

УДК 621.391

**Максимов В. В.**, канд. техн. наук, доцент (Тел. +380 68 810 40 47. E-mail: maksimov46@ukr.net)

**Панасюк М. С.**, магістрант (Тел. +380 97 288 37 29. E-mail: panasyukkolay@gmail.com)

(Національний технічний університет України «КПІ», Інститут телекомунікаційних систем, м. Київ)

## АНАЛІЗ ВЕРХНЬОЇ МЕЖІ КІЛЬКОСТІ ВУЗЛІВ-РЕТРАНСЛЯТОРІВ У ПРОТОКОЛІ OLSR

**Максимов В. В., Панасюк М. С. Аналіз верхньої межі кількості вузлів-ретрансляторів у протоколі OLSR.** В роботі показано відповідність аналітичних виразів для розрахунку верхньої межі MPR вузлів до результатів, що були отримані за допомогою моделювання в програмному пакеті NS-2. Наведені випадки, коли аналітичні вирази дають хибні результати. Для даних випадків доведено, що незалежно від щільності мережі кожен двоскачковий вузол, який знаходиться на межі кола  $2R$ , вимагає свого MPR вузла. Визначена ймовірність розташування двоскачкових вузлів на межі кола радіуса  $2R$ .

**Ключові слова:** ad hoc мережа, OLSR протокол, багато точковий ретранслятор, кількість службової інформації, моделювання, NS-2

**Максимов В. В., Панасюк М. С. Анализ верхней границы количества узлов-ретрансляторов в протоколе OLSR.** В работе показано соответствие аналитических выражений для расчета верхней границы MPR узлов к результатам, которые были получены с помощью моделирования в программном пакете NS-2. Приведены случаи, когда аналитические выражения дают ложные результаты. Для данных случаев доказано, что независимо от плотности сети каждый двухскачковый узел, который находится на границе окружности  $2R$ , требует своего MPR узла. Определена вероятность расположения двухскачковых узлов на границе окружности радиуса  $2R$ .

**Ключевые слова:** ad hoc сеть, OLSR протокол, много точечный ретранслятор, количество служебной информации, моделирование NS-2

**Maksimov V. V., Panasyuk M. S. The upper limit analysis of the nodes-repeaters amount in the OLSR protocol.** This article shows the correspondence analytical expressions for calculating the upper limit of MPR nodes that appear in the literature, the results that have been obtained by modeling in the software package Network Simulator 2. Demonstrated cases where analytical expressions give false results, and the boundaries of their use. For these cases, it is proved that regardless of the network density, each double-hop node located within the  $2R$  circumference boundaries, demands its own MPR node. The probability of double-hop nodes location within the  $2R$  circumference boundaries is defined.

**Ключові слова:** ad hoc network, OLSR protocol, MultiPoint Relay, service information amount, modeling, NS-2

**Постановка задачі.** MANET (англ. *Mobile Ad hoc Network*) – безпроводові децентралізовані самоорганізовані мережі з мобільних пристроїв. Кожен такий пристрій може незалежно пересуватися в будь-яких напрямках, і, як наслідок, часто розривати і встановлювати з'єднання з сусідами, спілкуватися один з одним без втручання централізованих точок доступу або базових станцій, тому кожен вузол діє і як маршрутизатор, і як кінцевий користувач.

Враховуючи, що топологія в таких мережах є надзвичайно динамічною, традиційні протоколи маршрутизації в них не можуть використовуватися. Таким чином, для Ad Hoc мереж ставляться більш жорсткі вимоги з метою забезпечення безпеки, стійкості та ефективності їх роботи.

На даний момент існує велика кількість методів і протоколів маршрутизації, основні з яких класифікують таким чином [1]:

1. проактивні (FSR, FSLs, OLSR, TBRPF);
2. реактивні (AODV, DSR);
3. ієрархічні (HSR, CGSR, ZRP);
4. географічні (GeoCast, LAR, DREAM, GPSR).

В даній роботі дослідження проводилось над протоколом Link State Routing Protocol (OLSR), що був розроблений для мереж ad hoc спеціально як проактивний протокол і який заснований на понятті багатоточкової ретрансляції MPR (MultiPoint Relay) [2, 3]. Воно означає, що кожен вузол мережі  $m$  вибирає декілька вузлів з числа своїх сусідів (вузлів, з якими у нього встановлено з'єднання). У підсумку в мережі формується набір вузлів MPR( $m$ ).

Набір формується так, що всі вузли, що знаходяться в сфері з радіусом 2 кроки від вузла  $m$  (сусіди сусідів), мають симетричні канали з  $MPR(m)$ . Тобто вузли  $MPR$  пов'язані з усіма вузлами в сфері з радіусом 2 кроки.

$MPR$  вибирають кожен раз, коли виявляється зміна в сфері з радіусом 1 або 2. Кожен вузол мережі зберігає свою таблицю маршрутизації, яку формує на підставі інформації про топологію мережі. Вона поширюється по всій мережі за допомогою службових пакетів вибору маршруту Topology Control (TC). Причому тільки  $MPR$ -вузли беруть участь у пересиланні TC-пакетів, інші вузли приймають і обробляють такі пакети, але не пересилають їх далі.

Для кожного  $MPR$  формується список сусідніх вузлів, що вибрали його в якості  $MPR$ , – список  $MPR$  Selectors ( $MPRS$ ). Інформація про  $MPRS$  передається в спеціальних HELLO-пакетах, які передаються тільки між двома сусідніми вузлами. У мережу (у TC-пакетах) передається тільки інформація про стан з'єднань між  $MPR$  і його  $MPRS$ s. Даний механізм дозволяє істотно знизити число передач службових пакетів в порівнянні з лавинною розсилкою.

З сказаного випливає, що кількість службової інформації, яка передається разом з корисним трафіком, в протоколі OLSR на пряму залежить від кількості  $MPR$  вузлів.

Нижче наведена теорема [3, 4], що дозволяє визначити верхню межу  $D_N$  кількості  $MPR$  вузлів для мережі.

**Теорема 1.** Коли  $L$  фіксовано та  $N$  росте, то верхня межа кількості  $MPR$  вузлів  $D_N$  при  $\theta \leq \frac{2\pi}{3}$  менше, ніж  $D_N < 3\pi \left(\frac{D}{3}\right)^{\frac{1}{3}}$ , (1)

а при  $\theta > \frac{2\pi}{3}$  менше, ніж  $D_N < 3\pi D + 3\pi \left(\frac{D}{3}\right)^{\frac{1}{3}} (1 - \pi D)^{\frac{2}{3}}$ , (2)

де  $\theta$  – кут між сусідніми  $MPR$  вузлами.

З урахуванням того, що щільність мережі  $D = \frac{N}{L^2}$ ,  $N$  – кількість вузлів в мережі, що знаходяться на площі, обмеженій сторонами квадрату довжиною  $L = 4R$ ,  $R = 1$  – максимальний радіус дії одного вузла, дану теорему можна записати наступним чином:

**Теорема 1а.** Коли  $L$  фіксовано та  $N$  росте, то верхня межа кількості  $MPR$  вузлів  $D_N$  при  $\theta \leq \frac{2\pi}{3}$  менше, ніж  $D_N < \frac{3\pi}{2} \left(\frac{N}{6}\right)^{\frac{1}{3}}$ , (3)

а при  $\theta > \frac{2\pi}{3}$  менше, ніж  $D_N < 3\pi \frac{N}{16} + 3\pi \left(\frac{N}{48}\right)^{\frac{1}{3}} \left(1 - \pi \frac{N}{16}\right)^{\frac{2}{3}}$ . (4)

Метою роботи є експериментальне дослідження працездатності теореми шляхом моделювання в Network Simulator 2 (NS-2) різних топологій мережі.

Для перевірки працездатності теореми розглядалися три типи мереж з різною кількістю вузлів: «сітка», «стрічка» і «довільна». Вузли розміщувались в межах площі, обмеженої ребром квадрата з  $L=80$  м. Для кожного варіанту мережі знаходилась верхня межа кількості  $MPR$  вузлів шляхом розрахунків за формулами (3), (4) і моделюванням.

**Результати моделювання.** На Рис. 1. представлено декілька варіантів топології «сітка». Місця розташування вузлів позначені точками, кількість досліджуваних вузлів:  $N = 5; 9; 13; 25; 41; 81; 121; 225; 361$ .

Для кількості вузлів  $N=5$  згідно формули (3) отримуємо верхню межу кількості  $MPR$  вузлів  $D_N < \frac{3\pi}{2} \left(\frac{5}{6}\right)^{\frac{1}{3}} = 4,43$ . Для більшої кількості вузлів розрахунок аналогічний.

В Табл. 1 наведені результати розрахунку кількості  $MPR$  вузлів для різних варіантів топології типу «сітка», отриманих аналітичним способом і за допомогою моделювання.

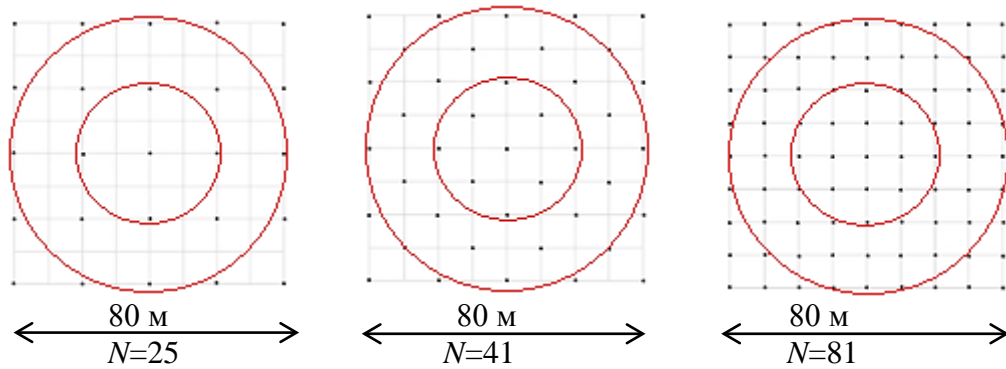


Рис. 1. Досліджувана топологія «сітка»

Кількість MPR вузлів в мережі з топологією «сітка»

Табл. 1.

Кількість вузлів	$N=5$	$N=9$	$N=13$	$N=25$	$N=41$	$N=81$	$N=121$	$N=225$	$N=361$
Кількість MPR вузлів згідно (3)	4,43	5,39	6,01	7,58	8,94	11,22	12,83	15,77	18,47
Кількість MPR вузлів, згідно NS-2	0	2	2	4	4	5	9	11	16

На Рис. 2. представлено декілька варіантів топології «стрічка», ширина якої  $l=R$ , при різних значеннях кількості вузлів  $N = 5; 13; 31; 39; 47; 59$ .

Згідно (4) для  $N = 5$  отримаємо:  $3\pi \frac{5}{16} + 3\pi \left(\frac{5}{48}\right)^{\frac{1}{3}} \left(1 - \pi \frac{5}{16}\right)^{\frac{2}{3}} = 3,25$ . Для більшої кількості вузлів розрахунок дає від'ємний результат (результат не має фізичного змісту).

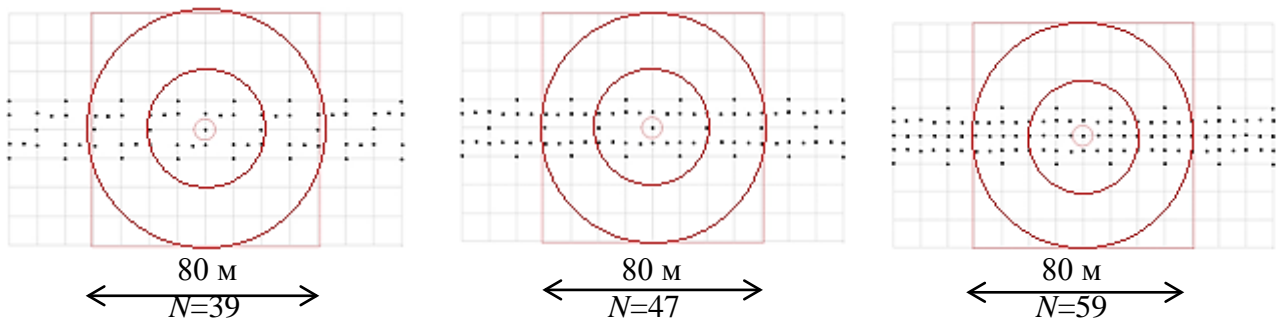


Рис. 2. Досліджувана топологія «стрічка»

В Табл. 2 наведені результати розрахунку кількості MPR вузлів для різних топологій типу «стрічка», отриманих як аналітичним способом, так і за допомогою моделювання.

Кількість MPR вузлів в мережі з топологією «стрічка»

Табл. 2.

Кількість вузлів	$N=5$	$N=13$	$N=31$	$N=39$	$N=47$	$N=59$
Кількість MPR вузлів згідно (4)	3,25	-	-	-	-	-
Кількість MPR вузлів, згідно NS-2	2	2	2	2	2	2

На Рис. 3. представлено змодельовані топології «випадкова» з кількістю вузлів  $N=50$ , які розміщуються в межах площі, обмеженої квадратом з ребром  $L=80$  м.

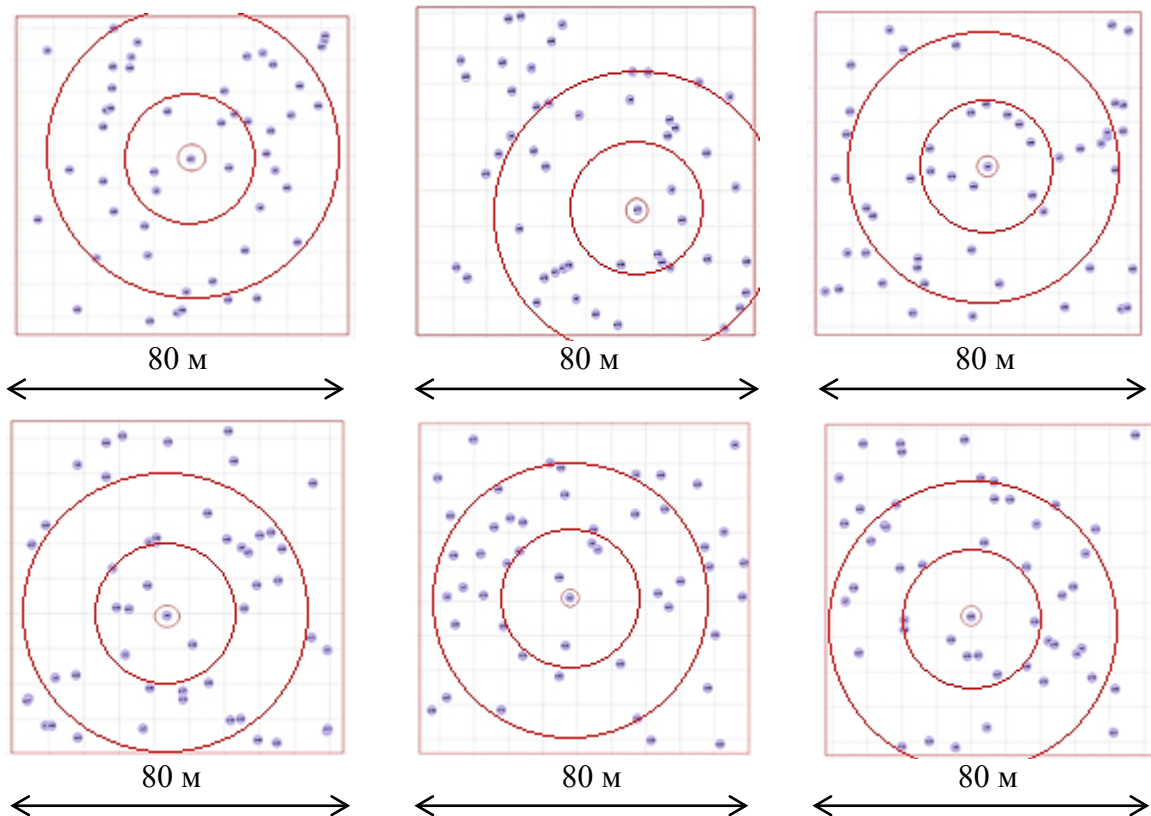


Рис. 3. Досліджувана топологія «випадкова»

Згідно (3) отримаємо:  $\frac{3\pi}{2} \left(\frac{50}{6}\right)^{\frac{1}{3}} = 9,55$ , де 50 – кількість вузлів.

В Табл. 3 наведені результати розрахунку кількості MPR вузлів для різних топологій типу «випадкова», отриманих як аналітичним способом, так і за допомогою моделювання.

Кількість MPR вузлів в мережі з топологією «випадкова»

Табл. 3

Кількість вузлів	$N=50(a)$	$N=50(б)$	$N=50(в)$	$N=50(г)$	$N=50(д)$	$N=50(ж)$
Кількість MPR вузлів згідно (3)	9,55	9,55	9,55	9,55	9,55	9,55
Кількість MPR вузлів, згідно NS-2	4	4	5	6	5	8

Результати моделювання підтверджують працездатність теореми: у всіх розглянутих випадках реальна кількість MPR вузлів завжди менша максимальної кількості MPR вузлів, що визначається згідно теореми про верхню межу.

Крім того, результати моделювання дозволяють спростити теорему, записавши її в наступному вигляді:

**Теорема 1б.** Коли  $L$  фіксовано та  $N$  росте, то верхня межа кількості MPR вузлів  $D_N$  при  $\theta \leq \frac{2\pi}{3}$  менше ніж  $\frac{3\pi}{2} \left(\frac{N}{6}\right)^{\frac{1}{3}}$ , а при  $\theta > \frac{2\pi}{3}$  дорівнює 2.

*Доказ.* На колі в  $360^\circ$  не можливо розмістити більше двох MPR вузлів, кут між якими був би більшим  $120^\circ$ , інакше випадок описується формулою (3) для  $\theta \leq \frac{2\pi}{3}$  ■ .

**Відхилення від теоретичних розрахунків.** Знайдено випадки, коли розрахунки за формулою (3) дають результат, який не співпадає з результатами моделювання. Це справедливо для мереж з топологією, в якій кожний односкачковий вузол відносно центрального вузла є MPR вузлом для двоскачкового вузла відносно центрального.

Розглянуто чотири топології мережі з кількістю вузлів  $N=9$ ; 17; 33 і 65 (на Рис. 4 показано перші три з них), для яких в таблиці 4 наведені кількості MPR вузлів, отриманих згідно (3) і моделюванням.

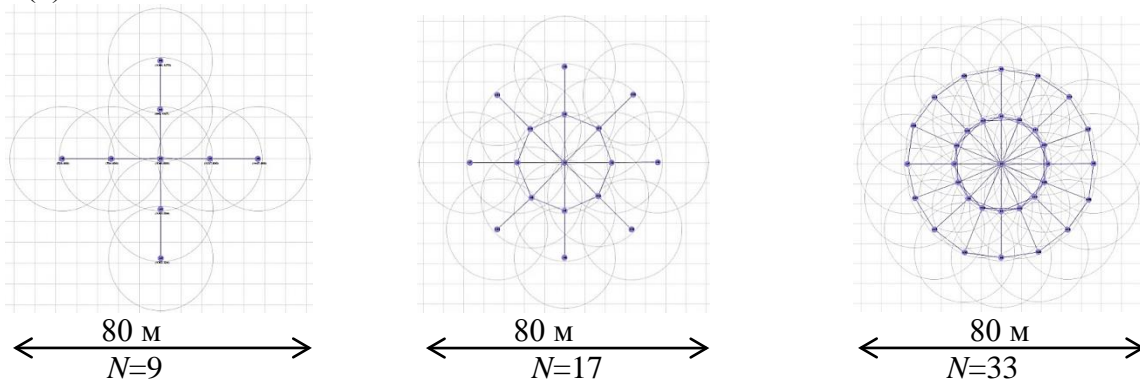


Рис. 4. Топології, в яких кожний односкачковий сусід відносно центрального вузла є MPR вузлом для кожного двоскачкового вузла

Кількість MPR вузлів в мережі				Табл. 4.
Кількість вузлів	$N=9$	$N=17$	$N=33$	$N=65$
Кількість MPR вузлів згідно (3)	5,39	6,67	8,32	10,43
Кількість MPR вузлів, згідно NS-2	4	8	16	32

З Табл. 4 видно, що теорема дає вірний результат при кількості вузлів  $N=9$ , коли 4 вузли знаходяться на межі кола  $2R$  відносно центрального вузла. Якщо ж кількість вузлів на межі кола  $2R$  збільшити в 2 рази так, що для додаткових 4-х вузлів необхідні додаткові 4 MPR вузли, щоб встановити зв'язок, то теоретичні і практичні результати не сходяться. Подальше збільшення вузлів в 2 рази приводить до ще більшої похибки. Але також видно, що кількість MPR вузлів точно дорівнює кількості вузлів які знаходяться на межі кола  $2R$ .

Відхилення результатів моделювання від теоретичних розрахунків пояснюється тим, що доказ теореми проводився при інших умовах, а саме: процес вибору MPR вузлів складається з вибору вузлів, які знаходяться на відстані прийому сигналів, тобто ближче до границі кола  $R$ ; MPR вузли покривають більшість сусідів на відстані двох сачків (тобто в кільці з радіусами  $R$  і  $2R$ ; щільність мережі висока і MPR вузли знаходяться фактично на межі  $R$ .

За результатами моделювання можна сформулювати наступне доповнення до теореми:

**Теорема 1в.** Незалежно від щільності мережі кожен двоскачковий вузол, що знаходиться на межі кола  $2R$ , потребує свого MPR вузла, який повинен знаходитися на перетині кола радіусом  $R$  і лінії радіуса  $2R$ , що проходить через центральний вузол і даний двоскачковий вузол.

*Доказ.* Двоскачковий вузол, який знаходиться на межі кола  $2R$ , може перебувати в зоні прийому MPR вузла, який знаходиться на межі кола  $R$ , лише в одному випадку: коли MPR вузол знаходиться на перетині кола радіусом  $R$  і лінії радіуса  $2R$ , що проходить через центральний вузол і даний двоскачковий вузол. Лише в цьому випадку зона дії MPR вузла дотична до кола  $2R$  в єдиній точці, а саме в точці, де знаходиться двоскачковий вузол ■ .

Звідси випливає, що для даної топології мереж кількість MPR вузлів в точності дорівнює кількості двоскачкових вузлів, які знаходяться на межі кола  $2R$ .

На Рис. 5 для різних топологій, які представлені на рис. 4, показано непокриту площу прийому сигналів MPR вузлів (зафарбована частина рисунків). Розрахуємо імовірність знаходження двоскачкових вузлів на межі кола  $2R$  для представлених топологій.

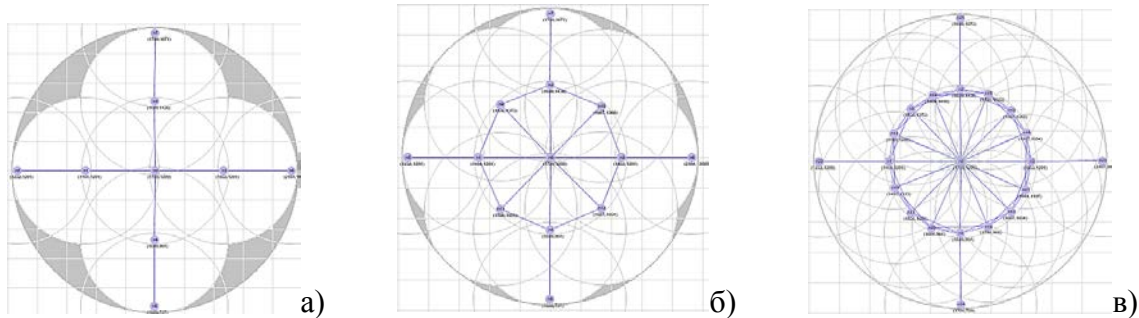


Рис. 5. Непокрита площа при різній кількості MPR вузлів

Імовірність знаходження двоскачкових вузлів на межі кола  $2R$  знайдемо як геометричну імовірність попадання даних вузлів в непокриту площу прийому сигналів односкачкових MPR вузлів при прагненні даної площі до нуля, тобто до виродження її в коло радіуса  $2R$ .

Для розглянутих випадків дану імовірність запишемо як  $p = \frac{S_{\text{непокр}}}{S_{\text{кільця}}}$ , де  $S_{\text{непокр}} = S(\theta) = R^2(\theta - \sin\theta)$ ;  $\theta \leq \frac{2\pi}{N_{MPR1}}$ ;  $N_{MPR1}$  – кількість односкачкових MPR вузлів;  $S_{\text{кільця}} = \pi(4R^2 - R^2) = 3\pi R^2$  – площа кільця, обмеженого радіусами  $R$  і  $2R$ .

З урахуванням вище викладеного імовірність знаходження двоскачкових вузлів на межі кола  $2R$  запишемо як

$$p = \frac{N_{MPR1}}{3\pi} \left( \frac{2\pi}{N_{MPR1}} - \sin \frac{2\pi}{N_{MPR1}} \right). \quad (6)$$

Представимо непокриту площу у вигляді еквівалентного кільця з внутрішнім і зовнішнім радіусами  $R_x$  і  $2R$  відповідно. При умові, що  $R = 1$ , внутрішній радіус еквівалентного кільця буде дорівнювати

$$R_x = \sqrt{4 - \frac{S_{\text{непокр}}}{\pi}}. \quad (7)$$

В Табл. 5 наведені розрахунки за формулами (6), (7), а також абсолютні  $\Delta R$  і відносні  $\varepsilon$  відхилення  $R_x$  від  $2R$ .

**Імовірність знаходження двоскачкових вузлів на межі кола  $2R$**  Табл. 5.

$N_{MPR1}$	4	8	16	32
$p$	0,2423	0,0665	0,0170	0,0043
$R_x$	1,9806	1,9947	1,9987	1,9997
$\Delta R = 2R - R_x$	0,0194	0,0053	0,0013	0,0003
$\varepsilon = \Delta R/2R, \%$	0,9686	0,2648	0,0676	0,0170

З Табл. 5 видно, що імовірність розташування двоскачкових вузлів на межі кола радіусом  $2R$  швидко зменшується: Так для 17 вузлів (8 MPR вузлів) можливі 7 випадків зі 100, для 33 вузлів (16 MPR) – 2 випадки зі 100, для 65 (32 MPR) – 5 випадків з 1000. При цьому внутрішній радіус еквівалентного кільця для 17 вузлів відрізняється від зовнішнього на 0,0053 ( $\varepsilon = 0,26\%$ ), для 33 вузлів – на 0,0013 ( $\varepsilon = 0,07\%$ ), для 65 – на 0,0003 ( $\varepsilon = 0,02\%$ ).

Слід відзначити, що вище був розглянутий найгірший випадок, коли всі двоскачкові вузли розміщені на границі кола радіусом  $2R$ . Якщо ж не брати до уваги частковий випадок, коли кожен двоскачковий сусід потребує власний MPR вузол, то формули (3) та (4) дають достовірний результат.

### Висновки

1. В більшості розглянутих випадків реальна кількість MPR вузлів, яка отримана за допомогою моделювання в програмному пакеті NS-2, завжди менша верхньої кількості MPR вузлів, що визначається згідно теореми про верхню межу MPR вузлів.

2. Теорему про верхню межу можна записати в спрощеному вигляді:

Коли  $R$  фіксовано та  $N$  росте, то верхня межа кількості MPR вузлів  $D_N$  при  $\theta \leq \frac{2\pi}{3}$  менше ніж  $\frac{3\pi}{2} \left(\frac{N}{6}\right)^{\frac{1}{3}}$ , а при  $\theta > \frac{2\pi}{3}$  рівна 2.

3. Відхилення результатів моделювання від теоретичних розрахунків пояснюється тим, що умови доказу теореми не враховували наведені в даній роботі випадки розташування вузлів. Доведено, що, незалежно від щільності мережі, кожен двоскачковий вузол, що знаходиться на межі кола  $2R$ , потребує свого MPR вузла, який повинен знаходитися на перетині кола радіусом  $R$  і лінії радіуса  $2R$ , що проходить через центральний вузол і даний двоскачковий вузол..

4. Показано, що імовірність розташування двоскачкових вузлів на межі кола радіусом  $2R$  мала. Так для 17 вузлів можливі 7 випадків зі 100, для 33 вузлів - 2 випадки зі 100, для 65 – 5 випадків з 1000. При цьому внутрішній радіус еквівалентного кільця для 17 вузлів відрізняється від зовнішнього на 0,0053 (відносне відхилення складає  $\varepsilon = 0,26\%$ ), для 33 вузлів – на 0,0013 ( $\varepsilon = 0,07\%$ ), для 65 – на 0,0003 ( $\varepsilon = 0,02\%$ ).

Планується продовжити дослідження в напрямку розробки методів зменшення службової інформації, яка передається в протоколі OLSR.

### Література

1. Вишнеvский В. Маршрутизация в широкополосных беспроводных MESH-сетях стандарта 802.11 s / В. Вишнеvский, Д. Лаконцев, А. Сафонов, С. Шпилев // ЭЛЕКТРОНИКА: НТБ, 2008, № 6, с. 64-69.

2. Jacquet P. Performance analysis of OLSR Multipoint Relay flooding in two ad hoc wireless network models / Philippe Jacquet, Anis Laouiti, Pascale Minet, Laurent Viennot // Institut national de recherche en informatique et en automatique, Theme 1 – Reseaux et systemes, Projet HIPERCOM, Rapport de recherche № 4260 – September, 2001. – 26 pages.

3. Laouiti Anis. Simulation Results of the OLSR Routing Protocol for Wireless Network / Laouiti Anis, Mühlethaler Paul, Najid Abdellah, Plakoo Epiphane // Institute national de recherche en informatique et en automatique, Theme 1 – Reseaux et systemes, Projet HIPERCOM, Rapport de recherche № 4414/ –Mars 2002, 24 pages.

4. Максимов В. В. Розрахунок верхньої межі кількості MPR вузлів у протоколі OLSR / В. В. Максимов, В. В. Полісніченко, Л. І. Потьомкіна // Збірник наукових праць ВІТІ НТУУ "КПІ". – 2012. – № 1. – С.82-88.