бітової синхронізації наприкінці чергового такту прийому сигналу.

Постановка задачі. Схема пристрою передачі даних зображена на рис. 1. В схемі використанні такі позначення: Г – генератор шумового процесу $x(t)$, що формується у передавачі; a_i – інформаційний символ, що передається; ЛЗ – лінія затримки на час t; І – інтегратор; В – розв’язувальний пристрій; $\tilde{a}_i$ – прийнятий інформаційний символ; S – пристрій бітової синхронізації. Приймач ке-

рується пристроєм бітової синхронізації, схему якого треба синтезувати.

На виході передавача на i-му тактовому інтервалі довжини T для інформаційного сигналу a_i сигнал $x(t)$ має вигляд:

$$x(t) = x(t) + a_i x(t-t),$$
$$i = 1,2,\ldots, \quad t = \overline{(i-1)T, iT}. \qquad (1)$$

При ідеальній синхронізації на i-му тактовому інтервалі прийнятий сигнал має вигляд:

$$y_i(t) = x_i(t) + v(t) =$$
$$= x_i(t) + a_i x_i(t-t) + v(t), \qquad (2)$$
$$iT \le t \le (i+1)T$$

де $n(t)$ – адитивна завада, яка міститься у каналі зв'язку.

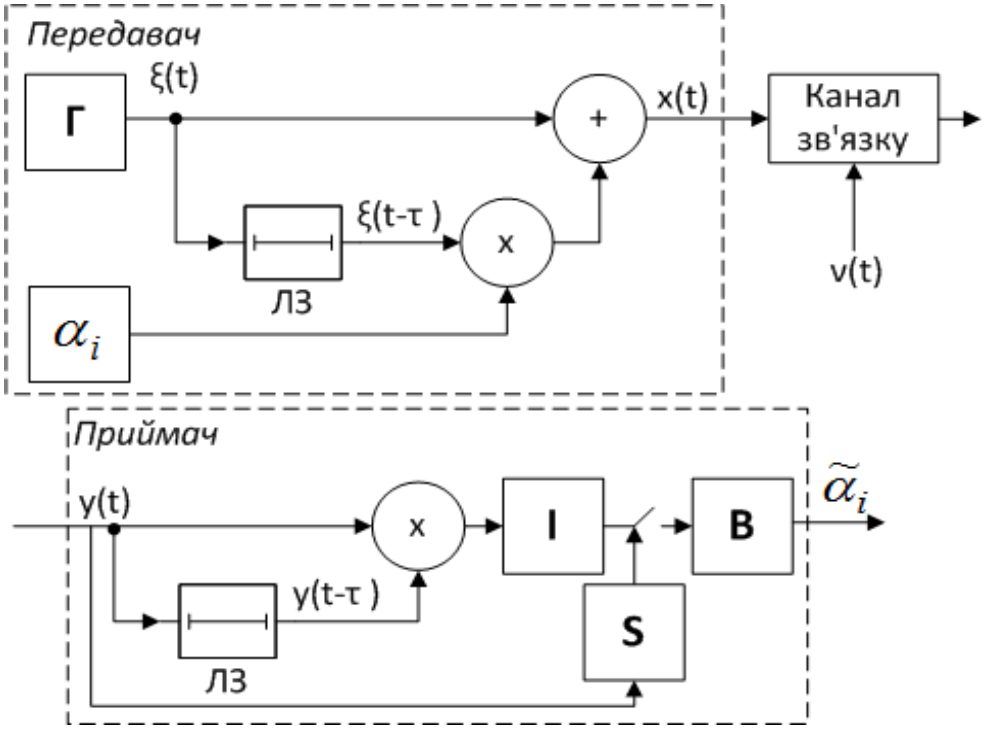

Рис. 1. Структурна схема системи зв'язку з КЧШМ

Значення відліку сигналу на виході інтегратора у приймачі на тактовому інтервалі з номером i при ідеальній синхронізації дорівнює величині

$$J_{(i+1)T} = \int_{iT}^{(i+1)T} y_i(t) \cdot y_i(t-t)dt. \qquad (3)$$

Шумові випадкові процеси $x(t)$ та $n(t)$ вважаємо стаціонарними, гаусовими, дельта-корельованими та центрованими (гаусів білий шум).

Вирішення задачі. Для синтезу алгоритму роботи схеми бітової синхронізації розглянемо ситуацію, коли інформаційний (логічний) сигнал на (i-1)-му такті мав значення $a_{i-1} = +1$, а на i-му такті передається $a_i = -1$. Розглянемо окремо випадок, коли в приймачі виникла розсинхронізація з передавачем на величину $-\Delta$. Тоді процес обробки вхідного сигналу $y_i(t)$ на i-му такті в інтеграторі приймача можна схематично представити діаграмою, що зображена на рис. 2.

На рис. 2 виділені дві фази накопичення відліку інтегратора: на першій частині тактового інтервалу для $iT - \Delta \le t \le iT$ накопичується значення J_{iT}, що фактично відноситься до кінцевої частини попереднього тактового інтервалу, коли передавалось значення $a_{i-1} = +1$; на другій частині для $iT \le t \le (i+1)T$ обробляється вже частина сигналу $y_i(t)$, що відповідає передачі корисного значення $a_i = -1$.

Зрозуміло, що першу частину J_{iT} слід вважати додатковою завадою, яка зменшує значення $J_{(i+1)T}$ при ідеальній синхронізації до величини $J_{(i+1)T-\Delta}$ при наявності розсинхронізації у приймачі на величину $-\Delta$.

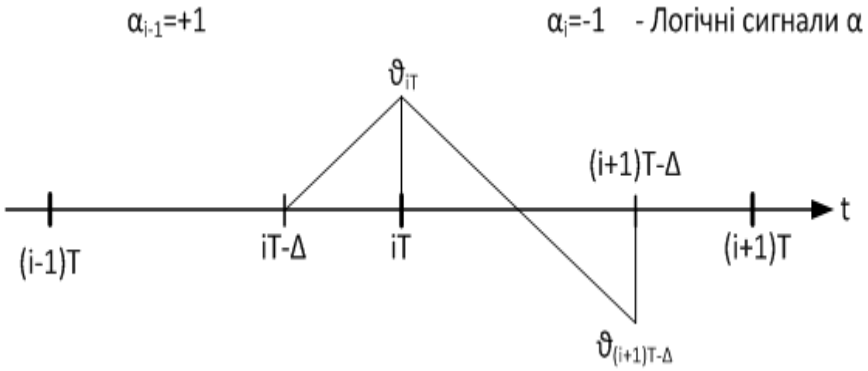

Рис. 2. Складові відліку інтегратора на *i*-му такті роботи приймача

Кількісне значення випадкових величин J_{iT} і $J_{(i+1)T-\Delta}$ (з рис. 2) визначається функціоналами:

$$J_{iT} = \int_{iT-\Delta}^{iT} y_{i-1}(t) \cdot y_{i-1}(t-t)dt, \qquad (4)$$

$$J_{(i+1)T-\Delta} = J_{iT} + J_{i\Delta}, \qquad (5)$$

де позначено $J_{i\Delta} = \int_{iT}^{(i+1)T-\Delta} y_i(t) \cdot y_i(t-t)dt.$

Визначимо значення початкового моменту першого порядку дисперсії випадкової величини $J_{(i+1)T-\Delta}$, що має дві складові, які вказані у виразі (5). Очевидно, що величини J_{iT} та $J_{i\Delta}$ є незалежними і мають різні значення математичних моментів. Тому перший момент $m_1^{J_{(i+1)T-\Delta}}$ результуючої величини $J_{(i+1)T-\Delta}$ визначається з виразу

$$\begin{aligned} m_1^{J_{(i+1)T-\Delta}} &= M\{J_{(i+1)T-\Delta}\} = m_1^{J_{iT}} + m_1^{J_{i\Delta}} = \\ &= M\{J_{iT} + J_{i\Delta}\} = M\{J_{iT}\} + M\{J_{i\Delta}\} \end{aligned}. \qquad (6)$$

Складові в (6) визначаються після підстановки в (4) та (5) значень $y_i(t)$ з виразу (2). Виконавши такі підстановки з урахуванням значень $a_{i-1} = +1$ та $a_i = -1$, маємо:

$$\begin{aligned} m_1^{J_{iT}} &= M\{J_{iT}\} = \int_{iT-\Delta}^{iT} M\{x(t)x(t-t) - x(t)x(t-2t) + x(t)n(t-t) - x^2(t-t) + x(t-t)x(t-2t) - \\ &- x(t-t)n(t-t) + x(t-t)n(t) - x(t-2t)n(t) + n(t)n(t-t)\}dt = \int_{iT-\Delta}^{iT} M\{-x^2(t-t)\}dt = -s_x^2 \cdot \Delta, \\ m_1^{J_{i\Delta}} &= M\{J_{i\Delta}\} = \int_{iT}^{(i+1)T-\Delta} M\{x(t)x(t-t) + x(t)x(t-2t) + x(t)n(t-t) + x^2(t-t) + x(t-t)x(t-2t) + \\ &+ x(t-t)n(t-t) + x(t-t)n(t) + x(t-2t)n(t) + n(t)n(t-t)\}dt = \int_{iT}^{(i+1)T-\Delta} M\{x^2(t-t)\}dt = s_x^2 \cdot (T-\Delta). \end{aligned} \qquad (7)$$

Тоді загальне значення першого початкового моменту отриманого сигналу $J_{(i+1)T-\Delta}$, у якого відлік на виході інтегратора в приймачі зсунутий розсинхронізацією на $-\Delta$, буде дорівнювати

$$\begin{aligned} m_1^{J_{(i+1)T-\Delta}} &= -s_x^2 \cdot \Delta + s_x^2 \cdot (T-\Delta) = \\ &= s_x^2 \cdot (T - 2\Delta). \end{aligned} \qquad (8)$$

Обчислення другого початкового моменту $m_2^{J_{(i+1)T-\Delta}}$ пов'язане з визначенням значень [4]:

$$m_2^{J_{iT}} = M\left\{J_{iT}^2\right\} = M\{[h_{x,x_1}(t,t-t) + h_{x,x_1'}(t,t-2t) + h_{x,n}(t,t-t) + h_{x_1,x_1}(t-t,t-t) +$$
$$+ h_{x_1,x_1'}(t-t,t-2t) + h_{x,n}(t-t,t-t) + h_{x,n}(t-t,t) + h_{x,n}(t-2t,t) + h_{n,n_1}(t,t-t_1)]^2\},$$
$$m_2^{J_{i\Delta}} = M\left\{J_{i\Delta}^2\right\} = M\{[h_{x,x_1}(t,t-t) + h_{x,x_1'}(t,t-2t) + h_{x,n}(t,t-t) + h_{x_1,x_1}(t-t,t-t) +$$
$$+ h_{x_1,x_1'}(t-t,t-2t) + h_{x,n}(t-t,t-t) + h_{x,n}(t-t,t) + h_{x,n}(t-2t,t) + h_{n,n_1}(t,t-t_1)]^2\}, \quad (9)$$

де позначено $h_{u,z}(a,b) = \int_{t_1}^{t_2} u(a)z(b)dt;$

значення величин t_1, t_2 визначаються з (7) відповідно як інтервали для J_{iT} та $J_{i\Delta}$.

Звідси значення другого початкового моменту на кожному відліку дорівнює, відповідно:

$$m_2^{J_{iT}} = \Delta(5s_x^4 + 4s_x^2 s_n^2 + s_n^4 + s_x^4 \cdot \Delta),$$
$$m_2^{J_{i\Delta}} = (T-\Delta)\times \quad (10)$$
$$\times(5s_x^4 + 4s_x^2 s_n^2 + s_n^4 + s_x^4 \cdot (T-\Delta)).$$

Маючи у своєму розпорядженні значення початкових моментів складових, що входять у величини J_{iT}^2 та $J_{i\Delta}^2$, визначимо дисперсію:

$$D_{J_{(i+1)T-\Delta}} = D_{J_{iT}} + D_{J_{i\Delta}} =$$
$$= [m_2^{J_{iT}} - (m_1^{J_{iT}})^2] + [m_2^{J_{i\Delta}} - (m_1^{J_{i\Delta}})^2] =$$
$$= (M\left\{J_{iT}^2\right\} - (M\left\{J_{iT}\right\})^2) + \quad (11)$$
$$+ (M\left\{J_{i\Delta}^2\right\} - (M\left\{J_{i\Delta}\right\})^2) =$$
$$= (5s_x^4 + 4s_x^2 s_n^2 + s_n^4)T.$$

Всі добутки, що входять до складу формули, за винятком $h_{x_1,x_1}(t-t,t-t)$ [5], є добутками незалежних гаусових випадкових величин, а отже, також є гаусовими величинами. Добуток $h_{x_1,x_1}(t-t,t-t)$ має розподіл c^2, проте при значеннях $T >> t$ його теж можна вважати наближеним до гаусового розподілу [6]. Таким чином, значення $J_{(i+1)T-\Delta}$ як сума гаусових величин може розглядатися як випадкова величина з гаусовим розподілом. Звідси, щільність розподілу сигналу $J_{(i+1)T-\Delta}$ на виході інтегратора можна описати виразом

$$w(J) = \frac{1}{\sqrt{2pD_J}} \exp(-\frac{(J-m_1^J)^2}{2D_J}). \quad (12)$$

Розглянемо теоретичний розрахунок ймовірності появи максимального значення на кожному кроці інтервалу $[-t_s, t_s]$, де t_s – максимальна розсинхронізація, при $\Delta_i = t_s + id_t$, де Δ_i – величина розсинхронізації на i-му кроці, d_t – крок синхронізації. Тоді, при знаходженні ймовірності появи максимального значення на кожному кроці інтервалу $[-t_s, t_s]$, момент першого порядку та щільність розподілу сигналу на виході інтегратора буде залежати від значення кроку синхронізації:

$$m_1^{J_i}(t_i) = s_x^2 \cdot [T - 2[t_s + idt)],$$
$$w(J_i, t_i) = \frac{1}{\sqrt{2pD_{J_n}}} \times \quad (13)$$
$$\times \exp(-\frac{(J - m_1^{J_{in}}(idt))^2}{2D_{J_i}}).$$

Наявність щільності розподілу $w(J_i, t_i)$ як функції від величини розсинхронізації $\Delta_i = t_s + id_t$ дозволяє розглянути залежність імовірності випадку, що відлік $J_{(i+1)T-\Delta_i}$ при величині Δ_i буде максимальним серед усіх відліків $J_{(i+1)T-\Delta_i}$, обчислених для значень $t_i = id_t$, $t_i \in [-t_s \div +t_s]$. Ймовірність такої події визначається з інтегралу:

$$P_{\max}(t_i) = \int_{-\infty}^{\infty} dJ_i \int_{-\infty}^{J_i} \ldots \int_{-\infty}^{J_i} w(J_1,t_1)\cdot w(J_2,t_2)\cdot\ldots\cdot w(J_s,t_s)dJ_1\ldots dJ_{i-1}dJ_{i+1}\ldots dJ_s. \quad (14)$$

На рис. 3. зображено теоретичний розрахунок за (14) ймовірності появи максимального значення на кожному кроці інтервалу максимальної розсинхронізації $[-t_s, t_s]$ при

різних відношеннях «сигнал/шум» та величини відносної розсинхронізації $d_s = t_s / d_t = 15$. Відносна величина тактового інтервалу $d_T = T / d_t$ обрана рівною 100.

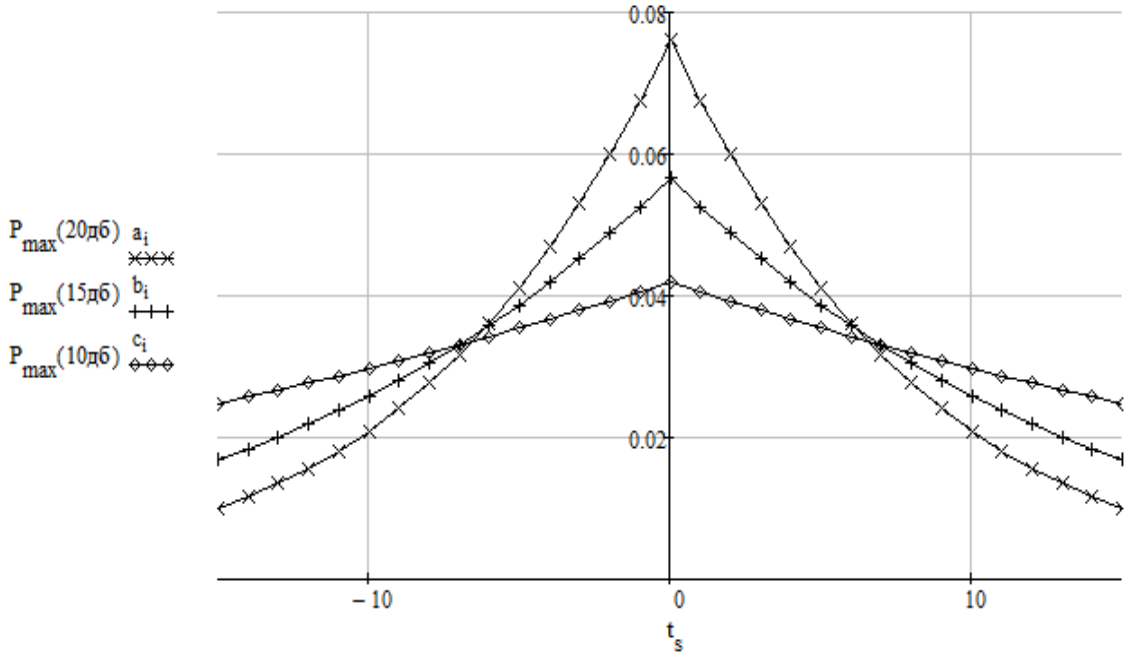

Рис. 3. Ймовірність появи максимального значення на кожному кроці інтервалу відносної розсинхронізації діапазону $t_s / d_t = \overline{-15,15}$

Наявність явних максимумів у функцій, зображених на рис. 3, при величині $t_i = 0$, що не залежить від значення перевищення сигнал/шум, вказує шлях для побудови алгоритму роботи блока синхронізації (рис. 1). А саме, цей блок повинен на кожному тактовому інтервалі обробки вхідного сигналу $y_i(t)$ обчислювати паралельно всі значення J_i для $t_i \in [-t_s \div +t_s]$. Серед знайдених величин J_i слід обирати максимальне $J_j = \max_i J_i$ та збільшувати на одиницю кількість випадків, що відповідають обраному значенню t_j. Запропонований метод синхронізації може бути використаний при передачі знакозмінної послідовності ...,+1,–1,+1,..., яка виступає прапором передачі даних. Таким чином, на кожному такті буде будуватися гістограма випадків, що при великій кількості тактів буде відтворювати залежності, зображені на рис. 3. Одночасно з цим максимум гістограми вказує на значення моменту вироблення імпульсу синхронізації, що пересилається до блока інтегрування приймача.

Висновок. Проведений аналіз виявив монотонну залежність імовірності появи максимального відліку на виході інтегратора приймача системи з КЧШМ при різних значеннях параметра часової розсинхронізації між передавачем та приймачем. Екстремальне значення ймовірності відповідає випадку, коли параметр розсинхронізації дорівнює нулю.

Таким чином, теоретично обґрунтовано алгоритм роботи схеми синхронізації, в якому імпульс синхронізації приймача виробляється за поточним значенням гістограми частоти появи максимального відліку на виході інтегратора приймача, обчисленим при різних значеннях часового параметра розсинхронізації.

Список літератури

1. Сухман С. М. Синхронизация в телекоммуникационных системах. Анализ инженерных решений / Сухман С. М., Бернов А. В., Шевкопляс Б. В. – М. : Эко-Трендз, 2003. – 270 с.
2. Терещенко Т. О. Швидкий алгоритм синхронізації в системах зв'язку з розширенням спектру / Т. О. Терещенко, Д. В. Лазарєв // Электроника и связь. Тематический выпуск «Электроника и нанотехнологии». – 2010. – № 3. – С. 190–193.

3. Брени Стефано. Синхронизация цифровых сетей связи / Стефано Брени ; пер. с англ. Н. Л. Бирюков, С. Я. Несвитская, А. В. Савчук, Н. Р. Триска. – М. : Мир, 2003. – 456 с.
4. Первунінський С. М. Дослідження завадостійкості пристрою синхронізації в системах зв'язку з шумовими сигналами / С. М. Первунінський, О. В. Вовченко // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2012. – № 1. – С. 76–81.
5. Первунінський С. М. Завадостійкість бінарного автокореляційного приймача шумового сигналу з n лініями затримки / С. М. Первунінський, О. В. Вовченко, П. Д. Журавель // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2012. – № 3. – С. 38–46.
6. Первунінський С. М. Analyze and design discreete systems telecommunication in channels of constant by parameters / С. М. Первунінський, В. В. Метелап, С. С. Гузнин // Вісник Черкаського державного технологічного університету. – 2009. – Спецвипуск. – С. 150–152.

References

1. Sukhman, S. M., Bernov, A. V. & Shevkoplyas, B. V. (2003) Synchronization in telecommunication systems. Analysis of engineering solutions. Moscow: Eco-Trends, 270 p. [in Russian].
2. Tereshchenko, T. O. & Lazarev, D. V. (2010) Fast algorithm for synchronization in communication systems with spread-spectrum. *Electronica i svyaz'. Tematic issue «Elektronika i nanotekhnologii»*, (3), s. 190-193 [in Ukrainian].
3. Brenna Stefano (2003) Synchronization of digital communication networks. Transl. from Engl. N. L. Biryukov , S. J. Nesvitskaya, A. V. Savchuk , N. R. Triska. Moscow: Myr, 456 p. [in Russian].
4. Pervuninskiy, S. M. & Vovchenko A. V. (2012) The research of noice immunity of synchronization device in communication systems with noise signals. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitety*, (1), pp. 76-81 [in Ukrainian].
5. Pervuninskiy, S. M., Vovchenko, A. V. & Zhuravel P. D. (2012) Noise immunity of binary autocorrelation receiver of noise signal with n delay lines. *Informatsiyni technologii ta comp'uterna ingineriya*, (3), pp. 38-46 [in Ukrainian].
6. Pervuninskiy, S. M., Metelap, V. V. & Huznyn S. S. (2009) Analyze and design discreete systems telecommunication in channels of constant by parameters. *Visnyk Cherkaskogo derzhavnogo tehnologichnogo universitety*. Special edition, pp. 150-152.