

УДК 621.396.4

**Валуйський С. В.**, к.т.н,  
НТУУ «КПІ»**МЕТОДИКА ОЦІНКИ ЗВ'ЯЗНОСТІ ВУЗЛІВ ЕПІЗОДИЧНИХ  
РАДІОМЕРЕЖ ІЗ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ  
АЕРОПЛАТФОРМАМИ**

*Розроблено методику оцінки зв'язності вузлів епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами, що дозволяє не тільки визначати наявність зв'язності відповідно до заданої достовірності передачі даних, а й прогнозувати її тривалість в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів.*

*Разработана методика оценки связности узлов эпизодических радиосетей с телекоммуникационными аероплатформами, которая позволяет не только определять наличие связности в соответствии с заданной достоверностью передачи данных, но и прогнозировать ее длительность в условиях быстрого и непредсказуемого перемещения мобильных абонентов.*

*Technique for evaluation of ad hoc radio networks nodes connectivity with telecommunications aero platforms was developed, which allows not only to detect the presence of a connection in accordance with a given reliability of data transmission, but also to predict its duration under conditions of rapid and unpredictable movement of mobile subscribers.*

*Вступ.* Актуальним питанням на сьогодні є необхідність оперативної організації зв'язку в районах з відсутньою або зруйнованою мережною інфраструктурою в наслідок надзвичайних ситуацій природного чи техногенного характеру. Це можливо шляхом розгортання епізодичних радіомереж (ЕРМ) із використанням телекомунікаційних аероплатформ (ТА). Особливо актуально застосування ТА на основі мініатюрних безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що є більш дешевими і оперативними на відміну від великих висотних аероплатформ [1]. Такі мережі мають широке коло застосування – рятувальні операції МНС, тактичні мережі військового призначення, дистанційний збір інформації з віддалених сенсорів, зв'язок між транспортними засобами та ін.

Мобільні абоненти (МА) таких мереж можуть вільно переміщуватись в заданому районі та з'єднуватись між собою безпосередньо – у зоні радіо видимості, або із ретрансляцією пакетів через сусідні МА або БПЛА (тобто виконуючи функції маршрутизації), утворюючи таким чином багатоланкові мережі довільної структури (рис. 1). Однак швидке та

непередбачуване переміщення МА в таких мережах призводить до втрати зв'язності між ними, а отже до труднощів при побудові маршруту та передачі даних між ними. В роботі [2] було запропоновано метод управління положенням множини ТА для підвищення структурно-інформаційної зв'язності ЕРМ. Для того, щоб визначити кожне наступне положення ТА у просторі необхідно оперативно оцінити наявність та час існування зв'язності кожної пари МА, що потребує розробки нової методики.

*Аналіз досліджень і публікацій.* В існуючих публікаціях висвітлюються лише деякі відокремлені питання оцінки зв'язності вузлів ЕРМ. В роботах [3, 4] здійснюється оцінка зв'язності МА на основі суто геометричних співвідношень, не прив'язуючись до конкретних тактико-технічних характеристик вузлів радіозв'язку. В роботі [5] досліджується тривалість з'єднання між МА ЕРМ, однак без застосування ТА. Отже існуючі моделі оцінки зв'язності МА ЕРМ потребують додаткового дослідження, удосконалення та систематизації в єдину методику.

*Постановка завдання.* Таким чином метою даної роботи є розробка методики оцінки зв'язності вузлів епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами в умовах швидкого та непередбачуваного переміщення мобільних абонентів.

Для досягнення зазначеної мети поставлені наступні завдання:

1. Визначення максимальної дальності зв'язності пари вузлів ЕРМ.
2. Визначення середнього часу перебування МА в зоні радіо покриття БПЛА та один одного.
3. Систематизація удосконалених моделей та поєднання в єдину обчислювальну процедуру (методику).

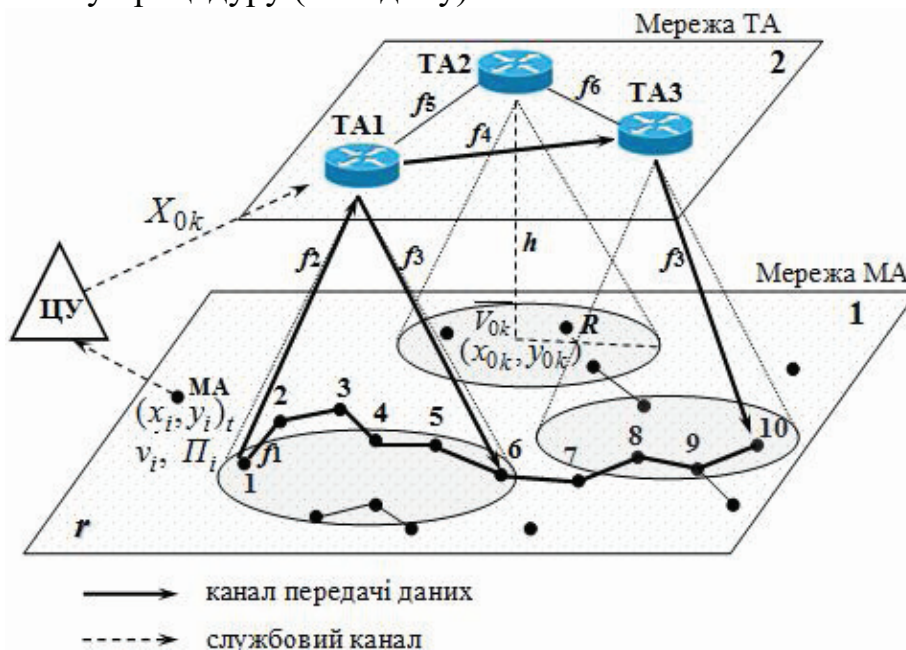


Рис. 1. Приклад архітектури ЕРМ із використанням ТА

**Вихідні дані та обмеження.** Таким чином *вихідними даними* для оцінки зв'язності вузлів ЕРМ є наступні параметри:  $(x_i, y_i)_t, i = \overline{1, N}$ ,  $X_{0k}, k = \overline{1, K}$  – координати МА та виведених БПЛА в момент часу  $t$ ;  $v_i = 2\text{м/с}$  або  $15\text{м/с}$  – середня швидкість переміщення МА (пішоходів або авто);  $h_{\max} = 3000\text{ м}$  – максимальна висота баражування БПЛА;  $r_{\min} = 50\text{ м}$  – мінімальний радіус баражування БПЛА; діапазон частот каналів МА-МА (МА-БПЛА) –  $2,4\text{ГГц}$ , каналів БПЛА-БПЛА –  $5\text{ГГц}$ ; ширина смуги кожного каналу  $\Delta f = 20\text{ МГц}$ ; потужність передавача МА –  $p_i = \text{const}$  (однакова для всіх МА); потужність передавача БПЛА –  $p_k = \text{const}$  (однакова для всіх БПЛА); потужність шуму на вході приймача  $P_{ui} = P_{uk} = 10^{-10}\text{ Вт}$  (однакова для всіх вузлів); коефіцієнт спрямованості бортової антени у напрямку МА –  $3\text{ дБ}$ , усі інші антени – неспрямовані довжина пакету  $L=1024\text{біт}$ ; швидкість передачі  $V=11\text{Мбіт/с}$  (однакова для всіх каналів); модель радіоканалу МА-МА – Релея із незалежними завмираннями, усі інші канали – із адитивним білим гаусовим шумом (АБГШ).

*Обмеження* при оцінці безпосередньої зв'язності вузлів, що входять до складу маршрутів ЕРМ  $M = \{m_{ab}\}$ , можна записати наступним чином:  $\Omega_1: \{d_{ij} \leq d^0, D_{ik} \leq D^0 (R_{ik} \leq R^0), D_{kl} \leq D', T_{зв\ ij} \geq T_{зв}^0 \quad \forall ij, ik, kl \in m_{ab}, i, j = \overline{1, N}, k, l = \overline{1, K}\}$ , де  $d_{ij}, d^0$  – дальність між  $i$ -м та  $j$ -м МА та відповідне обмеження зверху, а  $D_{ik}, D^0$  – похила дальність між  $i$ -м МА та  $k$ -м БПЛА та відповідне обмеження зверху;  $R_{ik}, R^0$  – відстань між  $i$ -м МА та точкою надиру  $k$ -ого БПЛА та відповідно максимальний радіус зони стабільного покриття  $k$ -ого БПЛА;  $D_{kl}, D'$  – дальність між  $k$ -м та  $l$ -м БПЛА та відповідне обмеження зверху;  $T_{зв\ ij}, T_{зв}^0$  – тривалість зв'язності сусідніх вузлів та відповідне обмеження, що визначає мінімальний час протягом якого вузли можуть встановити зв'язок між собою та здійснити передачу мінімальної кількості інформації. Його можна визначити наступним чином:

$$T_{зв}^0 = T_{зб.\inf.} + T_{пош.\рш.}^{\min} + T_{відпр.}^{\max} + T_{експл.}, \quad (1)$$

де  $T_{зб.\inf.}$  – час збору вихідної інформації  $((x_i, y_i)_t, v_i, P_i)$ ;  $T_{пош.\рш.}^{\min}$  – час пошуку рішення (положення ТА) з мінімальним відхиленням від екстремального значення пропускної здатності;  $T_{відпр.}^{\max}$  – максимальний час відпрацювання БПЛА заданого рішення (визначається розмірами району

дислокації МА та максимальною швидкістю переміщення БПЛА);  $T_{експл.}$  – мінімальний час експлуатації маршруту передачі даних у період його відносної стабільності.

Таким чином *необхідно*: оцінити наявність та тривалість структурної зв'язності вузлів ЕРМ, а також можливість застосування того чи іншого методу (системи) управління положенням телекомунікаційних аероплатформ (БПЛА).

### Визначення максимальної дальності та тривалості зв'язності вузлів ЕРМ.

Максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку пари вузлів мережі обмежується, по-перше, енергетикою радіолінії, при якій відношення сигнал-шум в точці прийому не менше визначеної величини для забезпечення заданої ймовірності пакетної помилки (PER) при заданому виді сигнально-кодової конструкції. Використовуючи модуляцію BPSK в поєднанні зі згортковим кодом типу  $133_8, 171_8$  з швидкістю  $1/2$ , отримано наступні залежності PER від максимальної дальності зв'язку для каналів МА-МА (рис. 2а) та каналів МА-ТА (ТА-ТА) (рис. 2б) при різних значеннях потужності передавача.

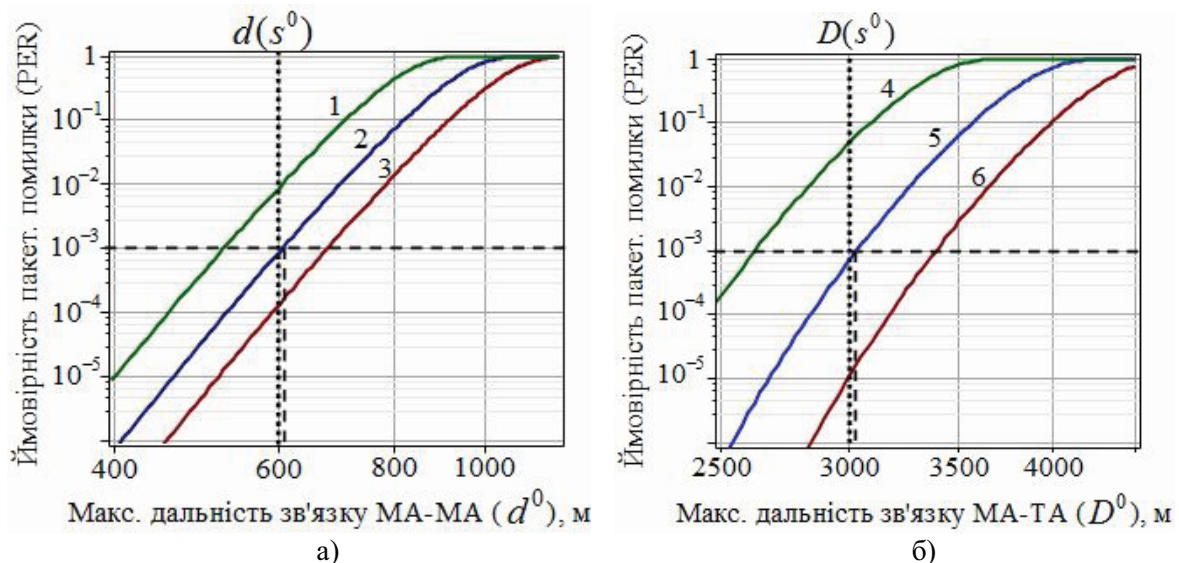


Рис. 2. Залежність PER від максимальної дальності зв'язку МА-МА (а) та МА-ТА (б) при різних значеннях потужності передачі: 1 – 0,6 Вт; 2 – 0,8 Вт; 3 – 1 Вт; 4 – 3 Вт; 5 – 4 Вт; 6 – 5 Вт

По-друге, максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку визначається ефективністю функціонування протоколу множинного доступу (МД) до спільного каналного ресурсу. При збільшенні протяжності радіолінії зростає інтервал уразливості та відповідно кількість колізій при організації МД, а отже зменшується пропускна здатність та зростає затримка передачі в каналі. Тому максимальна дальність зв'язку може визначатися граничним значенням пропускної здатності каналу  $s^0$  при

заданій швидкості передачі  $V$ , розмірі пакету даних  $L$  та інтенсивності трафіку  $G$ . Так при  $s^0 = 0,5$  максимальна протяжність радіолінії МА-МА  $d^0$  має становити не більше 600м для протоколу МД із сигналом «зайнято» (МДСЗ) (показано вертикальною лінією на рис. 2а), МА-ТА  $D^0$  – не більше 3000м для адаптивного протоколу МД з резервуванням (АПР) (показано вертикальною лінією на рис. 2б), а на протяжність радіолінії ТА-ТА не має обмежень (окрім енергетики), оскільки протокол МД, що застосовується в ній, не залежить від нормованого часу розповсюдження пакету.

Таким чином, щоб забезпечити задані вимоги до характеристик протоколів МД, потужність передачі слід обирати таким чином, щоб забезпечити необхідний рівень PER на відстані, що визначається максимальним часом розповсюдження пакету в стільниках мережі. Так для забезпечення рівня PER  $10^{-3}$  на лінії МА-МА протяжністю 600 м потужність передачі має становити близько 0,8 Вт. У свою чергу для забезпечення того ж рівня PER на лінії МА-БПЛА протяжністю 3000 м потужність передачі має становити близько 4 Вт.

Знаючи максимальну похилу дальність радіолінії МА-БПЛА та допустимий кут місця абонентського терміналу, можна визначити максимальний радіус стільника, створюваного телекомунікаційною аероплатформою [6]. Так при куті місця  $60^0-90^0$  у межах щільно забудованого міста він становитиме  $R \leq 1500$ м при висоті БПЛА  $2600 \leq h < 3000$ м. Але враховуючи маневрування БПЛА по колу мінімального радіусу та неточність його виводу, радіус зони стабільного покриття становитиме  $R \leq 1450$ м.

Через свою мобільність абоненти ЕРМ не можуть постійно знаходитись в зоні радіо видимості один одного та зоні покриття БПЛА, отже виникає практичний інтерес розрахунку тривалості зв'язності між ними, протягом якого вони можуть здійснювати інформаційний обмін (побудувати маршрут та передати деяку кількість інформації).

В роботі запропоновано декілька простих математичних моделей переміщення вузлів ЕРМ для дослідження тривалості зв'язності між ними в умовах прямої радіо видимості та з урахуванням ретрансляції. Під *тривалістю зв'язності*  $T_{36\ ij}$  пари вузлів (МА-МА або МА-БПЛА) будемо розуміти час досягнення одного вузла границі зони взаємної радіо видимості з іншим вузлом (наприклад, час досягнення точки  $B$  границі кола радіусу  $R$  з центром в точці  $A$ , як показано на рис. 3). Застосовуючи апарат тригонометрії матимемо:

$$T_{36} = \frac{AB \cos \varphi + \sqrt{R^2 - AB^2 \sin^2 \varphi}}{v} \quad (2),$$

де  $v$  – швидкість переміщення вузла  $B$ , м/с;  $\varphi$  – кут напрямку переміщення.

Таким чином тривалість зв'язності прямо пропорційна радіусу зони покриття та обернено пропорційна швидкості переміщення вузлів. На

величину тривалості зв'язності також впливає характер мобільності вузлів. Було виконано моделювання переміщення вузлів за 4-ма сценаріями, що, наприклад, описують рух пошукової бригади під час рятувальної операції (рис. 3): 1) «марш» ( $\varphi = const, v = const$ ); 2) «різнобій» ( $\varphi = const, v = const$ ); 3) «випадкове блукання полем» ( $\varphi = random, v = const, l = const$ ); 4) «випадкове блукання містом» ( $l = const, v = const, \varphi = random\{0^0, 90^0, 180^0, 270^0\}$ ).

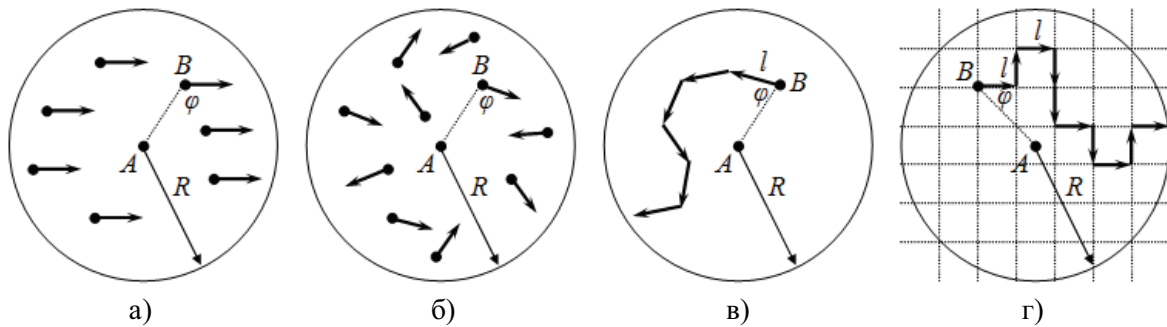


Рис. 3. Траєкторії руху вузлів ЕРМ в залежності від сценарію мобільності: а – «марш», б – «різнобій», в – «випадкове блукання полем», г - «випадкове блукання містом»

Згідно результатів моделювання (рис. 4) найбільші значення тривалості зв'язності відповідають третьому сценарію, а найменші – другому (при фіксованому радіусі зони покриття  $R$  та швидкості переміщення вузлів  $v$ ). Так середня тривалість зв'язності з'єднання «БПЛА-пішохід» на випадок «різнобою» становитиме порядку 36 хв, а з'єднання «БПЛА-автомобіль» порядку 5 хв. Отримані результати можуть бути використанні при розробці методу підвищення пропускної здатності ЕРМ з управлінням положенням телекомунікаційних аероплатформ (детально розглядається у [2]), а саме визначати частоту зміни положення БПЛА.

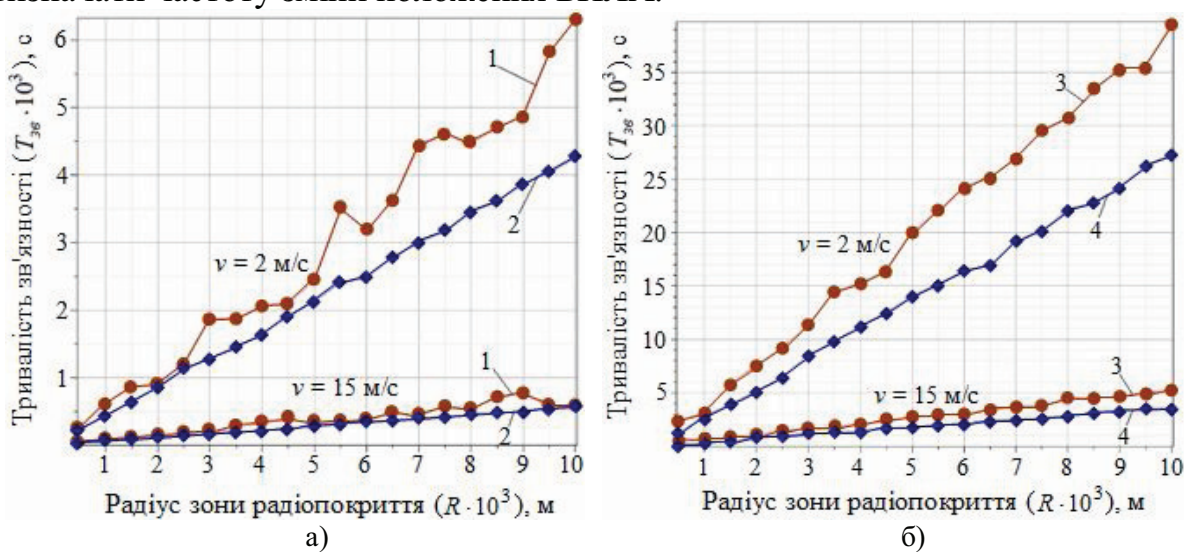


Рис. 4. Залежність середнього часу досягнення МА границі зони покриття від її радіусу при різних швидкостях та сценаріях переміщення: 1 – «марш» (а), 2 – «різнобій» (а), 3 – «випадкове блукання полем» (б), 4 – «випадкове блукання містом» (б)

**Методика оцінки зв'язності вузлів ЕРМ із ТА.** Таким чином методика оцінки зв'язності вузлів ЕРМ із ТА буде мати наступні кроки:

*Крок 1.* Прогнозування середньої тривалості зв'язності  $T_{зв\ ij}$  вузлів ЕРМ на основі моделей переміщення МА, що розглядалися вище.

*Крок 2.* Перевірка можливості відпрацювання БПЛА заданої цілі управління при заданій динаміці топології мережі (тривалості зв'язності), що визначається умовою  $T_{зв\ ij} > T_{зв\ ij}^0$ . Якщо умова виконується, тоді застосування методу управління положенням БПЛА [2] можливе, крім того є можливість збільшити множину можливих рішень ( $T_{нов.реш.}$ ) для досягнення більшої точності, інакше – застосування методу не можливе.

*Крок 3.* Розрахунок дальності зв'язку від кожного МА до найближчого сусіда та центру зони покриття БПЛА.

*Крок 4.* Перевірка умов  $\Omega_1$  для кожного МА та перевірка цілісності мережі. Під цілістістю мережі розуміється наявність лише одної компоненти зв'язності графу мережі. Перевірка цілісності мережі можливо шляхом побудови мінімального кістякового дерева (МКД) графу (наприклад, згідно алгоритму Пріма [7]) та перевірка кожного ребра дерева на виконання умови  $\Omega_1$ . Якщо умови  $\Omega_1$  виконуються, то мережа є структурно зв'язаною на момент часу  $t$ , інакше – необхідне певне управлінське рішення (наприклад, вивід (переміщення) БПЛА) згідно методу [2].

*Висновки.* В роботі було показано, що максимальна дальність безпосереднього радіозв'язку пари вузлів епізодичної радіомережі обмежується, по-перше, енергетикою радіолінії, що забезпечує задану ймовірність пакетної помилки (PER), по-друге, ефективністю функціонування протоколу МД до спільного каналного ресурсу. Для забезпечення заданої дальності зв'язку були отримані тактико-технічні характеристики прийомо-передавального обладнання вузлів мережі.

Також на основі простих моделей було досліджено тривалість зв'язності мобільних абонентів в залежності від різних сценаріїв переміщення. Отримані результати моделювання дозволяють визначати середній час перебування мобільних абонентів в зоні радіо покриття телекомунікаційних аероплатформ та визначати частоту зміни положення БПЛА у просторі.

Таким чином, запропонована методика оцінки зв'язності вузлів епізодичних радіомереж із телекомунікаційними аероплатформами дозволяє не тільки оцінювати наявність зв'язності відповідно до заданої достовірності, а й прогнозувати її тривалість в умовах швидкої та непередбачуваної зміни положення мобільних абонентів.

*Використані джерела інформації:*

1. Ильченко М. Е., Кравчук С. А. Телекоммуникационные системы на основе высотных аероплатформ. – К.: Наук. думка, 2008. – 580 с.

2. Лисенко О. І. Метод управління топологією мережі повітряних ретрансляторів для підвищення структурно-інформаційної зв'язності безпроводових епізодичних мереж / О. І. Лисенко, С. В. Валуйський // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2011. – № 1. – С. 117 – 126.
3. Han Z. Smart deployment/movement of unmanned air vehicle to improve connectivity in MANET / Z. Han, A. L. Swindlehurst, K. J. R. Liu // IEEE Wireless Communications and Networking : conference, April 3-6 2006 : proceedings. – Las Vegas, 2006. – P. 252–257.
4. Міночкін А. І. Задачі управління топологією мережі безпілотних літальних апаратів мобільного компоненту мереж зв'язку військового призначення / А. І. Міночкін, В. А. Романюк // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ «КПІ». – 2005. – № 2. – С. 83–90.
5. Бахтин А. А. Разработка методов управления связностью и обеспечения качества обслуживания в мобильной эпизодической сети с ретрансляцией: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук : спец. 05.12.13 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций» / А. А. Батхин. – М., 2009. – 27 с.
6. Лисенко О. І. Вплив нестабільності положення повітряних ретрансляторів на формування зони обслуговування / О. І. Лисенко, С. В. Валуйський // Науковий вісник Академії муніципального управління. Збірник наукових праць. Серія «Техніка». – 2011. – Вип.4. – С. 90 – 100.
7. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / За загальною ред. В. В. Поповського. – Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. – 564 с.  
С. В. Валуйський