

Сайко В.Г., д.т.н.;                   Бреславський В.О., асп.;  
Грищенко Л.М., асп.;               Кравченко В.І., асп.

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ РОЗРАХУНКУ МОБІЛЬНОСТІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ БЕЗПРОВОДОВОЇ МЕРЕЖІ

**Sayko V.H., Breslavskyy V.O., Hryshchenko L.M., Kravchenko V.I. A mathematical model for calculating the decentralized wireless mobile network.** The main problem of self-organizing wireless networks with mobile users is to maintain "connectedness", "accessibility" of subscribers in the same network space. Due to the mobility of an important issue in the design of such a network is: how to organize the work of the network that in an unpredictable movement of nodes guarantee delivery of the message that was sent in either direction, it is means to provide a network connection with retransmission. This is achieved by modeling and evaluation of radio nodes in the transformation of the network, development of recommendations for the management network in order to ensure quality of service. The work presents mathematical model for calculating mobility of a decentralized network that based on a new system of mobility criterion. These formulas enable us to assess the impact of mobility of radio devices of self-organizing wireless network on the dynamics changes in volume and capacity of traffic data.

**Keywords:** mobile networks, decentralized wireless networks, capacity of radio channel, criterion of mobility of the network

**Сайко В.Г., Бреславський В.О., Грищенко Л.М., Кравченко В.І. Математична модель розрахунку мобільності децентралізованої безпроводової мережі.** Наведена математична модель розрахунку мобільності децентралізованої мережі на основі нового системного критерію мобільності. Отримані формули дозволяють оцінити по даному критерію вплив мобільності радіозасобів децентралізованої безпроводової мережі на динаміку змін пропускної здатності й об'єму переданих даних.

**Ключові слова:** мобільні мережі, децентралізовані безпроводові мережі, пропускна спроможність радіоканалу, критерій мобільності мережі

**Сайко В. Г., Бреславский В. А., Грищенко Л.Н., Кравченко В.И. Математическая модель расчета мобильности децентрализованной беспроводной сети.** Приведена математическая модель расчета мобильности децентрализованной сети на основе нового системного критерия мобильности. Полученные формулы позволяют оценить по данному критерию влияние мобильности радиосредств децентрализованной беспроводной сети на динамику изменений пропускной способности и объема передаваемых данных.

**Ключевые слова:** мобильные сети, децентрализованные беспроводная сеть, пропускная способность радиоканала, критерий мобильности сети

**1. Вступ.** Різноманітність технологій радіодоступу та збільшення числа мультистандартних абонентських пристроїв дозволяють сьогодні інтегрувати різні технології доступу в єдину мережу для створення гетерогенної (неоднорідної) безпроводової мережі. Така мережа складається з сегментів різних технологій радіодоступу, зони покриття яких накладаються. Це дозволяє збільшити пропускну здатність мережі і розширити зону її покриття, а для мобільних терміналів надавати зв'язок з необхідною якістю. На відміну від традиційної клієнт-серверної архітектури накладені самоорганізовані мережі, як правило, утворені множиною рівноправних вузлів, кожен з яких може бути як в ролі клієнта, так і в ролі сервера. Яскравим прикладом такої архітектури є P2P-мережі (peer-to-peer) [1, 2]. Будь-який вузол даної мережі не гарантує своєї присутності на постійній основі, довільно підключаючись / відключаючись від мережі. Реалізація такого підходу дозволяє значно підвищити відмовостійкість, пропускну здатність і теоретично зберігати працездатність мережі при будь-якій кількості і поєднанні доступних вузлів.

Adhoc або децентралізовані мережі (ДМ) – це зазвичай безпроводові локальні (міські або персональні) мережі, в яких вузли (мобільні абоненти) мають однаковий статус (однорангові) і мають можливість вільно обмінюватися повідомленнями з іншими абонентами мережі в межах зони радіопрозорості. Оскільки при переміщенні такі вузли

можуть виходити за межі радіопрозорості, в мережах використовується можливість ретрансляції пакетів до одержувача через інших абонентів мережі (багатострибкова передача). Згідно з таким підходом кожен мобільний термінал (МТ) епізодичної мережі діє як передавач, приймач і ретранслятор повідомлень. Функція ретранслятора передбачає прийом радіосигналу, посилення його і передачу далі, в епізодичній мережі до цих функцій МТ додається ще і функція маршрутизації. Локальний характер мережі обумовлений тільки обмеженнями на поширення сигналу в межах прямої видимості та енергетичними обмеженнями на ретрансляцію.

Велика потреба в таких мережах знайшла відображення в стандартах безпроводових мереж, наприклад в стандарті IEEE 802.11, відомому під комерційною маркою Wi-Fi. У цьому стандарті мережі adhoc створюються з однотипних пристроїв і використовують розподілене управління, при цьому кожна станція знаходиться в зоні безпосереднього радіоприймання всіх інших станцій. З моменту публікації першої версії стандарту в 1997 р. з'явилося багато нових завдань, які вимагали забезпечення безперебійної роботи рухомих станцій і розширення зони покриття мережі. Розширення зони покриття мережі означає, що деякі станції зв'язкової мережі знаходяться поза зоною радіоприймання один одного, тому для доставки пакетів між ними потрібно ретрансляція пакетів через проміжні станції. Таким чином, розширення зони покриття мережі призводить до переходу від однокрокової мережі до багатокрокової. Технологіями, що забезпечують роботу рухомих станцій в багатокрокової мережі, стали, оформлена у вигляді специфікацій організації IETF технологія мобільних adhoc мереж (мереж MANET) і технологія mesh-мереж стандарту IEEE 802.11s (мереж Wi-FiMesh).

Основною проблемою такої мережі з рухомими абонентами є підтримання “зв'язності”, “доступності” абонентів в єдиному мережевому просторі. Через рухливість абонентів маршрут передачі інформації постійно змінюється і важко передбачуваний. Проблема вибору адекватного алгоритму маршрутизації – одна з найважливіших для побудови ефективних епізодичних мереж [3]. Також, важливе питання при проектуванні подібної мережі полягає в можливості організувати роботу мережі таким чином, щоб в умовах непередбачуваного переміщення вузлів гарантувати доставку повідомлення адресату в будь-якому напрямку, тобто забезпечити зв'язність мережі з урахуванням ретрансляції. Це завдання вирішується шляхом моделювання і оцінювання радіопрозорості вузлів при трансформації мережі, вироблення рекомендацій з управління мережею для забезпечення якості обслуговування (QoS, Quality of Service).

У таких системах передбачається прийом сигналів абонентами, які знаходяться в різноманітних транспортних засобах. Однією із проблем, що виникають при розробці цих систем, є оцінка впливу швидкості руху транспортного засобу на якість прийому сигналів. Такому аналізу присвячений ряд робіт [4, 5]. Отримані в цих роботах результати засновані на методі математичного моделювання пристроїв прийому сигналів. Крім того, аналіз публікацій з даної тематики, включаючи нормативні документи, дає вельми суперечливі відомості щодо величини максимально допустимої швидкості переміщення МТ, що часто пов'язано з неоднозначністю визначення умов експлуатації, тобто середовища поширення радіохвиль.

У [5, 6] для оцінки можливостей функціонування таких типів радіосистем в умовах мобільного прийому було запропоновано в якості системного критерію мобільності вибрати показник  $[f_{d3dB} \cdot T_s]$ , де  $f_{d3dB}$  – доплеровська частота, за якої необхідне для забезпечення нормативної якості послуг зв'язку відношення сигнал/шум в каналі перевищує своє номінальне значення на 3 дБ;  $T_s$  – тривалість символу. Але треба зазначити, що такий критерій являє собою цілком емпіричну оцінку, одержувану шляхом імітаційного моделювання або польових випробувань в умовах радіозв'язку, максимально наближених до реальних. При всіх своїх перевагах цей підхід не дозволяє оцінити динаміку змін пропускної

здатності й об'єму переданих даних, який реально може обслужити децентралізована мережа за період зміни своєї структури.

Таким чином, в даний час залишається актуальною задача розробки методів аналізу ефективності механізмів доставки даних, використовуваних в мережах Wi-FiMesh при передачі потокових даних, що дозволяють зробити оцінку ефективності цих механізмів і налаштувати їх для виконання вимог до якості обслуговування трафіку.

**Метою даної статті** є розробка математичної моделі розрахунку мобільності децентралізованої мережі на основі нового системного критерію мобільності, який враховує динаміку змін пропускної здатності й обсягом переданих даних.

## 2. Модель розрахунку мобільності самоорганізуючої безпроводової мережі

В результаті проведеного аналізу для кількісної оцінки ступеня мобільності пропонується використовувати відношення  $[Q_r / Q_{\max}]$ , де  $Q_r$  – об'єм повідомлень, який реально може обслужити децентралізована мережа за період зміни своєї структури;  $Q_{\max}$  – потенційно можливий об'єм повідомлень, який здатна обслужити децентралізована мережа за той же час в стаціонарному режимі.

При цьому

$$Q_{\max} = Q_{\max} \cdot T_o; \quad (1)$$

$$Q_r = \sum_{i=1}^n C_i \cdot t_i, \quad (2)$$

де  $T_o$  – період часу зміни структури ДМ;  $n$  – кількість станів, в яких може знаходитись ДМ за середній час  $T_o$ ;  $C_i$  – пропускна здатність ДМ в  $i$ -му стані;  $t_i$  – середній час знаходження ДМ в  $i$ -му стані.

Радіозасоби ДМ можуть пересуватися в довільні моменти часу, а час пересування і час їх роботи мають випадкову тривалість. Отже, зміни структури ДМ в ході її функціонування можна описати випадковим процесом. Так як для будь-якого розглянутого моменту часу ймовірнісні характеристики цього процесу в майбутньому залежатимуть тільки від того, коли і як система перейшла в цей стан, то такий процес можна вважати марковським.

Ймовірність переходу  $P_{ij}$  (ймовірність того, що процес у момент часу  $t + \Delta t$  буде перебувати в стані  $S_j$ , за умови, що в момент часу  $t$  він знаходиться в стані  $S_i$ ), визначатиметься з виразу:

$$P_{ij} = P \left\{ \begin{matrix} t + \Delta t \\ S_j \end{matrix} \middle| \begin{matrix} t \\ S_i \end{matrix} \right\} = \lambda_{ij} \Delta t + O(t), \quad (3)$$

де  $\lambda_{ij}$  – інтенсивність переходів (середнє число переходів за одиницю часу);  $\Delta t$  – проміжок часу, протягом якого ми спостерігаємо за ДМ в очікуванні переходу з одного стану в інший;  $O(t)$  – величина, нескінченно мала в порівнянні з  $\Delta t$ .

Таким чином, процес зміни структури ДМ, що полягає в переміщенні радіозасобів ДМ до нових місць, можна уявити однорідним марковським процесом з безперервним часом і кінцевою множиною станів.

Для ймовірностей  $P_i(t)$  знаходження ДМ в  $i$ -х станах будуть справедливі рівняння Колмогорова-Чепмена (5) [7]:

Рівняння для ймовірностей станів  $P_i(t)$  складаються, використовуючи граф станів ДМ. Усі вхідні інтенсивності враховуються зі знаком плюс, вихідні – зі знаком мінус. Крім цього, для ймовірностей станів  $P_i(t)$  повинна виконуватися умова нормування:

$$P_1(t) + P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + P_8(t) + P_9(t) + P_{10}(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t) + P_{13}(t) + P_{14}(t) = 1. \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \frac{dP_1(t)}{dt} &= -(\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3})P_1(t) + \lambda_{14,1}P_{14}(t); & \frac{dP_2(t)}{dt} &= -\lambda_{2,4} + P_2(t) + \lambda_{1,2}P_1(t); \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} &= -(\lambda_{3,4} + \lambda_{3,6})P_3(t) + \lambda_{1,3}P_1(t); \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} &= -(\lambda_{4,5} + \lambda_{4,7})P_4(t) + \lambda_{2,4}P_2(t) + \lambda_{3,4}P_3(t); \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} &= -\lambda_{5,8} + P_5(t) + \lambda_{4,5}P_4(t); & \frac{dP_6(t)}{dt} &= -(\lambda_{6,7} + \lambda_{6,10})P_6(t) + \lambda_{3,6}P_3(t); \\
 \frac{dP_7(t)}{dt} &= -(\lambda_{7,8} + \lambda_{7,11})P_7(t) + \lambda_{4,7}P_4(t) + \lambda_{6,7}P_6(t); \\
 \frac{dP_8(t)}{dt} &= -(\lambda_{8,9} + \lambda_{8,12})P_8(t) + \lambda_{5,8}P_5(t) + \lambda_{7,8}P_7(t); \\
 \frac{dP_9(t)}{dt} &= -\lambda_{9,13}P_9(t) + \lambda_{8,9}P_8(t); & \frac{dP_{10}(t)}{dt} &= -\lambda_{10,11} + P_{10}(t) + \lambda_{6,10}P_6(t); \\
 \frac{dP_{11}(t)}{dt} &= -\lambda_{11,12}P_{11}(t) + \lambda_{10,11}P_{10}(t) + \lambda_{7,11}P_7(t); \\
 \frac{dP_{12}(t)}{dt} &= -\lambda_{12,13}P_{12}(t) + \lambda_{8,12}P_8(t) + \lambda_{11,12}P_{11}(t); \\
 \frac{dP_{13}(t)}{dt} &= -\lambda_{13,14}P_{13}(t) + \lambda_{9,13}P_9(t) + \lambda_{12,13}P_{12}(t); & \frac{dP_{14}(t)}{dt} &= -\lambda_{14,1}P_{14}(t) + \lambda_{13,14}P_{13}(t).
 \end{aligned} \right\} (5)$$

Якщо припустити, що процес функціонування ДМ стаціонарний в часі, то система диференціальних рівнянь (5) перетвориться в систему лінійних алгебраїчних рівнянь.

Після відповідних перетворень система рівнянь буде мати вигляд:

$$\left. \begin{aligned}
 \lambda_{14,1}P_{14} - (\lambda_{1,2} + \lambda_{1,3})P_1 &= 0; & \lambda_{1,2}P_1 - \lambda_{2,4}P_2 &= 0; & \lambda_{1,3}P_1 - (\lambda_{3,4} + \lambda_{3,6})P_3 &= 0; \\
 \lambda_{3,4}P_3 + \lambda_{2,4}P_2 - (\lambda_{4,5} + \lambda_{4,7})P_4 &= 0; & \lambda_{4,5}P_4 - \lambda_{5,8}P_5 &= 0; & \lambda_{3,6}P_3 - (\lambda_{6,7} + \lambda_{6,10})P_6 &= 0; \\
 \lambda_{6,7}P_6 + \lambda_{4,7}P_4 - (\lambda_{7,8} + \lambda_{7,11})P_7 &= 0; & \lambda_{7,8}P_7 + \lambda_{5,8}P_5 - (\lambda_{8,9} + \lambda_{8,12})P_8 &= 0; \\
 8,9P_8 - \lambda_{9,13}P_9 &= 0; & \lambda_{6,10}P_6 - \lambda_{10,11}P_{10} &= 0; & \lambda_{7,11}P_7 + \lambda_{10,11}P_{10} + \lambda_{11,12}P_{11} &= 0; \\
 \lambda_{11,12}P_{11} + \lambda_{8,12}P_8 - \lambda_{12,13}P_{12} + P_{12} &= 0; & \lambda_{12,13}P_{12} + \lambda_{9,13}P_9 - \lambda_{13,14}P_{13} &= 0; & \lambda_{13,14}P_{13} - \lambda_{14,1}P_{14} &= 0.
 \end{aligned} \right\} (6)$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14} = 1$$

Вирішуючи дану систему рівняння методом Гауса, можна визначити шукані ймовірності  $P_i$  знаходження ДМ в довільному стані.

Згідно посиленому закону великих чисел, час знаходження ДМ в  $i$ -ому стані обчислюється з виразу:  $t_i = P_i T_0$ .

Пропускні здатності  $C_i$  ДМ ві-х станах і інтенсивності переходів  $\lambda_{ij}$ , задаються відповідно в реальних умовах функціонування ДМ.

Як відомо, в широкосмугових OFDM системах радіозв'язку висока швидкість досягається шляхом паралельної передачі даних по  $N$  частотних підканалах (піднесучих). Тоді, використовуючи залежності [8], знайдемо пропускну здатність  $C$  OFDM системи:

$$\begin{aligned}
 C &= \int_{\Delta f} \log_2 \left( 1 + \frac{S(f)}{N(f)} \right) df = \sum_{j=1}^N \int_{\Delta f} \log_2 \left( 1 + \frac{S_j(f)}{N_j(f)} \right) df = \\
 &= \sum_{j=1}^N \Delta f \log_2 \left( 1 + \frac{P_j^R}{\sigma_{nj}^2} \right) = \Delta f \sum_{j=1}^N \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_j P_j}{\sigma_{nj}^2} \right) = \Delta f \sum_{j=1}^N \log_2 \left( 1 + \frac{\lambda_j^2 P_j}{\sigma_{nj}^2} \right) \left[ \frac{\text{біт}}{\text{с}} \right],
 \end{aligned} \quad (7)$$

де  $P_j^R$  – потужність сигналу на вході приймача;  $\sigma_{n_j}^2$  – потужність адитивного шуму;

$P_j$  – вихідна потужність сигналу;  $\lambda_j$  – коефіцієнт посилення каналу по потужності;

$\mu_j$  – амплітуда комплексного коефіцієнта передачі каналу на  $j$ -й піднесучій;

$S(f)$  – спектральна щільність сигналу;  $N(f)$  – спектральна щільність адитивного гаусівського шуму;  $\Delta f$  – ширина смуги сигналу на піднесучій.

Отже, пропускна здатність OFDM системи може бути представлена як сума пропускних здатностей частотних підканалів (піднесучих), для кожного з яких справедлива формула Шеннона [8-11].

Оскільки пропускна здатність каналу зв'язку залежить від амплітуди комплексних коефіцієнтів передачі на кожній піднесучій, то сама пропускна здатність є випадковою величиною, розподіл якої визначається розподілом сукупності значень.

У [9-11] досліджується вплив одночасно швидких і повільних завмирань на пропускну здатність каналу OFDM систем, що дозволяє оцінити ефективність застосовуваних способів боротьби з ними і вибирати параметри приймально-передавальних пристроїв при проектуванні радіосистем.

При дослідженні пропускної здатності радіоканалу зв'язку OFDM системи була використана статистична модель каналу, основана на наступних припущеннях:

– канал зв'язку є випадковим квазістаціонарним широкосмуговим частотно-селективним;

– значення амплітуди комплексних коефіцієнтів передачі каналу на всіх піднесучих є статистично незалежними, однаково розподіленими випадковими величинами;

– амплітуди комплексних коефіцієнтів передачі каналу на всіх піднесучих розподілені за такою залежністю, яка враховує швидкі і повільні завмирання [11]:

$$W(x) = \frac{4}{\Gamma(m)\Gamma(m_1)} \left(\frac{mm_1}{\Omega}\right)^{\frac{m+m_1}{2}} \times x^{m+m_1-1} K_{m-m_1}\left(2x^2 \frac{mm_1}{\Omega}\right), \quad (8)$$

де  $K_\nu(z) = K_{m-m_1}\left(2x^2 \frac{mm_1}{\Omega}\right)$  – модифікована функція Бесселя;

$\Gamma(m) = (m-1) \int_0^\infty t^{m-1} e^{-t} dt$  – гамма функція;  $\Omega$  – середнє значення потужності сигналу;

$m = \frac{M^2 [\mu^2]}{D [\mu^2]}$  – параметр, що виражає відношення квадрата початкового моменту другого

порядку величини  $\mu$  (середньої потужності прийнятого сигналу) до дисперсії квадрата цього коефіцієнта передачі (дисперсії миттєвої потужності сигналу).

Для амплітуд комплексних коефіцієнтів передачі каналу на всіх піднесучих виконується така умова нормування:

$$\langle \mu^2 \rangle = \langle \lambda \rangle = \Omega = 1. \quad (9)$$

В [9-11] також були отримані статистичні характеристики пропускної здатності багатопробеневого каналу радіозв'язку з рухомими об'єктами.

### 3. Висновок

Таким чином, використовуючи формули (1-8) та результати [9-11], можна визначити ступінь мобільності ДМ. Даний підхід дозволяє децентралізовані мережі, побудовані на різних організаційно-технічних принципах, порівняти по новому системному критерію мобільності, і який на відміну від відомих, враховує необхідну пропускну здатність і об'єм переданих повідомлень.

### **Література**

1. Rehan M.M. Technical analysis on future challenges and opportunities in live P2P streaming / M.M. Rehan, R.A. Morsi, A. ElNaggar // Proc. of the 2014 International Conference on Engineering and Technology (ICET). – 2014. – P. 1-5.
2. Yi-Cheng Tu. An Analytical Study of Peer-to-Peer Media Streaming Systems / Yi-Cheng Tu, Jianzhong Sun, Mohamed Hefeeda, Sunil Prabhakar // Proc. ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications and Applications. – 2005. – Vol. 1. – № 4. – P. 354-376.
3. Бунин С.Г. Самоорганизующиеся радиосети со сверхширокополосными сигналами: монография / С.Г. Бунин, А.П. Войтер, М.Е. Ильченко, В.А. Романюк. – Київ: НПП «Наукова думка» НАН України, 2012. – 444 с..
4. Рихтер С.Г. Обеспечение мобильного приема на физическом уровне / С.Г. Рихтер // T-Comm. – 2012. – № 10. – С. 93-95.
5. Рихтер С.Г. Оценка скорости абонента в системе Mobile WiMAX / С.Г. Рихтер, А.В. Смирнов // T-Comm. – 2013. – № 9. – С. 123-126.
6. Digital Video Broadcasting (DVB): DVB-H Implementation Quidelines // ETSI TR 102 377. – 2009-06. – V.1.4.1.
7. Розанов Ю.А. Теория вероятностей, случайные процессы и математическая статистика. – Москва : Наука, 1989. – 312 с.
8. Мальцев А.А. Исследование характеристик OFDM систем радиосвязи с адекватным отключением поднесущих / А.А. Мальцев, А.Е. Рубцов // Вестник ННТУ им. Н.И. Лобачевского. – 2007. – № 5. – С.43-49.
9. Сайко В.Г. Исследование помехоустойчивости режимов работы OFDM систем радиосвязи / В.Г. Сайко // Зв'язок. – 2009. – № 4. – С. 51-54.
10. Сайко В.Г. Оцінка впливу глибини завмирань сигналу на завадостійкість OFDM-систем радіозв'язку в умовах багатопроменевого поширення / В.Г. Сайко // Зв'язок. – 2011. – № 1. – С. 29-33.
11. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління : монографія / В.Г. Сайко. – Київ : ПП «Золоті ворота», 2011. – 300 с.

### *Автори статті*

**Сайко Володимир Григорович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (44) 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com.

**Бреславський В'ячеслав Олександрович** – аспірант кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (99) 935 23 92. E-mail: port@ukr.net.

**Грищенко Людмила Миколаївна** – науковий співробітник кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (93) 672 65 40. E-mail: mila\_1956@mail.ru.

**Кравченко Владислав Ігорович** – аспірант кафедри радіотехнологій, Державний університет телекомунікацій, Київ. Тел.: +380 (63) 801 81 16. E-mail: vladislav\_kravchenko@mail.ua.

### *Authors of the article*

**Sayko Volodymyr Hryhorovych** – doctor of sciences (technical), professor, head of radio technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (44) 249 25 04. E-mail: vgsaiko@gmail.com.

**Breslavsky Vyacheslav Oleksandrovych** – postgraduate student of of radio technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (99) 935 23 92. E-mail: port@ukr.net.

**Hryshchenko Lyudmyla Mykolayivna** – research assistant of radio technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (93) 672 65 40. E-mail: mila\_1956@mail.ru.

**Kravchenko Vladyslav Ihorovych** – postgraduate student of of radio technologies department, State University of Telecommunications, Kyiv. Tel.: +380 (63) 801 81 16. E-mail: vladislav\_kravchenko@mail.ua.

Дата надходження в редакцію: 17.02.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. М.М. Климаш