

УДК 621.396

Варфоломеєва О. Г., к.т.н.; Рахлицький С.О.; Жупінас М.О.; Карпіна А.О.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАВАДОСТІЙКОСТІ І МЕТОДІВ ОПТИМАЛЬНОГО ПРИЙОМУ СИГНАЛІВ В МЕРЕЖАХ LTE

**Varfolomeieva O.H., Rakhlytsky S.O., Zhupinas M.O., Karpina A.O. Investigation of noise immunity and methods of optimal reception of signals in LTE networks.**

The article substantiates the relevance of the research of noise immunity and methods of optimal reception of signals in LTE networks. The advantages of transition to the networks of the future generation FN (Future Networks) are defined. The architecture of the LTE network and the broadband communication systems are considered. The algorithms for determining the probability of error in different methods of receiving composite signals with fluctuation obstacles are investigated. The graphs of error probabilities in different methods of reception of signals are presented.

**Keywords:** noise immunity, LTE network, broadband system, composite signal, fluctuation interference, OFDM, SAE.

**Варфоломеєва О. Г., Рахлицький С.О., Жупінас М.О., Карпіна А.О. Дослідження завадостійкості і методів оптимального прийому сигналів в мережах LTE.** В статті обґрунтовано актуальність дослідження завадостійкості і методів оптимального прийому сигналів в мережах LTE. Визначено переваги переходу до мереж майбутнього покоління FN (Future Networks). Розглянуто архітектуру мережі LTE та широкопосмугові системи зв'язку. Досліджено алгоритми визначення ймовірності помилки при різних методах прийому складених сигналів при флуктуаційних завадах. Наведені графіки ймовірностей помилок при різних методах прийому сигналів.

**Ключові слова:** завадостійкість, мережа LTE, широкопосмугова система, складений сигнал, флуктуаційна завада, OFDM, SAE.

**Варфоломеєва О.Г., Рахлицький С.О., Жупінас М.О., Карпіна А.О. Исследование помехоустойчивости и методов оптимального приема сигналов в сетях LTE.** В статье обоснована актуальность исследования помехоустойчивости и методов оптимального приема сигналов в сетях LTE. Определены преимущества перехода к сетям будущего поколения FN (Future Networks). Рассмотрена архитектура сети LTE и широкополосные системы связи. Исследованы алгоритмы определения вероятности ошибки при различных методах приема составных сигналов при флуктуационных помехах. Приведены графики вероятностей ошибок при различных методах приема сигналов.

**Ключевые слова:** помехоустойчивость, сеть LTE, широкополосная система, составной сигнал, флуктуационная помеха, OFDM, SAE.

### Вступ

Архітектура мережі LTE розроблена таким чином, щоб забезпечити підтримку пакетного трафіку з так званою "гладкою" ("безшовною", seamless) мобільністю, мінімальними затримками доставки пакетів і високими показниками якості обслуговування.

Мобільність як функція мережі забезпечується двома її видами: дискретної мобільністю (роумінгом) і безперервної мобільністю (хендовера). Оскільки мережі LTE повинні підтримувати процедури роумінгу і хендовера з усіма існуючими мережами, для LTE-абонентів (терміналів) має забезпечуватися повсюдне покриття послуг бездротового широкопосмугового доступу.

Основною метою використання технології OFDM є уст- поранення впливу перешкод, викликаних багатолучевим поширенням сигналу. Технологія LTE базується на трьох основних технологіях: мультиплексування за допомогою ортогональних OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) несучих, що транслюються за допомогою багатопроменевих систем MIMO (Multiple Input Multiple Output) та на еволюційній системній архітектурі мережі SAE (System Architecture Evolution).

SAE (System Architecture Evolution) - це мережна архітектура, розроблена з метою безшовної інтеграції мобільної мережі з іншими мережами, що працюють за протоколом IP. Фізичний рівень мереж LTE реалізований на базі технології OFDM (мультиплексування з ортогональним частотним рознесенням - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) і технології SC-FDMA (мультиплексування з частотним рознесенням з передачею на одній несучій - Single-Carrier Frequency Division Multiple Access). Основною метою використання технології OFDM є усунення впливу перешкод, викликаних багатопроменевим поширенням сигналу [2,7,10].

Широкопasmові системи зв'язку використовуються в різних каналах зв'язку. Для кожного з цих каналів зв'язку характерні свої види завад. Тому дослідження питань завадостійкості широкопasmових систем зв'язку при різних методах прийому є надзвичайно актуальним.

Широкопasmові системи дозволяють ефективно боротися з зосередженими завадами і завадами, викликаними багатопроменевим характером поширення сигналу. Проте вплив цих завад усувається не повністю і вони знижують достовірність передачі інформації. Тому виникають труднощі, з якими стикаються при дослідженні реальної завадостійкості широкопasmових систем зв'язку. Хоча якісно картина представляється зрозумілою, розмаїття завад і специфічність впливу деяких з них на широкопasmові системи зв'язку не дозволяють кількісно врахувати одночасно вплив усіх завад. Цьому заважає ще відсутність достатньо повних відомостей про ряд завад (наприклад, зосереджених), про характеристики завмирань, взаємне розташування променів при багатопроменевому поширенні та ін.

### Основна частина

Розглянемо когерентний прийом в цілому і некогерентний прийом в цілому з когерентним накопиченням та автокореляційні методи прийому складених сигналів.

При когерентному прийомі в цілому і некогерентному прийомі з когерентним накопиченням складений сигнал приймається як єдине ціле. Ці методи прийому складених сигналів в цілому відрізняються від відповідних методів поелементного прийому тим, що елементарний сигнал замінюється складеним. Структура і властивості складеного сигналу не впливають на завадостійкість методів прийому при флуктуативних завадах; вона визначається виключно відношенням енергії сигналу  $Q^2 = P_c T$  до спектральної щільності потужності завади, тобто

$$h^2 = \frac{Q^2}{v_0^2} \quad (1.1)$$

Енергія складеного сигналу дорівнює

$$Q^2 = \int_0^T \left[ \sum_{k=1}^N a_k \sin(\omega_k t + \varphi_k + \varphi) \right]^2 dt = \sum_{k=1}^N Q_k^2. \quad (1.2)$$

Тому

$$h^2 = \frac{\sum_{k=1}^N Q_k^2}{v_0^2},$$

де  $Q_k^2$  – енергія  $k$ -го елемента сигналу.

При рівній енергії елементів складеного сигналу маємо

$$h^2 = \frac{Q^2}{v_0^2} = \frac{NQ_k^2}{v_0^2} = Nh_k^2. \quad (1.3)$$

Розглянемо вирази для ймовірностей помилки при когерентному і оптимальному некогерентному методах прийому деяких видів складених сигналів у двійкових системах, відповідно перетворивши відомі вирази для поелементного прийому. [1,5,9]

1. *Когерентний метод прийому в цілому.* Вираз ймовірності помилки для даного випадку

$$\rho_{\text{км}} = F\left(\gamma\sqrt{Nh_k}\right), \quad (1.4)$$

де

$$F(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{y^2}{2}\right) dy,$$

$\gamma$  – коефіцієнт, що дорівнює  $\sqrt{2}$  для систем з протилежними сигналами;

1 – для систем з ортогональними сигналами з активною паузою;

$\frac{1}{\sqrt{2}}$  – для систем з пасивною паузою.

Для систем з однократною ФРМ без урахування завадостійкості тракту виділення когерентної напруги

$$\rho_{\text{км}} = 2F\left(\sqrt{2}\sqrt{Nh_k}\right), \quad (1.5)$$

2. *Некогерентний прийом з когерентним накопиченням.* При прийомі ортогональних в посиленому сенсі сигналів з активною паузою ймовірність помилки дорівнює

$$\rho_{\text{опт}} = \frac{1}{2} \exp\left(-\frac{Nh_k^2}{2}\right), \quad (1.6)$$

при прийомі сигналів з однократною ФРМ

$$\rho_{\text{ФРМ}} = \frac{1}{2} \exp(-Nh_k^2). \quad (1.7)$$

У багатопозиційних системах з числом варіантів сигналу  $m$  ймовірності помилки будуть визначатися наступними виразами, для двох видів прийому.

1. *Когерентний прийом в цілому* при прийомі ортогональних у посиленому сенсі сигналів з активною паузою

$$\rho_{\text{опт}} \approx \sqrt{m-1} \exp\left(-\frac{Nh_k}{2} - 1,4\right). \quad (1.8)$$

При прийомі складених сигналів з багатократною ФРМ

$$\rho_{\text{ФРМ}} \approx 2F\left(\sqrt{2}\sqrt{Nh_k} \sin\left|\frac{\pi}{2^n}\right|\right), \quad (1.9)$$

де  $n$  – кратність системи,  $m = 2^n$ .

2. *Некогерентний прийом з когерентним накопиченням* при прийомі ортогональних в посиленому сенсі сигналів з активною паузою

$$\rho_{\text{опт}} = \sum_{n=1}^{m-1} (-1)^{n+1} C_{m-1}^n \frac{1}{n+1} \exp\left(-\frac{n}{n+1} Nh_k^2\right), \quad (1.10)$$

де

$$C_{m-1}^n = \frac{(m-1)!}{n!(m-1-n)!}.$$

Тому можемо зробити висновок, що у відповідності з виразами (1.4)-(1.10) імовірність помилки при когерентному та некогерентному з когерентним накопиченням методах прийому при рівній енергії складених сигналів не залежить від бази і смуги частоти сигналу [5,8].

У випадку автокореляційного методу прийому (оптимального прийому сигналів невідомої форми) сигналів із частотною модуляцією (ЧМ) є широкосмуговий прийом з інтегруванням після детектора. Отриманий вираз для ймовірності помилки при прийманні по цьому методу двійкових сигналів ЧМ із більшим рознесенням (сигналів ортогональних у посиленому змісті). Цей вираз доцільний при прийманні сигналів з великою базою й у наших позначеннях має вид

$$\rho_{\text{опт}} = F \left( \frac{h}{\sqrt{2} \sqrt{1 + \frac{FT}{h^2}}} \right), \quad (1.11)$$

де  $F$  – смуга пропущення фільтра приймача;  
 $T$  – тривалість посліжки сигналу.

При прийманні сигналів з однократною ФРМ

$$\rho_{\text{ФРМ}} = F \left( \frac{h}{\sqrt{1 + \frac{FT}{2h^2}}} \right) \quad (1.12)$$

Проаналізуємо завадостійкість автокореляційного методу прийому двійкових сигналів з кореляційно-часовою модуляцією. Алгоритм роботи приймача в цьому випадку записується у вигляді

$$\text{sign}I = \text{sign} \int_{[\tau]}^{T+\tau} x(t-\tau)x(t)dt. \quad (1.13)$$

Обчислимо інтеграл у цьому виразі. Вважаємо, що був переданий перший варіант сигналу При цьому

$$\left. \begin{aligned} x(t) &= s(t) + s(t-\tau) + \xi(t) \\ x(t-\tau) &= s(t-\tau) + s(t-2\tau) + \xi(t-\tau) \end{aligned} \right\}, \quad (1.14)$$

При однократній ФРМ у якості варіантів використовуються наступні сигнали:

$$\left. \begin{aligned} s_1(t) &= \begin{cases} s(t) & 0 \leq t \leq T \\ s(t+T) & T \leq t \leq 2T \end{cases} \\ s_2(t) &= \begin{cases} s(t) & 0 \leq t \leq T \\ -s(t+T) & T \leq t \leq 2T \end{cases} \end{aligned} \right\}, \quad (1.15)$$

де  $s(t)$  – сигнал, що повторюється від посліжки до посліжки.

Алгоритм кореляційного прийому сигналів з однократною ФРМ має аналогічний вид, але в цьому випадку час затримки  $\tau$  дорівнює тривалості посліжки  $T$ .

Подальший аналіз приймання сигналів із ФРМ аналогічний представленому вище, але в цьому випадку величини  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_6, \theta_7$  дорівнюють нулю (відсутні). Випадкова величина  $\theta$  буде мати дисперсію

$$M_2(\theta) = v_c^2 v_0^2 M \left( 1 + \frac{v_0^2}{2v_c^2} \right). \quad (1.16)$$

Імовірність помилки при прийманні сигналів із ФРМ

$$\rho_{\text{ФРМ}} = F \left( \frac{h}{\sqrt{1 + \frac{FT}{2h^2}}} \right), \quad (1.17)$$

На рис. 1.1 наведено криві, що характеризують імовірність помилок при різних методах прийому складених сигналів у двійкових системах зв'язку.

Як видно з порівняння відповідних виразів і графіків, складені сигнали із ФРМ при всіх методах прийому забезпечують вигравш по енергії у два рази, у порівнянні із системами з ортогональними сигналами. Це справедливо як для взаємкореляційних, так для автокореляційних методів прийому [4,6].

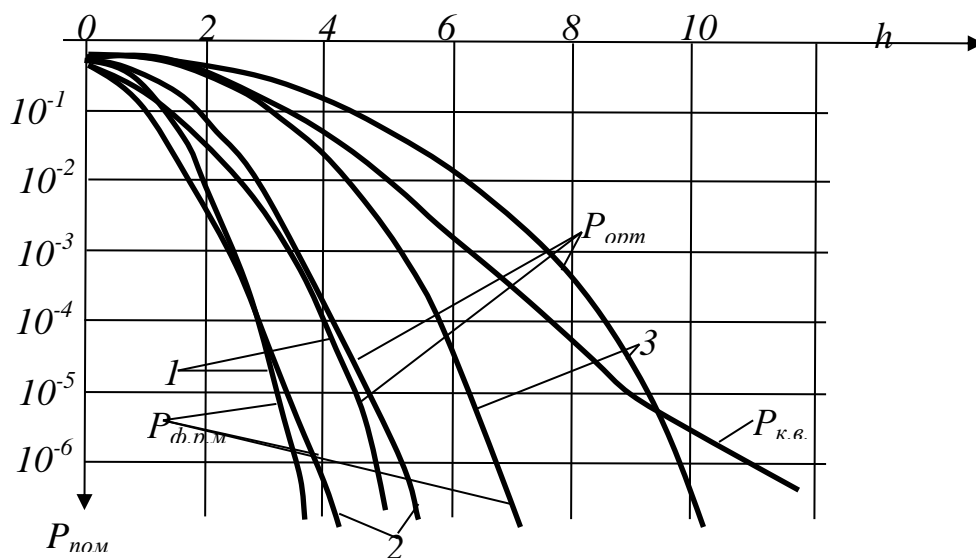


Рис. 1.1 Імовірності помилок при прийманні двійкових складених сигналів:

1 – когерентний прийом в цілому, 2 – некогерентний прийом з когерентним накопиченням, 3 – некогерентний прийом з некогерентним накопиченням; автокореляційне прийом  $(FT)=100$

На рис. 1.2 приведені графіки, що характеризують завадостійкість багатопозиційних систем ( $m=4$ ) при різних методах прийому. На рис. 1.3 і 1.4 наведені графіки, що характеризують залежність завадостійкості групи автокореляційних методів прийому від числа елементів  $N$  або бази  $FT$  складеного сигналу.

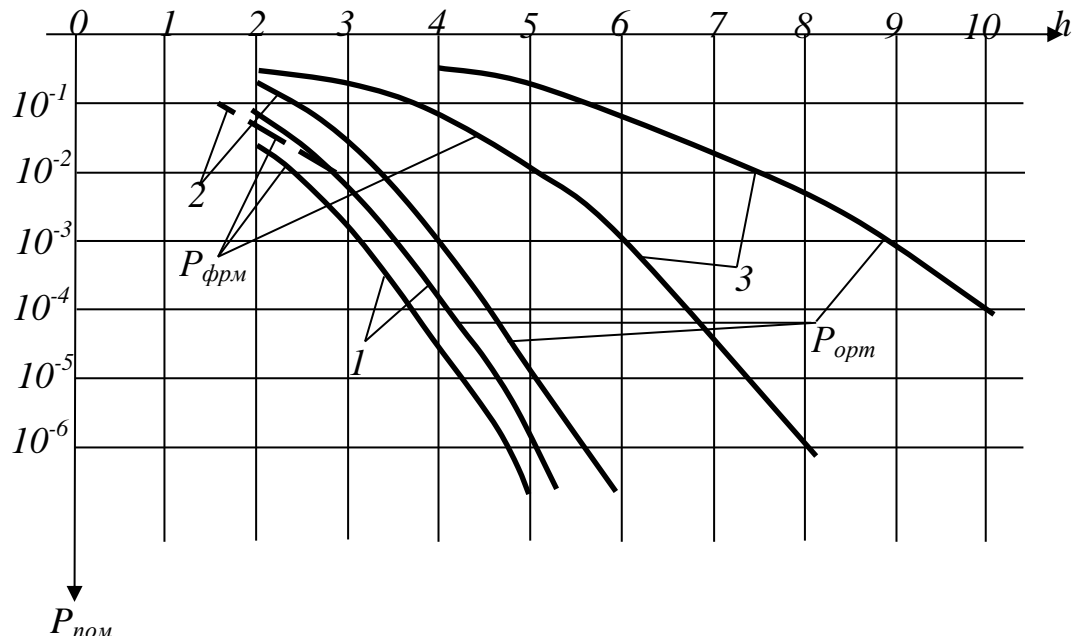


Рис. 1.2. Імовірності помилок при прийманні багатопозиційних ( $m=4$ ) складених сигналів: 1 – когерентний прийом в цілому, 2 – некогерентний прийом з когерентним накопиченням, 3 – некогерентний прийом з некогерентним накопиченням; автокореляційний прийом  $N(FT) = 100$

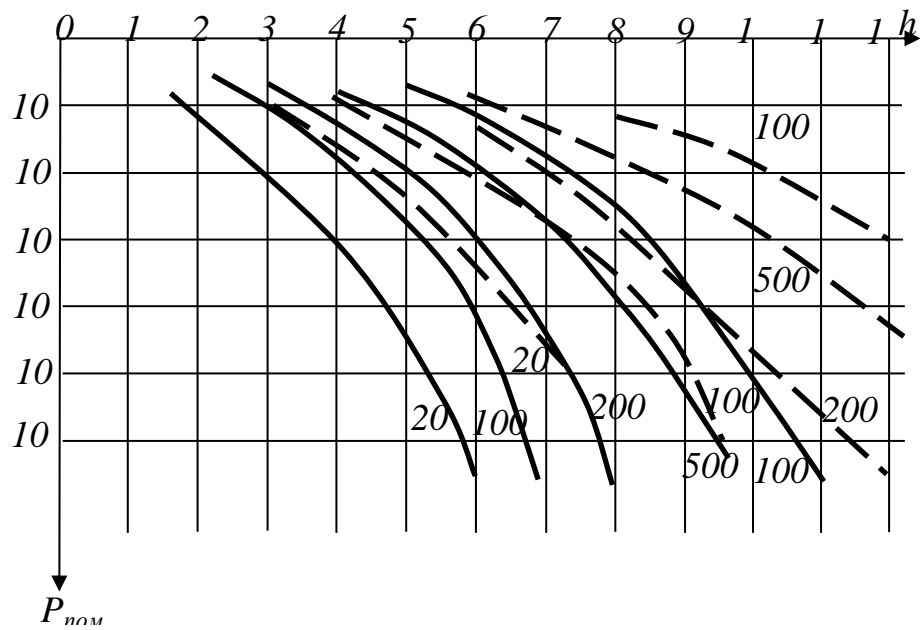


Рис. 1.3. Імовірності помилок автокореляційних методів прийому при різних значеннях  $N(FT)$ : складені сигнали із ФРМ, ортогональні складені сигнали

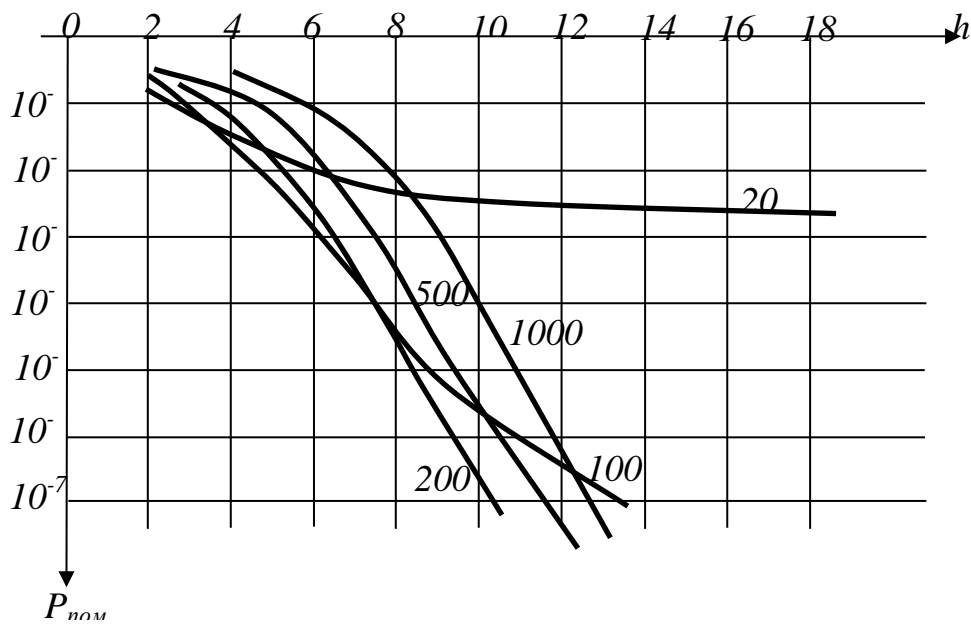


Рис. 1.4. Імовірності помилок при прийманні сигналів з кореляційно-часовою модуляцією при різних значеннях бази сигналу  $FT$

### Висновки

При дослідженні завадостійкості і методів оптимального прийому сигналів в мережах LTE визначено:

- Технологія LTE базується на трьох основних технологіях: OFDM (Orthogonal Frequency-Division Multiplexing) MIMO (Multiple Input Multiple Output) мережі SAE (System Architecture Evolution).
- Імовірність помилки при когерентному та некогерентному з когерентним накопиченням методах прийому при рівній енергії складених сигналів не залежить від бази і смуги частоти сигналу.
- Складені сигнали із ФРМ при всіх методах прийому забезпечують вигреш по енергії у два рази, у порівнянні із системами з ортогональними сигналами.

### Література.

1. Беркман Л.Н. Методы когерентного приема многопозиционных АФМ сигналов многоканальных модемов / Л.Н. Беркман // Сб. научных трудов (Центр научно-исследовательский институт связи). – 1987. – С. 44-50.
2. Варакин Л.Е. Интеллектуальная сеть: эволюция сетей и услуг связи / Л.Е. Варакин // Электросвязь. – 1992. – № 1. – С. 22-24.
3. Варфоломеева О.Г. Методика розрахунку пропускної спроможності каналів системи управління телекомунікаційними мережами / Варфоломеева О.Г., Мніщенко С.І., Чумак О.І. // Достижения в телекоммуникациях за 10 лет независимости Украины: сборник докладов V международной научно-практической конференции (Часть 1), 21-22 августа. – Одесса, 2001. – С. 79-80.
4. Витерби Э.Д. Принципы когерентной связи / Э.Д. Витерби. – М.: Сов. радио, 1970. – 392 с.
5. Невдяев Л.М. Мобильная связь 3-го поколения / Л.М. Невдяев. – М.: МЦНТИ, 2000. – 208 с.
6. Окунев Ю.Б. Теория фазоразностной модуляции / Ю.Б. Окунев. – М.: Связь, 1979. – 215 с.

7. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / [Поповський В.В., Олійник В.Ф. та ін.]. – Х.: СМІТ, 2006. – 564 с.
8. Стеклов В.К. Оптимізація параметрів багатоканальних модемів / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман, О.І. Чумак // Вісник. – 2002. – №2. – С. 124-131.
9. Стеклов В. К. Проектування телекомунікаційних мереж / В.К. Стеклов, Л.Н. Беркман. – К.: Техніка, 2002. – 792 с.
10. Гельгор А.Л. Технологія LTE мобільної передачі даних: навч. посібник / Гельгор А.Л., Попов Е.А. - СПб.: Изд-во політехн. ун-ту, 2011. - 204 с.

*Автори статті*

**Варфоломесєва Оксана Григорівна** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри телекомунікаційних систем, Державний університет телекомунікацій, Київ, Україна.

**Рахлицький Сергій Олександрович** - здобувач, Державний університет телекомунікації, Київ, Україна.

**Жупінас Марина Олегівна** – студент, Державний університет телекомунікації, Київ, Україна.

**Карпіна Аліна Олександрівна** – студент, Державний університет телекомунікації, Київ, Україна.

*Authors of the article*

**Varfolomeieva Oksana Hryhorivna**- candidate of science (technic), Associate Professor, Associate Professor of Telecommunication system State university of telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Rakhlytskyi Serhiy Oleksandrovych** - applicant, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Zhupinas Marina Olegivna** - student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

**Karpina Alina Oleksandrivna** - student, State University of Telecommunications, Kyiv, Ukraine.

Дата надходження в редакцію: 17.06.2018 р.

Рецензент: д.т.н., проф. О.М. Власов