

## ВПЛИВ СТУПЕНЯ ЗВ'ЯЗНОСТІ РЕЗЕРВНИХ ШЛЯХІВ НА НАДІЙНІСТЬ БАГАТОШЛЯХОВОЇ МАРШРУТИЗАЦІЇ В MANET-МЕРЕЖАХ

У роботі проведено аналіз ефективності багатошляхової маршрутизації в MANET-мережах. Більшість протоколів маршрутизації в мобільних мережах у зв'язку із можливою високодинамічною зміною топології використовують реактивні методи. В реактивних протоколах вузлом-джерелом під час процедури розрахунку маршруту, може бути визначено декілька резервних шляхів до вузла-адресата. В таких випадках, багатошляхову маршрутизацію може бути використано для зменшення затримки при відновленні процесу передачі даних після виходу із ладу елементів мережі за рахунок використання резервних шляхів шляхом перемиканням поточного трафіка на інші альтернативні шляхи.

Досліджено вплив ступеня зв'язності резервних шляхів на надійність з'єднання. Доведено, що ефективним рішенням при багатошляховій маршрутизації є використання Low Coupling (слабкопов'язаних) шляхів, що дозволяє у порівнянні з одношляховою маршрутизацією для ненадійних з'єднань отримати приріст в ймовірності передачі даних до 20%.

The paper analyzes the effectiveness multipath routing in MANETs. Most routing protocols in mobile networks due to the topology change high dynamic possible using reactive methods. In reactive protocols, a source node during route calculation procedure can be defined several ways to backup node addressed. In such cases, multipath routing can be used to reduce the delay in the recovery process data after a system network elements through the use of backup paths by switching this traffic to other alternative routes.

The influence degree of connectivity backup paths for reliable connection. It is proved that an effective solution for multipath routing is the use of low coupling (LowCoup) tract, which allows for comparison with singlepath routing for unreliable connections to get a boost in the probability of data transmission up to 20%.

### Постановка проблеми

Мобільні ad-hoc мережі (MANET) – вид безпроводових ad-hoc мереж із довільною структурою, що складається із мобільних маршрутизаторів (і прилеглих хостів), з'єднаних безпроводовими каналами зв'язку. Маршрутизатори можуть вільно пересуватись у будь-якому напрямку і організовуватись довільно, тому топологія безпроводової мережі може змінюватись швидко і непередбачено.

Особливостями організації MANET є те, що кожен вузол є потенційним маршрутизатором; на відміну від проводових мереж із статичною топологією, топологія MANET мережі має набагато більше надмірних з'єднань і є динамічно змінюваною; характеристики каналів (пропускна здатність, частота появи помилок тощо) є асиметричними і залежать від напрямку передачі.

Однією із центральних проблем MANET мереж залишається проблема оптимального використання мережних ресурсів. Шляхи її вирішення лежать у напрямку використання засобів і механізмів багатошляхової маршрутизації та розподілу трафіку [ 1, 2 ].

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Більшість протоколів маршрутизації, що було запропоновано для ad hoc мереж є одношляховими, що використовують лише один маршрут передачі даних між вузлом-джерелом і вузлом-адресатом.

Питанням використання протоколів багатошляхової маршрутизації та розподілу трафіку у ad hoc мережах присвячений ряд робіт.

У роботі, що присвячено управлінню потоками в мережах [3] під фіксованою маршрутизацією розуміють використання єдиного шляху доставки повідомлень. Альтернативна маршрутизація (багатошляхова) передбачає наявність декількох шляхів. При фіксованій маршрутизації затримки при передачі даних мають менші значення у порівнянні із альтернативною маршрутизацією. Проте, переваги фіксованої маршрутизації в мережі зникають, якщо її структура не оптимальна за критерієм зв'язності або якщо топологія мережі змінюється так швидко, що алгоритми альтернативної маршрутизації не справляються з регулюванням потоків у зв'язку із більшими затримками в мережі.

В роботі [ 4 ] розглянуто можливість застосування протоколу маршрутизації OLSR у багато-

хопових ad-hoc мережах в умовах відносної стаціонарності вузлів. Визначено вплив швидкості пересування вузлів на характеристики мережі.

В роботі [5] вирішується задача маршрутизації і планування використання ліній радіозв'язку для мереж пакетної передачі даних за допомогою методу нейронної мережі. Проте, автором зауважено, що при еволюції мережі гарантується тільки локальний мінімум цільової функції.

В [6] досліджено статичний протокол маршрутизації, що не перенаправляє потоки у разі несправних шляхів. Показано, що у випадку короткотермінової відмови вузла або з'єднання, ремаршрутизація не є необхідною при наявності декількох шляхів. Якщо відмови з'єднань, що виникають у реальних мережах, не відновлюються протягом певного часу, ремаршрутизація є вкрай необхідною. У результаті виникнення відмов погіршується ефективність «маршрутизації без пам'яті», тому що у ациклічного графа, повинен бути, принаймні, один вузол з єдиним маршрутом до місця призначення.

В [7] показано, що вартість утримання двох незалежних шляхів при маршрутизації від джерела в реактивному протоколі SMR, вища, ніж побудова двох шляхів, за припущенням, що вони існують поки не вийдуть обидва із ладу.

Тому, час необхідний для встановлення нових маршрутів після виявлення відмов, може бути зменшений за рахунок більшої надмірності з'єднань між джерелом і адресатом, що притаманно MANET мережам.

У роботі [8], розрізняють декілька типів багатошляхових маршрутів за ступенем зв'язності:

1) незалежні (непов'язані) шляхи, що не перетинаються (не мають ні загальних транзитних вузлів, ні загальних транзитних ребер, крім початкового (джерела) і кінцевого (адресата) вузлів);

2) LoCouр-залежні (Low Coupling, слабкопов'язані) шляхи, що не мають загальних ребер, але можуть мати загальні транзитні вузли;

3) зоннозалежні шляхи, що мають загальні транзитні ребра в межах деякої зони (числа хопів).

**Метою** роботи є підвищення надійності багатошляхового маршруту.

### Формулювання завдання дослідження

Більшість протоколів багатошляхової маршрутизації вирішують три основні задачі: створення маршруту, обслуговування маршру-

ту і розподілення трафіку [9, 10]. У роботі оцінюється процедура формування багатошляхового маршруту.

Для використання багатошляхової маршрутизації необхідною умовою є наявність декількох альтернативних шляхів, а не лише одного оптимального. Крім того, багатошляхова маршрутизація є прийнятною при відсутності надмірних накладних витрат на управління і обслуговування таких маршрутів.

Тому, при постановці завдання будемо вважати, що такі умови, як наявність альтернативних шляхів і прийнятність їх обслуговування виконані.

У відповідності до цього задача досліджень формулюється наступним чином.

Нехай MANET мережа задана графом  $G(V, E, d(e))$ , де:  $V$  – множина вузлів графа;  $E$  – множина ребер графа,  $d(e)$  – вага шляху (сума ваг ребер даного шляху) від початкового вузла  $v_s$  до вузла кінцевого  $v_d$ ;  $w(v_s, v_d)$  – вага ребра між  $v_s$ -м і  $v_d$ -м вузлами.

Для графа  $G$  визначено множину можливих маршрутів  $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_N\}$  між  $v_s, v_d$ .

Необхідно: з множини  $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_N\}$  сформувати множини з незалежними і LowCouр-залежними і зоннозалежними шляхами одного маршруту і оцінити ефективність їх використання для багатошляхової маршрутизації.

Кожна із множин шляхів трьох типів (незалежні, LoCouр-залежені, зоннозалежні) містить не більше  $k$  альтернативних шляхів.

### Виклад основного матеріалу

Із загальної універсальної множини шляхів маршруту  $\Pi = \{\pi_1, \dots, \pi_N\}$  сформуємо:

1) множину  $\Pi_{disj}^{s,d} \in \Pi$ , що складається із  $k$ -альтернативних незалежних шляхів  $\pi_i$  між вузлом-джерелом  $v_s$  і вузлом-адресатом  $v_d$ :

$$\Pi_{disj}^{s,d} = \{\pi_i(V, E, d(e))\}, \quad (1)$$

$$\pi_i = \{(V_s, \{\bar{V} \pi_i\}, V_d), \bar{E} \pi_i, d_{\pi_i}(e)\}$$

де  $i, j = \overline{1, k}$ ,  $i \neq j$ ;  $\bar{V} \pi_i$ ,  $\bar{E} \pi_i$ ,  $d_{\pi_i}(e)$  – вектор транзитних вузлів, ребер і вартість шляху  $\pi_i$  потужністю  $l-2$ ,  $l$  – кількість вузлів в маршруті, відповідно.

Незалежні шляхи маршруту повинні задовольняти умові:

$$\forall \pi_i : \begin{cases} \overline{V_{\pi_i}} \cap \overline{V_{\pi_j}} / \{v_s, v_d\} = O; \\ \overline{E_{\pi_i}} \cap \overline{E_{\pi_j}} = O; \\ d_{\pi_i}(e) = \min_{1 \leq i \leq k} (d(\Pi_{disj}^{s,d})). \end{cases} \quad (2)$$

2) множину LoCoop-залежних шляхів із можливими загальними транзитними вузлами  $\Pi_{mesh}^v \in \Pi$ , що задовольняє умові:

$$\forall \pi_i \in \Pi_{mesh}^v : \begin{cases} (\overline{V_{\pi_i}} \cap \overline{V_{\pi_j}}) / \{v_s, v_d\} \neq O; \\ \overline{E_{\pi_i}} \cap \overline{E_{\pi_j}} = O; \\ d_{\pi_i}(e) = \min_{1 \leq i \leq k} (d(\Pi_{disj}^{s,d})). \end{cases} \quad (3)$$

3) множину зоннозалежних шляхів із можливими загальними транзитними вузлами і транзитними ребрами  $\Pi_{mesh}^{v,e} \in \Pi$ , що задовольняє умові:

$$\forall \pi_i \in \Pi_{mesh}^{v,e} : \begin{cases} (\overline{V_{\pi_i}} \cap \overline{V_{\pi_j}}) / \{v_s, v_d\} \neq O; \\ \overline{E_{\pi_i}} \cap \overline{E_{\pi_j}} \neq O; \\ d_{\pi_i}(e) = \min_{1 \leq i \leq k} (d(\Pi_{disj}^{s,d})). \end{cases} \quad (3)$$

Ефективність використання  $\Pi_{disj}^{s,d}$ ,  $\Pi_{mesh}^v$  і  $\Pi_{mesh}^{v,e}$  для багатошляхової маршрутизації оцінюємо за значенням полінома надійності [8].

При формалізації поняття полінома надійності, скористаємось визначеннями алгебри логіки: для множини мінімальних шляхів  $\Pi_{disj}^{s,d}$  уведемо подію  $E_i$ , що всі ребра шляху  $\pi_i$ , між  $v_s$  і  $v_d$  працездатні. Події  $\{E_i\}$  не є незалежними.

Нехай  $\overline{E}_i$  – доповнення події  $E_i$ . Тоді визначимо подію  $D_1 = E_1$ , у цілому:

$$D_i = \overline{E}_1 \cap \overline{E}_2 \cap \dots \cap \overline{E}_{i-1} \cap E_i. \quad (4)$$

Події  $D_i$  є незалежними і часто називаються подіями «незалежного добутку». У такому випадку надійність багатошляхового маршруту мережі розраховується, як:

$$P^{s,d}(G) = \sum_{i=1}^k P[D_i]. \quad (5)$$

Проаналізуємо надійність багатошляхового маршруту, що складається із LoCoop-залежних шляхів. Для цього використаємо вираз включення/виключення:

$$\sum_{j=1}^k (-1)^{j+1} \sum_{i \subseteq \{1, \dots, k\}} P(E_i) \quad (6)$$

де  $E_i$  - подія, що всі шляхи  $\forall \pi_i \in \Pi_{mesh}^{v,e}$  при  $i \in \overline{1, k}$  формуються не триваліше ніж  $t$ .

Приклад. Нехай задано мережу, що подано графом (рис. 1).

Визначимо ефективність використання багатошляхової маршрутизації ( $k=3$ ) для задачі даних між вузлом-джерелом  $v_s = 1$  і вузлом-адресатом  $v_d = 8$  відповідно до (1-3).

Множину незалежних шляхів багатошляхового маршруту  $\Pi_{disj}^{1,8} = \{\pi_1, \pi_2, \pi_3\}$  наведено на рис. 1а-1в. До неї включено три шляхи:

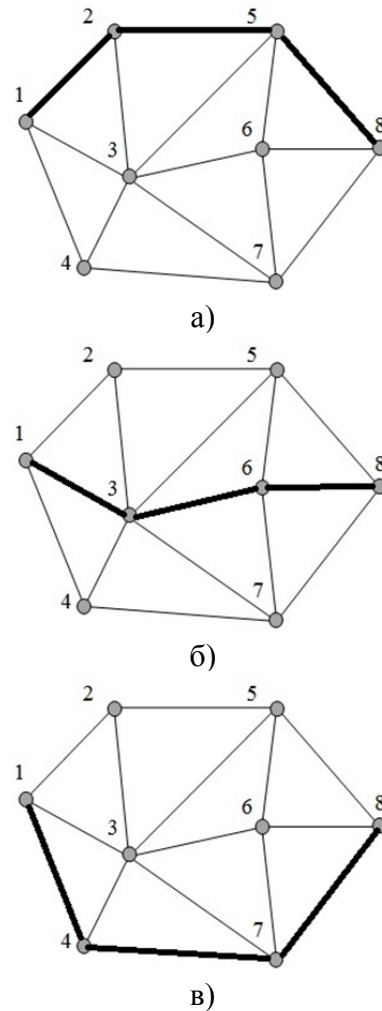


Рис. 1. Незалежні шляхи багатошляхового маршруту: а) -  $\pi_1 = \{1,2,5,8\}$ ; б) -  $\pi_2 = \{1,3,6,8\}$ ; в) -  $\pi_3 = \{1,4,7,8\}$

Для спрощення розрахунків введемо обмеження, що всі ребра графа рівнонадійні, тобто ймовірність функціонування кожного хопа однокова і дорівнює  $p$ .

Визначимо надійність кожного шляху, використавши метод включення / виключення (4-5). Шляхи  $\pi_1, \pi_2, \pi_3$  складаються із трьох хопів і надійність кожного дорівнює  $p^3$ . Поліном надійності багатопляхового маршруту (1), що складається із трьох незалежних шляхів:

$$P_{disj}^{1,8}(G, p) = 3p^3 - p^6 - p^9.$$

2. Визначимо надійність багатопляхової маршрутизації, що складається із LoCoop-залежних шляхів із можливими спільними транзитними вузлами (2). Множину  $\Pi_{mesh}^{v,e} \in \Pi$  буде сформовано із шляхів:  $\Pi_{mesh}^{v,e} = \{\pi_2, \pi_4, \pi_5\}$ .

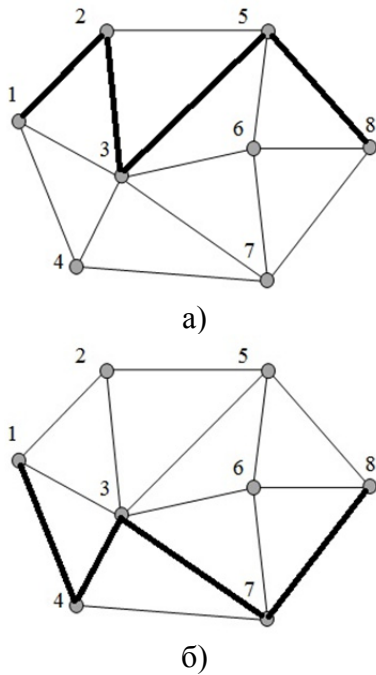


Рис. 2. LoCoop-залежні шляхи багатопляхового маршруту із спільним вузлом  
а) -  $\pi_4 = \{1, 2, 3, 5, 8\}$ ; б) -  $\pi_5 = \{1, 4, 3, 7, 8\}$

Граф мережі багатопляхового маршруту з LoCoop-залежними шляхами може бути поданий у вигляді (рис. 3):

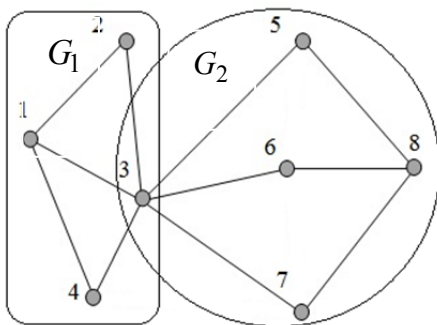


Рис. 3. LoCoop-залежні шляхи багатопляхового маршруту із спільним вузлом  $v_3$

Поліном надійності маршруту  $\Pi_{mesh}^{1,8}$  для такої мережі розраховується як надійність послідовного з'єднання двох сегментів  $G_1$  і  $G_2$ , що обумовлюють передачу даних маршрутом з  $v_1$  у  $v_3$  і далі з  $v_3$  у  $v_8$ . Аналіз сегментів свідчить, що передачу даних з  $v_1$  у  $v_3$ , з  $v_3$  у  $v_8$  можна реалізувати незалежними шляхами відповідних багатопляхових маршрутів  $P_{disj}^{1,3}(G_1, p)$  і  $P_{disj}^{3,8}(G_2, p)$ . Тоді  $P_{mesh}^3(G, p)$  буде розраховано як:

$$P_{mesh}^3(G, p) = P_{disj}^{1,3}(G_1, p) \cdot P_{disj}^{3,8}(G_2, p),$$

$$\text{де } P_{disj}^{1,3}(G_1, p) = p + 2p^2 - 2p^3 - p^4 + p^5;$$

$$P_{disj}^{3,8}(G_2, p) = 3p^2 - 5p^4 + p^6.$$

3. Для тієї ж мережі визначимо поліном надійності багатопляхового маршруту, що складається із зоннозалежних шляхів із можливими спільними транзитними ребрами.

В даному прикладі обмежимось шляхами без петель, що складаються не більш ніж із трьох хопів; відповідно до (3), резервні шляхи не повинні мати з основними незалежними шляхами більш одного спільного ребра.

Множина трьох-хопових шляхів багатопляхового маршруту  $\Pi_{mesh}^{1,8}$ , за умови  $\Pi_{disj}^v \in \Pi_{mesh}^{1,8}$ , додатково буде складатись із двох резервних шляхів (рис. 4).

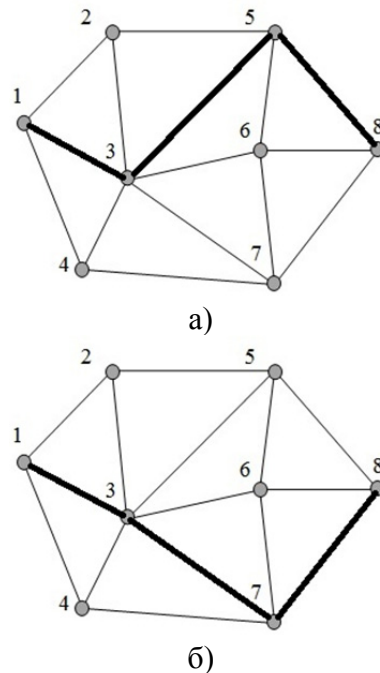
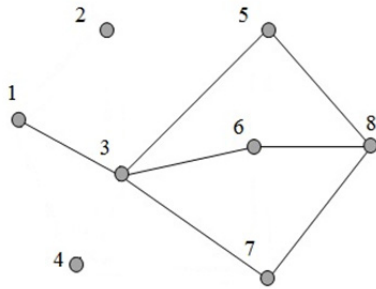


Рис. 4. LoCoop-залежні шляхи багатопляхового маршруту із спільним ребром  $e_{1-3}$ :  
а) -  $\pi_6 = \{1, 3, 5, 8\}$ ; б) -  $\pi_7 = \{1, 3, 7, 8\}$

У знайдених шляхів існує загальне ребро  $e_{1-3}$ . Для такого випадку поліном надійності необхідно розрахувати як для графа мережі, що подано на рис. 5. Маршрут можна представити як послідовне з'єднання двох сегментів: ребра  $e_{1-3}$  і сегмента, що можна представити як паралельне з'єднання ребер  $(e_{3-5}, e_{5-8})$ ,  $(e_{3-6}, e_{6-8})$ ,  $(e_{3-7}, e_{7-8})$ .

Граф мережі багатошляхового маршруту із зоннозалежним шляхами поданий на рис. 5.



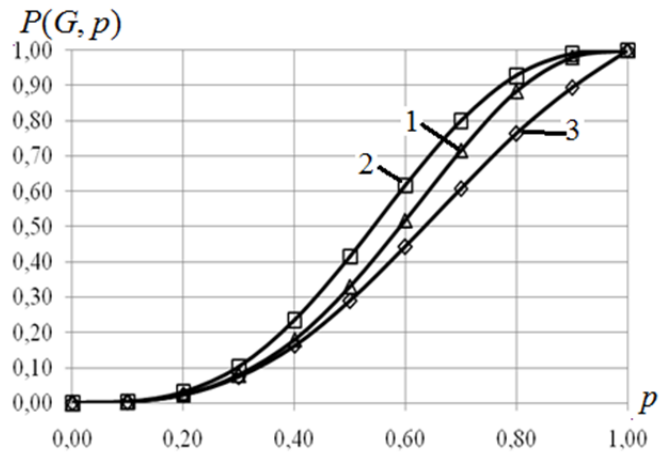
**Рис. 5. LoCoop-залежні шляхи багатошляхового маршруту із спільним ребром  $e_{1-3}$**

Поліном надійності наступний:

$$P_{mesh}^{e_{1-3}}(G, p) = P(\pi\{1,3\}) \cdot P_{disj}^{3,8}(G_2, p) = p(3p^2 - 3p^4 + p^6)$$

На рис. 6 показано залежність надійності багатошляхового маршруту  $P(G, p)$  від ймовірності функціонування типового з'єднання  $p$ . Результати отримані за умови абсолютно надійних вузлів.

Переваги використання LoCoop-залежних шляхів у багатошляховій маршрутизації обумовлені більшою кількістю варіантів побудови маршруту (ступінь полінома надійності).



**Рис. 6. Залежність надійності багатошляхового маршруту  $P(G, p)$  від надійності  $p$  для шляхів: 1) – незалежних; 2) – LoCoop-залежних; 3) – зоннозалежних.**

### Висновки

Реактивні протоколи, що використовуються у високодинамічних MANET мережах, дозволяють під час процедури розрахунку маршруту вузлом-джерелом визначити декілька резервних шляхів до вузла-адресата.

Вид зв'язності резервних шляхів має прямий вплив на надійність маршруту. Використання незалежних шляхів має кращі показники надійності ніж використання зоннозалежних. Проте, незалежні шляхи для мережі з інтенсивним трафіком явище рідке, а одночасне їх утримання у монопольному доступі неефективно для багатопродуктових потоків.

Більш доцільним є використання LoCoop-залежних шляхів, що одночасно знімає обмеження обслуговування шляхів і збільшує надійність багатошляхового маршруту за рахунок значно більшої їх кількості у порівнянні із кількістю незалежних шляхів.

### Список літератури

1. Вишневський В. М., Ляхов А. И., Портной С. Л., Шахнович И. В. Широкополосные беспроводные сети передачи информации. / В. М. Вишневський, А. И. Ляхов, С. Л. Портной, И. В. Шахнович // – М.: Техносфера, 2005. – 592 с.
2. Кульгин М. Технологии корпоративных сетей / М. Кульгин. – СПб.: Питер, 2000. – 704с.
3. Хелебі С. Принципы маршрутизации в Internet, 2-е издание.: пер. с англ. / С. Хелебі, Д. Мак –Ферсон // М.: Издательский дом "Вильямс", 2001. — 448 с.
4. Алексеева Я. А. Аналіз алгоритмів маршрутизації в ad-hoc мережах // Електроніка і зв'язь. Тематический выпуск «Проблеми електроніки» / Я. А. Алексеева, М. Ю. Терновой // ч. 2. – 2008. – С. 204-207.
5. Сонькин М.А. Информационная технология интеграции компонентов многоуровневых систем с пакетной передачей данных / М.А. Сонькин, Е.Е. Слядников // Изв. ТПУ. – 2006. – Т. 309, № 6. – С. 93–101.

6. Гринберг Я. Р. Применение метода агрегации данных в задаче нахождения узлов с дополнительной функциональностью / Я. Р. Гринберг, И. И. Курочкин, А. В. Корх, Р. М. Алыгулиев, М. А. Гашимов // Информационные технологии и вычислительные системы [Электронный журнал]. – 2013. – №2.– стр. 27-39. Режим доступа к журн.: <http://www.jitcs.ru>.
7. S.-J. Lee, M. Gerla. "Split multipath routing with maximally disjoint paths in ad hoc networks". IEEE International Conference on In Communications, Vol. 10, 07 August 2002, pp. 3201-3205.
8. Marc Mosko, J.J. Garcia-Luna-Aceves. Multipath Routing in Wireless Mesh Networks. irst IEEE Workshop on Wireless Mesh Networks, IEEE WiMesh 2005, Held in conjunction with IEEE SECON 2005, 26 September 2005, Santa Clara, California USA, pp.64-70.
9. C. Fonseca, J.Mocito, L. Rodrigues. Low-Coupling Cluster-based Multipath Routing for Wireless Network., 20<sup>th</sup> ICCCN, Maui, Hawaii, July, 2011. p. 216.
10. Кулаков Ю.А. Многопутевая маршрутизация в mesh сетях с использованием резервных слабосвязанных путей. / Ю.А. Кулаков, В.В. Воротников // Информационные технологии моделирования и управления: науч.-теорет. журн. – Воронеж: Научная книга – 2014. – №1(85). – С. 68-77.