

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ОДЕСЬКА НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ ЗВ'ЯЗКУ ІМ. О. С. ПОПОВА**

**АЛЬ-АЗЗАВІ ЕССА МОХАММЕД**

УДК 621.391

**ДИНАМІЧНІ МОДЕЛІ І МЕТОДИ МАРШРУТИЗАЦІЇ НА ОСНОВІ**  
**РОЗПОДІЛУ РЕСУРСІВ ДЛЯ WIMAX МЕРЕЖ В РЕЖИМІ MESH**

Спеціальність 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі  
(17 – Електроніка та телекомунікації)

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Одеса – 2017

Дисертацією є рукопис

Робота виконана у Одеській національній академії зв'язку ім. О.С. Попова  
Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
ЄВСЄЄВА Оксана Юріївна,  
Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,  
професор кафедри телекомунікаційних систем.

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
ТОЛЮПА Сергій Васильович,  
Київський національний університет  
імені Тараса Шевченка,  
професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації;

кандидат технічних наук, доцент  
КИРИК Мар'ян Іванович,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри телекомунікацій.

Захист відбудеться 16 січня 2018 р. о 10 годині на засіданні спеціалізованої  
вченої ради Д 41.816.01 у Одеській національній академії зв'язку  
ім. О.С. Попова за адресою: вул. Кузнечна, 1, Одеса, 65029.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Одеської національної академії  
зв'язку ім. О.С. Попова за адресою: вул. Кузнечна, 1, Одеса, 65029.

Автореферат розісланий « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2017 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Д.М. Степанов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Безпроводові mesh-мережі (Wireless Mesh Networks, WMN) завдяки таким властивостям як швидке розгортання, самоорганізація, відмовостійкість в поєднанні з відносно низькими капітальними витратами, наприклад, у порівнянні з оптичними або іншими проводовими мережами, є одним із найпопулярніших рішень проблеми абонентського доступу. При цьому з точки зору швидкостей передавання, безпеки, зони покриття й числа користувачів найбільшої уваги заслуговує технологія Worldwide Interoperability for Microwave Access (WiMAX), що регламентується сімейством стандартів IEEE 802.16.

Особливістю mesh-мереж є можливість кожного вузла (абонентської станції) виступати як в якості кінцевого пристрою, так і в якості проміжного маршрутизатора одночасно. З одного боку це дозволяє збільшити зону покриття мережі, а з іншого – призводить до ускладнення задач мережевого управління, серед яких одними з найважливіших є маршрутизація й розподіл ресурсів каналного рівня. Стандарт IEEE 802.16 в якості одиниці ресурсу каналного рівня визначає часовий слот (minslot), але при цьому не визначає механізми їх розподілу вздовж маршрутів доведення трафіка, як власне і протоколи вибору цих маршрутів. Оскільки зазначені задачі відіграють ключову роль у виконанні WiMAX mesh-мережею функцій щодо доставки трафіка, їх розв'язанню присвячена велика кількість публікацій.

При цьому, як показав аналіз, представлені в літературі методи маршрутизації й розподілу часових слотів в WiMAX mesh-мережах належать до однієї з двох груп: ті, які розв'язують задачі маршрутизації й розподілу каналних ресурсів послідовно й відокремлено, або ті, які передбачають їх комплексний розгляд (так званий кросрівневий підхід). В першому випадку спроби врахувати взаємозв'язок між процесами маршрутизації й розподілу каналних ресурсів приймають форму кросрівневих маршрутних метрик, побудови маршрутного дерева з урахуванням інтерференції або, в кращому випадку, введення координати між цими задачами в процесі їх розв'язання. При цьому найчастіше методи маршрутизації і розподілу слотів мають переважно евристичний характер. Однак, як показує проведений аналіз, з метою підвищення ефективності використання мережевих ресурсів, продуктивності мережі й якості обслуговування (Quality of Service, QoS), кросрівневий підхід, що передбачає трактування задачі маршрутизації в WiMAX mesh-мережі як задачі розподілу каналних ресурсів (часових слотів), є найбільш прийнятним. При цьому, з огляду на динаміку трафіка, який надходить на обслуговування, й високу територіальну розподіленість системи, евристичні процедури маршрутизації і управління каналними ресурсами повинні бути замінені на строго формалізовані методи, що дозволяють отримати динамічні, оптимальні і одночасно масштабовані управляючі рішення.

Таким чином, актуальною науково-прикладною задачею є вдосконалення методів маршрутизації в WiMAX mesh-мережі з гарантованою якістю обслуговування на основі розподілу їх каналних ресурсів шляхом розробки нових динамічних потокових математичних моделей і методів, спрямованих на підвищення ефективності використання ресурсів і продуктивності безпроводової мережі в цілому.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Дисертаційні дослідження відповідають положенням «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції національної програми інформатизації», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні» та «Основним засадам розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Отримані наукові результати знайшли застосування в рамках науково-дослідної роботи (НДР) «Дослідження та розроблення перспективних телекомунікаційних технологій передавання мереж наступного покоління» (№ ДР 0115U000854), яка виконувалася в Одеській національній академії зв'язку ім. О.С.Попова, а також були впроваджені в навчальний процес кафедри телекомунікаційних систем ОНАЗ ім. О.С. Попова, що підтверджено наявними актами впровадження.

**Мета роботи** – підвищення продуктивності і ефективності використання каналних ресурсів WiMAX mesh-мережі з гарантованою якістю обслуговування.

Успішне розв'язання сформульованої науково-прикладної задачі передбачає розгляд в ході дисертаційних досліджень наступного ряду задач:

1. Аналіз відомих методів і протоколів маршрутизації й розподілу каналних ресурсів в WiMAX mesh-мережах.

2. Аналіз відомих математичних моделей WiMAX mesh-мереж з метою вибору математичного апарату й коректної постановки задачі маршрутизації на основі розподілу каналних ресурсів.

3. Розробка динамічної математичної моделі WiMAX mesh-мережі і методу маршрутизації на її основі.

4. Розробка динамічної математичної моделі й методу маршрутизації на основі розподілу каналних ресурсів в WiMAX mesh-мережах з наданням послуг зв'язку гарантованої якості.

5. Розробка ієрархічної динамічної математичної моделі і метода маршрутизації на основі розподілу каналних ресурсів в кластеризованій WiMAX mesh-мережах.

6. Оцінка ефективності та формування практичних рекомендацій щодо застосування розроблених моделей і методів маршрутизації на основі розподілу каналних ресурсів в WiMAX mesh-мережах.

**Об'єктом дослідження** є процеси маршрутизації та розподілу каналних ресурсів в WiMAX mesh-мережах.

**Предметом дослідження** є моделі й методи маршрутизації на основі розподілу каналних ресурсів в WiMAX mesh-мережах.

**Методи дослідження.** В ході дисертаційних досліджень з метою вирішення сформульованої науково-прикладної задачі використовувалися методи диференційно-різницевого рівняння стану на етапі розробки моделей WiMAX mesh-мереж, методи теорії оптимального управління, теорії графів й математичний апарат дослідження операцій на етапі розв'язання сформульованої оптимізаційної задачі й розробки методів маршрутизації. Оцінка ефективності розроблених моделей і методів маршрутизації проводилася шляхом аналітичного моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Основними науковими результатами, одержаними в дисертаційній роботі є:

1) В роботі отримала подальший розвиток математична модель в просторі станів шляхом її адаптації до розв'язання задач маршрутизації на основі розподілу каналних ресурсів в WiMax mesh-мережі. Новизна моделі полягає у введенні булевих змінних управління, пов'язаних з призначенням часових слотів, розрахунок яких забезпечує потрібну сукупність маршрутів з одночасним розподілом слотів уздовж них, причому виділення ресурсів здійснюється в обсязі, відповідному до інтенсивності трафіка, що надходить на обслуговування, тим самим виконуючи швидкісні QoS-вимоги.

2) Запропонована динамічна математична модель WiMax mesh-мережі в просторі станів отримала подальший розвиток шляхом розширення її на мережі з гарантованою якістю обслуговування. Новизна моделі полягає у введенні швидкісних і часових показників QoS і механізму контролю послідовності часових слотів, що використовуються уздовж маршрутів, з метою зменшення міжкінцевої затримки.

3) Отримала подальший розвиток динамічна модель в просторі станів і вперше запропоновано метод ієрархічної маршрутизації на основі розподілу ресурсів в кластеризованій WiMAX mesh-мережі, що дозволило сформулювати задачу маршрутизації як послідовність оптимізаційних задач внутрішньої і міжкластерної маршрутизації, які розв'язуються окремо і взаємно координуються. Метод забезпечує підвищення масштабованості за рахунок зниження розмірності векторів управління.

**Практичне значення одержаних результатів роботи.** Запропоновані в роботі моделі і методи можуть розглядатися як основа для перспективних методів маршрутизації й управління в WiMAX mesh-мережі відповідно до концепції безпроводових mesh-мереж, що програмно конфігуруються (Software Defined Wireless Mesh Network, SD-WMN). Застосування запропонованих моделей за рахунок багатопляхової стратегії маршрутизації в WiMAX mesh-мережі забезпечує підвищення швидкості передачі трафіка на 30 – 100% за тієї ж кількості наявних ресурсів і з виконанням часових QoS-вимог користувача. При цьому максимальна швидкість передачі, яка може бути досягнута з використанням запропонованої моделі, наближається до пропускної здатності мережі, що дозволяє розглядати ці моделі як інструмент аналізу ефективності рішень в процесі проектування нових mesh-мереж на основі часового множинного доступу.

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати, представлені в дисертаційній роботі, отримані автором самостійно і опубліковані в спеціалізованій літературі [1 – 19]. У статтях, виконаних у співавторстві, особисто автору належать наступні результати. У роботі [1] автору належить базова динамічна модель WiMAX mesh-мережі, представлена в просторі станів, запропонована оптимізаційна постановка задачі маршрутизації на основі розподілу часових слотів. В [2] запропонована концепція ієрархічної кросрівневої маршрутизації в WiMAX mesh-мережі. В роботі [3] автором запропоновано ввести в модель швидкісні і часові показники QoS і механізм контролю послідовності часових слотів. В [4] автором проведена оцінка ефективності процесу маршрутизації в

WiMAX mesh-мережі відповідно до запропонованих моделей в просторі станів. В роботі [5] автору належить дворівневий метод ієрархічної кросрівневої маршрутизації в кластеризованій WiMAX mesh-мережі. В роботі [6] автор розширив динамічну модель WiMAX mesh-мережі в просторі станів на випадок декількох класів обслуговування. В [7] автору належать результати моделювання процесу маршрутизації в WiMAX mesh-мережі з двома класами обслуговування. У статті [8] автором запропоновано динамічну модель в просторі станів для випадку кластеризованої WiMAX mesh-мережі.

**Апробація.** Результати дисертації пройшли апробацію в ході одинадцяти науково-технічних конференцій і форумів загальноукраїнського та міжнародного рівнів, серед яких: 68-ма та 69-ма науково-технічні конференції професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів (2013, 2014 рр., м. Одеса, ОНАЗ); 8-та та 9-та Міжнародні науково-технічні конференції «Проблеми телекомунікацій» (2014, 2015 рр., м. Київ, НТУУ КПІ); 18-й та 19-й Міжнародні молодіжні форуми «Радіоелектроніка і молодь у XXI ст.» (2014, 2015 рр., м. Харків, ХНУРЕ); XII-й Міжнародна конференція «Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2014)» (2014 р., м. Львів, НУ ЛП); перша та друга Міжнародні IEEE конференції ««Problems of Infocommunications. Science and Technology» PICS&T-2014 та PICS&T-2015 (2014, 2015 рр., м. Харків, ХНУРЕ); 4-та та 5-та Міжнародні науково-практичні конференції «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (2014, 2015 рр., м. Одеса, ОНАЗ).

**Публікації.** Основні результати дисертаційних досліджень висвітлено в 19 наукових працях, серед яких 4 статті опубліковано в наукових фахових виданнях України [1 – 4] й 4 статті – за кордоном [5 – 8]. Крім цього, матеріали дисертації опубліковано в 11 тезах доповідей на науково-технічних форумах і конференціях [9 – 19]. У науково-метричних базах IEEEExplore і Scopus проіндексовані роботи [5, 13, 18].

**Структура і обсяг роботи.** Дисертація складається зі анотацій, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 169 сторінок, з яких 137 сторінок основного тексту, 11 сторінок з рисунками та таблицями. Загальна кількість рисунків і таблиць становить 47 й 9 відповідно. Список використаних джерел містить 111 найменувань на 14 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЙНОЇ РОБОТИ

У **вступі** наведено загальну характеристику роботи, обґрунтовано актуальність обраної теми, визначено мету, задачу, об'єкт, предмет і методи дослідження, сформульовано наукову новизну й практичне значення одержаних результатів. Наведено дані про публікації автора за темою роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз принципів функціонування WiMAX мереж в режимі mesh і методів маршрутизації в них. Зазначено, що у контексті надання безпроводовими мережами телекомунікаційних послуг гарантованої якості постановка задачі маршрутизації зазнає трансформації: за кожним потоком, який обслуговується, вздовж кожного з маршрутів повинні бути закріплені

каналні ресурси (часові слоти) в обсязі, достатньому для забезпечення необхідного рівня QoS, що передбачає тісний зв'язок процедур маршрутизації й розподілу каналних ресурсів.

На підставі проведеного в роботі аналізу було сформульовано низку вимог до розв'язання задач маршрутизації і розподілу каналних ресурсів в WiMAX mesh-мережах, серед яких основними є: реалізація кросрівневого підходу, що передбачає спільне розв'язання задач маршрутизації і розподілу каналних ресурсів, із забезпеченням при цьому найкращого (оптимального) рішення; врахування QoS-вимог потоків, що надходять на обслуговування; реалізація багатопрохідної стратегії доведення трафіка; врахування стану буферних ресурсів; впровадження повторного використання слотів. В цілому, як показав аналіз, представлені в літературі протоколи маршрутизації в безпроводових mesh-мережах є переважно евристичними рішеннями, що ґрунтуються на традиційному трактуванні маршрутизації як задачі найкоротшого шляху. При цьому велика кількість робіт, які присвячені розробці нових кросрівневих маршрутних метрик, вказує на неспроможність графового підходу і невідповідність його значеним вимогам. З іншого боку представлені в літературі способи реалізації кросрівневого підходу є спробами підвищити продуктивність мережі з внесенням мінімальних змін в існуючі алгоритми та протоколи, без підведення під них математичної основи у вигляді строго обґрунтованих системних рішень.

Таким чином, в розділі показано актуальність науково-прикладної задачі й сформульовано ряд підзадач, розв'язання яких забезпечується в роботі.

У **другому розділі** сформульовано вимоги до математичного опису WiMAX mesh-мереж, виходячи з яких проведено аналіз відомих математичних моделей розв'язання задачі маршрутизації і розподілу каналних ресурсів. Результати аналізу визначили пріоритетне використання математичного апарату диференційно-різницевого рівняння стану, що забезпечує, на відміну від інших, динамічний характер моделі й одержування на її основі управляючих рішень.

У розділі запропоновано базову математичну модель WiMAX mesh-мережі в просторі станів. Для опису структурних властивостей мережі використовувався орієнтований зважений граф  $G(V, E)$ , множина вершин якого  $V$  моделює множину всіх станцій mesh-мережі (Mesh Subscriber Station, MSS), а множина дуг  $E$  відображає сукупність каналів між ними, де наявність каналу  $(i, j)$  означає можливість прямої передачі потоку від  $i$ -ї станції до  $j$ -ї. Сигнально-завадова обстановка на окремих ділянках мережі визначає для кожного каналу  $(i, j)$  свій тип модуляції і, як наслідок, кількість біт  $m_{i,j}^r(k)$ , що передаються в  $r$ -му слоті в момент часу  $t_k$ . Для спрощення передбачалося  $m_{i,j}^r(k) = m_{i,j}(k)$ ,  $r = \overline{1, N_F}$ , де  $N_F$  – кількість слотів у фреймі, які можуть бути використані для передавання трафіка користувачів.

З метою формалізації задачі маршрутизації як керованого процесу розподілу ресурсів каналного рівня в якості управляючих виступали булеві змінні  $\tau_{i,j}^{r,l}(k)$ :  $\tau_{i,j}^{r,l}(k) = 1$ , якщо в момент часу  $t_k$  в каналі  $(i, j)$   $r$ -й слот використову-

ється для передачі потоку, адресованого до  $l$ -ї станції, і  $\tau_{i,j}^{r,l}(k)=0$  в іншому випадку,  $i, j, l = \overline{1, N_v}$ ,  $i \neq j, l$ ,  $r = \overline{1, N_F}$ , де  $N_v$  – загальна кількість станцій в mesh-мережі. В якості змінних стану були обрані обсяги даних  $q_{i,j}(k)$ , що знаходяться на  $i$ -й станції і призначені для передачі до  $j$ -ї станції в момент часу  $t_k$ . Тоді динаміку черг  $i$ -ї станції mesh-мережі можна описати наступною системою рівнянь:

$$\begin{aligned} q_{i,j}(k+1) = & q_{i,j}(k) - \sum_{\substack{v \in S_i^1, \\ v \neq i}} \sum_{r=1}^{N_F} m_{i,v}(k) \tau_{i,v}^{r,j}(k) n + \\ & + \sum_{\substack{g \in S_i^1, \\ g \neq i, j}} \sum_{r=1}^{N_F} m_{g,i}(k) \tau_{g,i}^{r,j}(k) n + \xi_{i,j}(k) \Delta t, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $k=0, 1, 2, \dots$ ;  $\Delta t = t_{k+1} - t_k$  – інтервал дискретизації (період розрахунку управляючих змінних);  $S_i^1$  – множина станцій mesh-мережі, суміжних до  $i$ -ї MSS;  $\xi_{i,j}(k)$  – інтенсивність надходження даних на  $i$ -у MSS в момент часу  $t_k$ , адресованих до  $j$ -ї MSS;  $n$  – кількість фреймів, що передаються протягом часу  $\Delta t$ ,  $n = \Delta t / T_F$ ;  $T_F$  – тривалість одного фрейма.

Виходячи з фізичного змісту введених змінних, на них накладаються наступні обмеження:

$$q_{i,j}(k) \geq 0, \quad \sum_{\substack{j=1, \\ i \neq j}}^{N_v} q_{i,j}(k) \leq q_i^{\max}, \quad i, j = \overline{1, N_v}, \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^{N_v} \sum_{j=1, l=1, j \neq i}^{N_v} \sum_{l=1, l \neq i}^{N_v} \tau_{i,j}^{r,l}(k) \leq 1, \quad r = \overline{1, N_F}, \quad (3)$$

де  $q_i^{\max}$  – максимальний розмір черги, припустимий на  $i$ -й станції.

Умова (3) гарантує, що  $r$ -й часовий слот на  $k$ -му інтервалі дискретизації (управління) буде використаний в системі лише один раз. Однак з метою максимального підвищення продуктивності мережі доцільно задіяти повторне використання слотів. Тоді умова (3) відповідно до протокольної моделі урахування інтерференції трансформується в систему з  $N_v \times N_F$  умов:

$$\sum_{\substack{j=1, l=1, \\ j \neq i}}^{N_v} \sum_{l=1, l \neq i}^{N_v} \tau_{i,j}^{r,l}(k) + \sum_{\substack{j=1, l=1, \\ j \neq i}}^{N_v} \sum_{l=1, l \neq i}^{N_v} \tau_{j,i}^{r,l}(k) + \sum_{g \in S_i^2} \sum_{\substack{h \in S_i^1, \\ h \neq g}} \sum_{l=1, l \neq g}^{N_v} \tau_{g,h}^{r,l}(k) \leq 1, \quad (4)$$

де  $S_i^2 = \{v : v \in V \wedge \text{dist}(v, i) \leq 2\}$ ,  $\text{dist}(v, i)$  – найменша кількість каналів між MSS  $v$  й  $i$ .



В рамках запропонованої моделі розв'язання задачі маршрутизації на основі розподілу каналних ресурсів WiMax mesh-мережі може бути сформульовано у вигляді оптимізаційної задачі, пов'язаної з мінімізацією однієї з цільових функцій:

$$J = \sum_{k=1}^a \left[ \bar{q}^T(k) W_q \bar{q}(k) + \bar{\tau}^T(k) W_\tau \bar{\tau}(k) \right] \rightarrow \min, \quad (5)$$

$$J = \sum_{k=1}^a \left[ \bar{q}^T(k) W_q \bar{q}(k) + \bar{\tau}^T(k) W_\tau \bar{\tau}(k) - \bar{\tau}^T(k) W_{reuse} \bar{\tau}(k) \right] \rightarrow \min, \quad (6)$$

де  $a$  – кількість інтервалів  $\Delta t$ , для яких здійснюється розрахунок управляючих змінних;  $\bar{q}(k) = [q_{1,2}(k), \dots, q_{i,j}(k), \dots, q_{N_v, N_v-1}(k)]^T$  – вектор стану mesh-мережі на  $k$ -му інтервалі дискретизації розміру  $N_v(N_v-1) \times 1$ ;  $\bar{\tau}(k)$  – управляючий вектор розміру  $N_F N_e(N_v-1) \times 1$ , елементами якого є змінні  $\tau_{i,j}^{r,l}$ ;  $N_e$  – кількість каналів в мережі,  $N_e = |E|$ ;  $W_q$ ,  $W_\tau$  – діагональні невід'ємно визначені вагові матриці;  $W_{reuse}$  – діагональна невід'ємно визначена вагова матриця, яка відбиває виграш за рахунок повторного використання слотів.

Модель (1) – (6) була розширена на випадок мереж з гарантованою якістю обслуговування й можливістю диференційованого управління кожним QoS-класом окремо, для чого були введені змінні виду  $q_{i,j}^z(k)$  і  $\tau_{i,j}^{r,l,z}(k)$ , де додатковий індекс  $z$  вказує на клас обслуговування,  $z = \overline{1, N_{QoS}}$ . Тоді динаміка черг  $z$ -го класу обслуговування на  $i$ -й станції mesh-мережі може бути описана наступним чином:

$$\begin{aligned} q_{i,j}^z(k+1) = & q_{i,j}^z(k) - \sum_{\substack{v \in S_i^1, \\ v \neq i}} \sum_{r=1}^{N_F} m_{i,v}(k) \tau_{i,v}^{r,j,z}(k) n + \\ & + \sum_{\substack{g \in S_i^1, \\ g \neq i,j}} \sum_{r=1}^{N_F} m_{g,i}(k) \tau_{g,i}^{r,j,z}(k) n + \xi_{i,j}^z(k) \Delta t, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $\xi_{i,j}^z(k)$  – інтенсивність надходження даних на  $i$ -ю станцію в момент часу  $t_k$  в рамках  $z$ -го класу обслуговування, які адресовані до  $j$ -ї станції.

В силу наявності інтерференції змінні  $\tau_{i,j}^{r,l,z}(k)$  повинні відповідати одній із зазначених умов (3) або (4) в залежності від прийнятої політики повторного використання слотів, а змінні стану повинні задовольняти умовам (2). З метою гарантованого забезпечення якості обслуговування в модель вводяться умови

$$B_\Sigma^z \geq B_{req}^z, \quad D_\Sigma^z \leq D_{req}^z, \quad (8)$$

де  $B_\Sigma^z$ ,  $D_\Sigma^z$  – відповідно швидкість передачі й затримка доставки «з кінця в кінець» в рамках  $z$ -го класу обслуговування, які досягаються в даних умовах фу-

нкціонування мережі для заданої пари адресатів;  $B_{req}^z$ ,  $D_{req}^z$  – відповідно необхідна швидкість передачі і припустима затримка доставки «з кінця в кінець» в рамках  $z$ -го класу обслуговування.

Умова забезпечення необхідної швидкості передачі в (8) з використанням введених позначень може бути записано як

$$\sum_{r=1}^{N_F} m_{i,j}(k) \tau_{i,j}^{r,l,z}(k) \leq B_{req}^z. \quad (9)$$

Сумарною міжкінцевою затримкою в WiMax mesh-мережі є

$$D_{\Sigma}^z = \frac{1}{2} T_F + D_q^z + D_{s-d} + 2T_s, \quad (10)$$

де  $D_q^z$  – первинна затримка пакетів в черзі, яка може бути розрахована з використанням теорії масового обслуговування;  $D_{s-d}$  – вторинна затримка, яка пов'язана з використанням для передачі пакетів тільки призначених слотів і дорівнює часу очікування цього слота;  $T_s$  – тривалість слота.

Таким чином, для того, щоб виключити збільшення затримок, послідовність часових слотів, що використовуються уздовж маршруту, повинна бути керованою. З цією метою функція вартості (6) була переформульована:

$$J = \sum_{k=1}^a \left[ \bar{q}^T(k) W_q \bar{q}(k) + \bar{\tau}^T(k) W_{\tau} \bar{\tau}(k) - \bar{\tau}^T(k) W_{reuse} \bar{\tau}(k) + \bar{\tau}^T(k) W_{seq} \bar{\tau}(k) \right] \rightarrow \min, \quad (11)$$

де  $W_{seq}$  – вагова матриця, пов'язана з порушеннями черговості слотів уздовж маршруту. Її елементи дорівнюють 0, якщо послідовний номер слота вище, ніж номери слотів в попередньому каналі, і більше нуля, якщо черговість слотів порушена.

У **третьому розділі** з метою забезпечення масштабованості управляючих рішень в роботі запропонована концепція ієрархічної кросрівневої маршрутизації в безпроводовій mesh-мережі стандарту IEEE 802.16, в основу якої покладено ідею декомпозиції вихідної задачі управління на кілька підзадач. Її реалізація передбачає кластеризацію мережі, ієрархічну структуру управління, і розподіл всієї множини слотів, доступних для передачі трафіка, на підмножини (пули), де кожному кластеру мережі виділяється свій пул слотів. Причому якщо пули слотів можуть використовуватися одночасно декількома кластерами, то всередині кластера повторне використання слотів не допускається. З метою опису структурних властивостей кластеризованої мережі використовується сукупність графів більш низької розмірності: графи внутрішніх структур кластерів  $G'_i(V'_i, E'_i)$ , граф кластерів  $G''(V'', E'')$  і граф конфліктів кластерів  $G''_{cfl}(V''_{cfl}, E''_{cfl})$ .

Процес інформаційного обміну між кластерами, що відноситься до верхнього рівня (ВР) управління, описується системою рівнянь стану виду:

$$q_{i,j}^{UL}(k+1) = q_{i,j}^{UL}(k) - \sum_{\substack{h \in S_i^1, \\ h \neq i}} \sum_{r \in \Theta_i} m_{i,h}^{ULr}(k) \tau_{i,h}^{ULr,j}(k) n + \sum_{\substack{g \in S_i^1, \\ g \neq i, j}} \sum_{r \in \Theta_g} m_{g,i}^{ULr}(k) \tau_{g,i}^{ULr,j}(k) n + \xi_{i,j}^{UL}(k) \Delta t, \quad (12)$$

де  $q_{i,j}^{UL}(k) = \sum_{x=1}^{N_v^i} \sum_{z=1}^{N_v^j} q_{i,x,j,z}(k)$  – змінна стану ВР, яка відображає обсяг даних, що знаходяться в момент часу  $t_k$  в кластері  $i$  й призначені для передачі станціям в кластері  $j$ ;  $m_{i,h}^{ULr}$  – кількість біт даних користувача, які можуть бути передані з використанням  $r$ -го слота в агрегованому зовнішньому каналі  $(i,h) \in E''$ ;  $\tau_{i,h}^{ULr,j}(k)$  – бінарна управляюча змінна верхнього рівня, що відповідає за призначення слотів в агрегованих каналах між кластерами;  $S_i^{UL1}$  – множина вершин, суміжних до вершини  $i$  в графі  $G''$ ;  $\xi_{i,j}^{UL}(k)$  – інтенсивність агрегованого трафіка, який надходить до  $i$ -го кластеру в момент часу  $t_k$  і адресований станціям в  $j$ -му кластері (зовнішній трафік),  $\xi_{i,j}^{UL}(k) = \sum_{x=1}^{N_v^i} \sum_{z=1}^{N_v^j} \xi_{i,x,j,z}(k)$ .

Рівняння стану нижнього рівня (НР), пов'язаного з кожним  $i$ -м кластером окремо, можуть бути представлені в наступному вигляді:

$$q_{i,x,i,z}^{LL}(k+1) = q_{i,x,i,z}^{LL}(k) - \sum_{\substack{i.s \in S_{i,x}^1, \\ s \neq x}} \sum_{r \in \Theta_i} m_{i,x,i.s}^{LLr}(k) \tau_{i,x,i.s}^{LLr,i,z}(k) n + \quad (13)$$

$$+ \sum_{\substack{i.w \in S_{i,x}^1, \\ w \neq x, z}} \sum_{r \in \Theta_i} m_{i,w,i,x}^{LLr}(k) \tau_{i,w,i,x}^{LLr,i,z}(k) n + \xi_{i,x,i,z}^{LL\Sigma}(k) \Delta t,$$

$$\xi_{i,x,i,z}^{LL\Sigma}(k) \Delta t = \xi_{i,x,i,z}(k) \Delta t + \xi_{i,x,i,z}^{ext}(k) \Delta t = \xi_{i,x,i,z}(k) \Delta t +$$

$$+ \sum_{\substack{g \in S_i^1, \\ g \neq i, j}} \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^{N_{cl}} b_{g,i,x}^{j,i,z} \sum_{r \in \Theta_g} m_{g,i}^{ULr}(k) \tau_{g,i}^{ULr,j}(k) n,$$

де  $\tau_{i,x,i,z}^{LLr,i,s}(k)$  – булева управляюча змінна НР, що відповідає за призначення слотів всередині  $i$ -го кластера;  $m_{i,x,i,s}^{LLr}(k)$  – кількість біт даних користувача, які можуть бути передані з використанням  $r$ -го слота у внутрішньому каналі  $(i,x,i,s) \in E'_i$ ;  $\xi_{i,x,i,z}^{LL\Sigma}(k)$  – інтенсивність агрегованого трафіка, який надходить до черги  $(i,x,i,z)$  на станції  $i,x$  в момент часу  $t_k$  й адресований до станції  $i,z$  (включаючи зовнішні  $\xi_{i,x,i,z}^{ext}(k)$  потоки, для яких станція  $i,z$  є точкою виходу);  $b_{g,i,x}^{j,i,z}$  – коефіцієнт, що відображає частку трафіка, яка направляється з  $g$ -го

кластера на станцію  $i.x$  в  $i$ -м кластері, якщо станція  $i.z$  є точкою виходу до  $j$ -го кластера

Змінні стану на обох рівнях управління повинні задовольняти обмеженням, аналогічним (2). Управляючі змінні повинні бути розраховані з урахуванням наступних правил. Оскільки для кожного кластера передбачається свій пул слотів  $\Theta_i$ , ненульові значення змінних  $\tau_{i,h}^{ULr,j}(k)$  або  $\tau_{i.x,i.z}^{LLr,i,s}(k)$  для  $i$ -го кластера можливі, якщо і тільки якщо  $r \in \Theta_i$ . Повторне використання (призначення) слотів можливе в кластерах, в яких доступний один й той самий пул слотів. При цьому в рамках кластера кожен слот може бути використаний лише один раз, або верхнім, або нижнім рівнем управління:

$$\sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^{N_{cl}} \sum_{\substack{l=1, \\ l \neq i}}^{N_{cl}} \tau_{i,j}^{ULr,l}(k) + \sum_{x=1}^{N_v^i} \sum_{z=1}^{N_v^i} \sum_{\substack{s=1, \\ s \neq x}}^{N_v^i} \tau_{i.x,i.z}^{LLr,i,s}(k) \leq 1 \quad \Theta_i, \quad \forall r \in \Theta_i, \quad i = \overline{1, N_{cl}}. \quad (14)$$

Таким чином, задача маршрутизації між кластерами і розподілу слотів у зовнішніх каналах може бути формалізована як оптимізаційна задача ВР

$$J^{UL} = \sum_{k=1}^a \left[ \bar{q}^{ULT}(k) W_q^{UL} \bar{q}^{UL}(k) + \bar{\tau}^{ULT}(k) W_{\tau}^{UL} \bar{\tau}^{UL}(k) - \bar{\tau}^{ULT}(k) W_{reuse}^{UL} \bar{\tau}^{UL}(k) \right] \rightarrow \min \quad (15)$$

за обмежень (2), (12), (14) і при відомих змінних НР  $\tau_{i.x,i.z}^{LLr,i,s}(k)$ , де  $\bar{q}^{UL}(k)$ ,  $\bar{\tau}^{UL}(k)$  – вектори змінних стану і управління на ВР відповідно;  $W_q^{UL}$ ,  $W_{\tau}^{UL}$  – діагональні матриці вагових коефіцієнтів використання буферних і каналних ресурсів на ВР відповідно;  $W_{reuse}^{UL}$  – вагова матриця, що представляє виграш за рахунок повторного використання слотів на ВУ.

У свою чергу задача маршрутизації й розподілу слотів всередині кластерів може бути формалізована як оптимізаційна задача НР

$$J_i^{LL} = \sum_{k=1}^a \left[ \bar{q}_i^{LLT}(k) W_i^{qLL} \bar{q}_i^{LL}(k) + \bar{\tau}_i^{LLT}(k) W_i^{\tau LL} \bar{\tau}_i^{LL}(k) \right] \rightarrow \min \quad (16)$$

за обмежень (2), (13), (14) і при відомих змінних ВР  $\tau_{i,h}^{ULr,j}(k)$ , де  $\bar{q}_i^{LL}(k)$ ,  $\bar{\tau}_i^{LL}(k)$  – вектори змінних стану і управління на НР відповідно;  $W_i^{qLL}$ ,  $W_i^{\tau LL}$  – відповідно діагональні матриці вагових коефіцієнтів використання буферних і каналних ресурсів на нижньому рівні управління.

На основі динамічної моделі (2), (12) – (16) запропоновано метод ієрархічної маршрутизації, що передбачає сукупність центрів управління нижнього рівня (Lower Level Control Center, LLCC), присутніх в кожному кластері мережі, і єдиного центру управління верхнього рівня (Upper Level Control Center, ULCC). Кожна MSS пересилає тому центру LLCC, під керуванням якого вона знаходиться, інформацію про стан своїх каналів (топологічну інформацію, тип

модуляції і швидкість кодування), а також обсяги абонентського навантаження, що надходить до мережі. У свою чергу центри управління кластерами LLCC транслують зібрану інформацію центру управління мережею ULCC. Центром управління верхнього рівня розв'язується задача розрахунку кількості пулів слотів і їх призначення кластерам мережі, що формалізується як задача розфарбування графа конфліктів кластерів. На етапі ініціалізації пули слотів можуть бути визначені рівними за розмірами, а потім перераховані (скориговані) пропорційно до навантаження, що обслуговується відповідними кластерами.

Центр управління мережею ULCC розв'язує задачу міжкластерної маршрутизації і призначення часових слотів в зовнішніх каналах шляхом мінімізації (15) за обмеженнях (2), (12), (14) і при відомих змінних НР, де невідомими є змінні  $\bar{\tau}^{UL}(k)$ . Для її розв'язання відомою вважається інформація про інтенсивність агрегованого зовнішнього трафіка  $\bar{\xi}^{UL}(k) = \{\xi_{i,j}^{UL}(k)\}$ , яка була отримана на основі вимірювань, оцінки та прогнозування інтенсивності трафіка, який надходить на кожну станцію.

Результуюче рішення оптимізаційної задачі (15) у вигляді векторів  $\bar{\tau}^{UL}(k)$  та  $\bar{\xi}_i^{ext}(k) = \{\xi_{i,x,i,z}^{ext}(k)\}$  буде спущено центрам управління нижнього рівня кожного кластера,  $i = \overline{1, N_{cl}}$ . На підставі вектору  $\bar{\tau}^{UL}(k)$  центри управління LLCC визначають точки входу і виходу для транзитних потоків і обсяги трафіка  $\bar{\xi}_i^{ext}(k)$ , які при цьому передаються. В результаті кожен центр управління НР володіє достатньою інформацією для того, щоб розв'язати оптимізаційну задачу (16) за обмеженнях (2), (13), (14) і при відомих змінних ВР  $\tau_{i,h}^{ULr,j}(k)$  та розрахувати вектор розподілу слотів всередині власного кластера  $\bar{\tau}_i^{LL}(k)$ .

Метод передбачає застосування розрахованих векторів управління після кожного циклу взаємодії між нижнім і верхнім рівнями, реалізуючи тим самим принцип послідовного поліпшення. Після реалізації розрахованих векторів  $\bar{\tau}^{UL}(k)$  та  $\bar{\tau}_i^{LL}(k)$  на  $k$ -му інтервалі управління поточний стан мережі (коефіцієнт використання каналних і буферних ресурсів) вимірюються. Результати вимірювань пересилаються на верхній рівень, що дозволяє оцінити поточну якість обслуговування і визначає необхідність розрахунку пулів слотів.

**Четвертий розділ** роботи присвячений оцінці ефективності розроблених моделей і методів маршрутизації в WiMAX mesh-мережах на основі розподілу їх каналних ресурсів. Результати дослідження базової моделі продемонстрували багатопляховий характер передачі трафіка, що дозволяє мінімізувати кількість використовуваних слотів; збалансоване використання як каналних, так і буферних ресурсів, що потенційно веде до зниження ймовірності перевантажень, а за наявності ділянок високої завантаженості дозволяє передати трафік по обхідних маршрутах, не доводячи рівень завантаженості до критичного; відповідність маршруту до інтенсивності трафіка, який ним передається, що озна-

чає гарантовану наявність необхідної кількості вільних часових слотів уздовж маршруту.

Показано, що запропонована модель WiMAX mesh-мережі з гарантованою якістю обслуговування забезпечує пошук таких маршрутних рішень, за яких не тільки гарантується виконання заданих швидкісних і часових показників якості обслуговування, а й досягається затримка, мінімально можлива в умовах наявної кількості доступних слотів. На рис.1 представлені результати моделювання WiMAX mesh-мережі, що містить 11 станцій і 20 радіоканалів і надає два класи обслуговування, де в рамках першого класу гарантувалися швидкісні і часові показники QoS, а в рамках другого – тільки швидкісні. Доставка в рамках одного фрейма означає, що всі слоти розподілені уздовж використовуваних шляхів послідовно (тобто без порушення черговості) і  $D'_{s-d} < T_F$ , де  $D'_{s-d} = D_{s-d} + 2T_S$ . Доставка в рамках двох фреймів означає, що затримка «з кінця в кінець» включає в себе щонайменше 1 цілий фрейм, тобто  $D'_{s-d} > T_F$ .

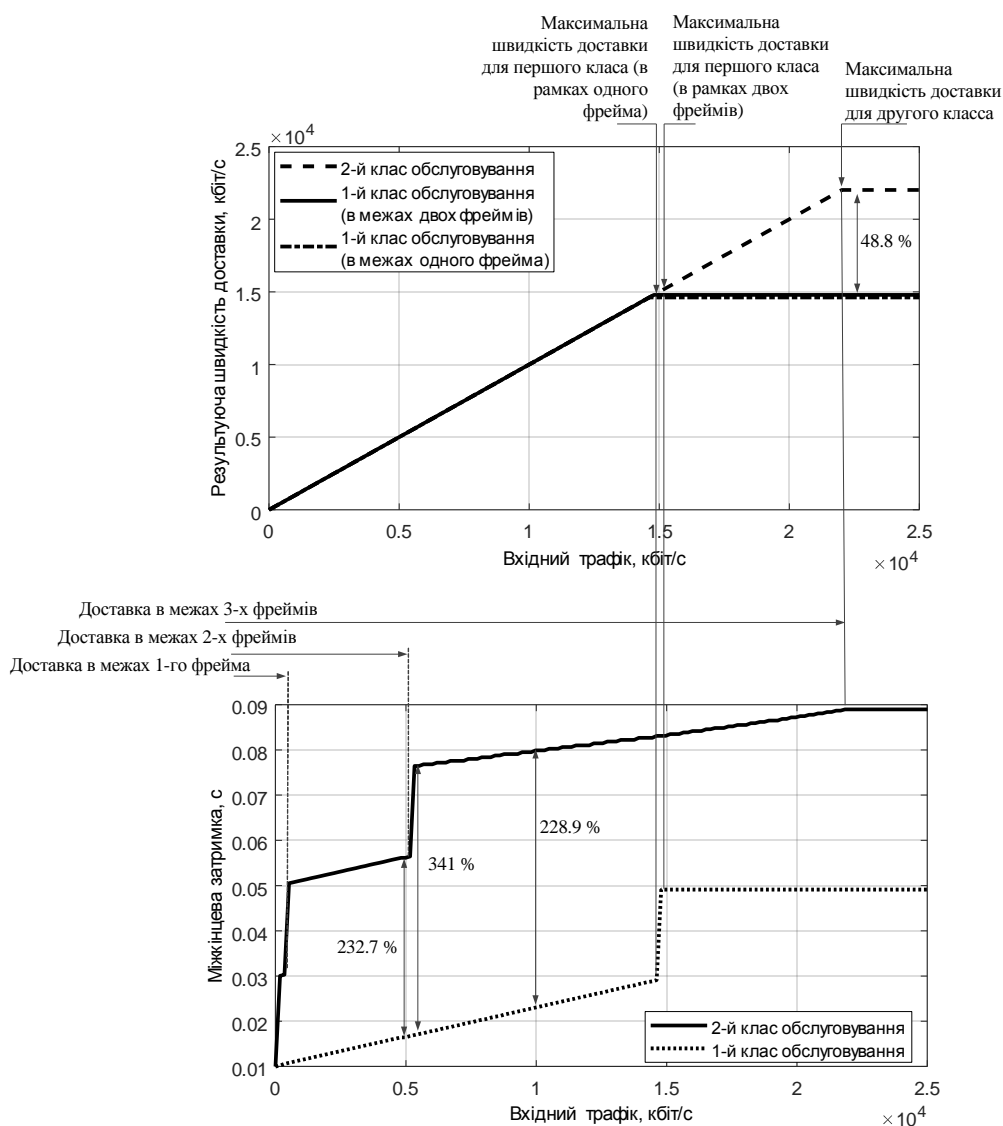


Рис. 1. Залежність результуючої швидкості передачі й міжкінцевої затримки від інтенсивності надходження трафіка

Реалізація багатошляхової стратегії маршрутизації в WiMAX mesh-мережі забезпечує підвищення швидкості передачі трафіка на 30 – 100% за тієї ж кількості наявних ресурсів (зокрема слотів) і з виконанням при цьому часових QoS-вимог користувача (рис. 2). При цьому максимальна швидкість передачі, яка може бути досягнута, наближається до пропускну здатності мережі. Показано, що максимальний потік для другого класу обслуговування становить  $(N_F \times R_s):2$ , а для першого класу обмежений зверху величиною  $(N_F \times R_s):3$ , де  $R_s$  – швидкість передачі, що досягається в прямому радіоканалі при використанні одного слота.

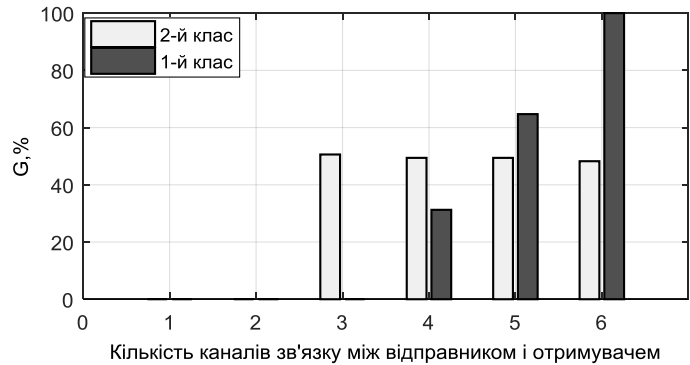


Рис. 2. Виграш в швидкості передачі трафіка в WiMAX mesh-мережі за рахунок багатошляхової маршрутизації (G, %)

Показано, що в рамках запропонованого методу ієрархічної маршрутизації забезпечується підвищення масштабованості за рахунок зниження розмірності векторів управління BP і HP. На рис. 3 показано відношення загальної кількості управляючих змінних в рамках ієрархічного методу до кількості управляючих змінних в моделі без декомпозиції (величина  $G_{dim}$ ). Відзначено, що зростання розміру кластерів чинить негативний вплив на ефективність використання слотів, яка оцінювалася через коефіцієнт потоку на слот  $K_{fps}$ , що відображає, у скільки разів більше використовується слотів для обслуговування заданого трафіка в порівнянні з випадком прямого радіоканалу. Верхня межа коефіцієнта  $K_{fpsmax}$  визначає максимальний потік для заданої пари адресатів, що досягається при використанні всієї множини доступних в мережі слотів, і залежить від відстані між станціями відправником і отримувачем (рис. 4).

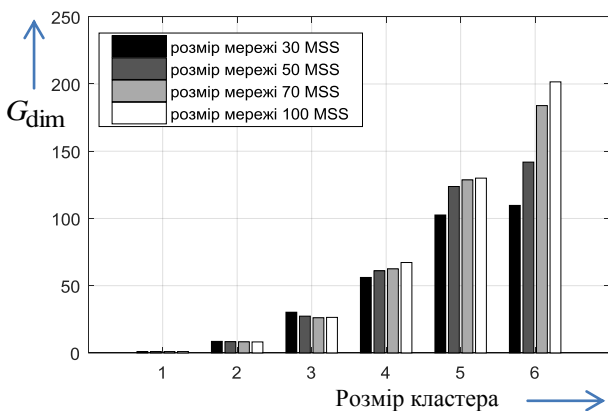


Рис. 3. Залежність  $G_{dim}$  від розміру кластера і розміру мережі (хроматичне число мережі  $\chi(G)=5$ )

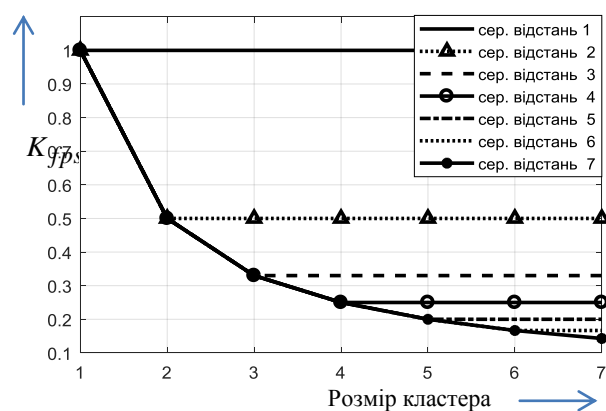


Рис. 4. Залежність  $K_{fpsmax}$  від розміру кластера для різних відстаней між відправником і отримувачем

З метою одночасного врахування ефективності використання слотів і зниження розмірності задач, які розв'язуються, був введений інтегральний показник ефективності ієрархічної маршрутизації  $I = K_{fp_{smax}} G_{dim}$ , що допомагає виявити оптимальний розмір кластера (рис. 5).

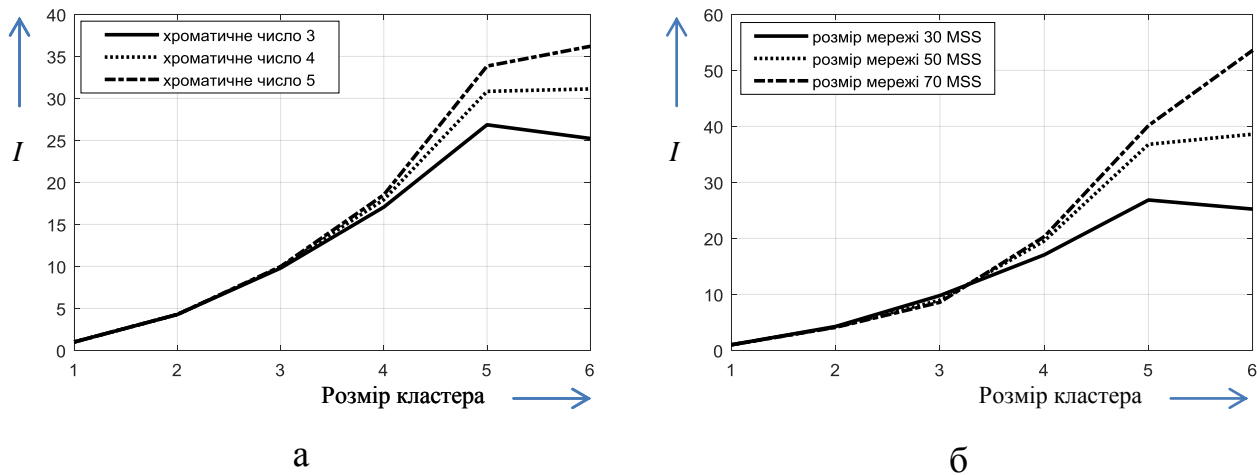


Рис. 5. Залежність  $I$  від розміру кластера  
(а –  $N_v=30$ ,  $dist_{av}(s,t)=3$ ; б –  $\chi(G)=3$ ,  $dist_{av}(s,t)=3$ )

Показано, що оптимальний розмір кластера залежить від розміру і структури mesh-мережі, і, наприклад, для WiMAX mesh-мережі, що об'єднує 30 станцій, дорівнює 5, і зростає зі збільшенням розмірів мережі.

В якості основної області застосування розроблених моделей і методів маршрутизації вказані програмно-конфігуровані безпроводові mesh-мереж SD-WMN, де задачі маршрутизації й розподілу каналних ресурсів покладаються на контролер мережі й розв'язуються централізовано на основі глобальної інформації про її стан. Для взаємодії SD-WMN-контролера з mesh-станціями передбачається використовувати протокол OpenFlow.

## ВИСНОВКИ

В роботі вирішена актуальна науково-прикладна задача, пов'язана з вдосконаленням методів маршрутизації в WiMAX mesh-мережах з гарантованою якістю обслуговування на основі розподілу їх каналних ресурсів шляхом розробки нових динамічних потокових математичних моделей і методів, спрямованих на підвищення ефективності використання ресурсів і продуктивності безпроводової мережі в цілому. За результатами розв'язання поставленої науково-прикладної задачі можна зробити такі висновки:

1. Проведений в роботі аналіз показує, що mesh-режим функціонування мереж WiMAX поряд з такими перевагами як гнучкість побудови, розширення зони покриття, висока надійність доставки трафіка, стійкість до відмов і потенційно більш ефективного використання мережевих ресурсів, веде до ускладнення задач управління, перш за все маршрутизації. Виходячи зі специфіки побудови mesh-мереж, задача маршрутизації в них нерозривно пов'язана з процедурами розподілу каналних ресурсів, в якості яких в рамках WiMAX mesh-мережі виступають часові слоти.



2. Оскільки стандартом IEEE 802.16 не визначено алгоритми маршрутизації й розподілу слотів і їх закріплення за конкретними станціями або потоками трафіка, в літературі запропонована велика кількість відповідних протоколів і методів. Їх аналіз продемонстрував, що найчастіше зазначені задачі розглядаються відокремлено одна від одної і мають евристичний характер. З метою підвищення ефективності використання ресурсів WiMAX mesh-мереж, їх продуктивності і забезпечення QoS задача маршрутизації повинна трактуватися і розв'язуватися як задача розподілу каналних ресурсів (часових слотів). При цьому евристичні процедури повинні бути замінені на строго формалізовані методи, що дозволяють забезпечити динамічні, оптимальні і одночасно масштабовані управляючі рішення.

3. Аналіз представлених в літературі підходів до розв'язання задачі маршрутизації дозволив сформулювати основні вимоги до математичного опису WiMAX mesh-мереж, серед яких потоковий характер моделі, можливість реалізації кросрівневого підходу в строгому сенсі, гарантоване забезпечення QoS, багатошляхова стратегія доведення трафіка, спільне і збалансоване управління каналними і буферними ресурсами, можливість повторного використання слотів, урахування динаміки трафіка, що надходить на обслуговування, і високою територіальну розподіленість мережі. У відповідності з перерахованими вимогами заслуговують на увагу динамічні математичні моделі, представлені в просторі станів.

4. У роботі отримала подальший розвиток математична модель в просторі станів шляхом її адаптації для розв'язання задач маршрутизації на основі розподілу каналних ресурсів в WiMax mesh-мережі. Новизна моделі полягає у введенні булевих змінних управління, пов'язаних з призначенням часових слотів, розрахунок яких забезпечує потрібну сукупність маршрутів з одночасним розподілом слотів уздовж них, причому виділення ресурсів відбувається в обсязі, відповідному до інтенсивності трафіка, що надходить на обслуговування, тим самим досягається виконання швидкісних QoS-вимог. В рамках моделі задача маршрутизації формулюється як оптимізаційна, при цьому забезпечується урахування динамічного характеру трафіка і стану самої мережі, включаючи динаміку структури і сигнально-завадової обстановки, можливість управління як каналними, так і буферними ресурсами мережі, багатошляховий спосіб доставки трафіка і повторне використання слотів.

5. Запропонована динамічна математична модель WiMax mesh-мережі в просторі станів отримала подальший розвиток шляхом розширення її на мережі з гарантованою якістю обслуговування. Новизна моделі полягає у введенні швидкісних і часових показників QoS і механізму контролю послідовності часових слотів, що використовуються уздовж маршрутів, з метою зменшення міжкінцевої затримки. Як показали результати дослідження, модель WiMAX mesh-мережі з гарантованою якістю обслуговування забезпечує пошук таких маршрутних рішень, за яких досягається затримка, мінімально можлива в умовах заданої кількості доступних слотів.

6. Відмінною особливістю запропонованих моделей маршрутизації в WiMAX mesh-мережі є її багатошляховий характер, що, по-перше, забезпечує

збалансоване використання як каналних, так і буферних ресурсів, по-друге, дозволяє мінімізувати кількість використовуваних слотів. В цілому за рахунок багатошляхової стратегії маршрутизації в WiMAX mesh-мережі досягається підвищення швидкості передачі трафіка на 30 – 100% за тієї ж кількості наявних ресурсів (зокрема слотів) і з виконанням при цьому часових QoS-вимог користувача. При цьому максимальна швидкість передачі наближається до пропускної здатності мережі.

7. З метою забезпечення масштабованості управляючих рішень в роботі запропонована концепція ієрархічної кросрівневої маршрутизації в WiMAX mesh-мережі, в основу якої покладено ідею декомпозиції вихідної задачі управління на підзадачі. Її реалізація передбачає кластеризацію мережі, ієрархічну структуру управління, і розподіл всієї множини слотів, доступних для передачі трафіка користувача, на підмножини (пули), де кожному кластеру мережі виділяється свій пул слотів. У роботі пропонується розглядати задачу розрахунку необхідної кількості пулів слотів як задачу розрахунку хроматичного числа графа конфліктів кластерів, а задачу розподілу пулів слотів між кластерами – як задачу розфарбування цього ж графа. Причому якщо пули слотів можуть використовуватися одночасно декількома кластерами, то всередині кластера повторне використання слотів не допускається, що істотно спрощує задачу маршрутизації і розподілу слотів всередині кожного з них.

8. Відповідно до запропонованої концепції отримала подальший розвиток динамічна модель WiMAX mesh-мережі, представлена в просторі станів, що дозволило сформулювати задачу маршрутизації в кластерізованій мережі як послідовність розв'язуваних по черзі оптимізаційних задач внутрішньої і міжкластерної маршрутизації. На підставі розробленої моделі запропоновано метод ієрархічної кросрівневої маршрутизації, який забезпечує підвищення масштабованості за рахунок зниження розмірності векторів управління, динамічний характер управляючих рішень, можливість управління каналними і буферними ресурсами одночасно, спільне розв'язання задач маршрутизації і розподілу слотів, багатошляховий спосіб доставки трафіка і повторне використання слотів. Особливістю запропонованого методу ієрархічної маршрутизації є наявність оптимального розміру кластера, який, як показали результати моделювання, залежить переважно від розміру і структури mesh-мережі.

9. За своєю суттю розроблені моделі і методи маршрутизації орієнтовані на реалізацію концепції програмно-конфігурованих безпроводових mesh-мереж SD-WMN.

## **СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

1. Евсеєва О.Ю. Модель маршрутизации и распределения каналных ресурсов WiMax mesh-сети / О.Ю. Евсеєва, Эсса Мохаммед Аль-Аззави // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – 2014. – Вып. 176. – С. 214 – 220.

2. Yevsieieva O.Yu. Method of hierarchical cross-layer routing in 802.16 mesh networks. Clustering algorithm [Электронный ресурс] / O.Yu. Yevsieieva, E.M. Al-Azzawi // Проблеми телекомунікацій. – 2015. – № 1 (16). – С. 72 – 84. – Режим доступа к журн.: [http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151\\_yevsyeyeva\\_mesh.pdf](http://pt.journal.kh.ua/2015/1/1/151_yevsyeyeva_mesh.pdf).

3. Yevsyeyeva O. Mathematical model for resource allocation in TDMA-based wireless mesh networks / Oksana Yevsyeyeva, Essa Mohammed Al-Azzawi // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* – 2014. – Vol. 3, N 9(69). – P. 4 – 9.
4. Yevsieieva O.Yu. Centralized and hierarchical cross-layer routing in WiMAX mesh networks: performance analysis/ Oksana Yevsieieva, Essa Mohammed Al-Azzawi // *Системи обробки інформації.* – 2016. – № 2(139). – С. 98 – 105.
5. Evseeva O.Yu. Two level control algorithm for hierarchical cross-layer routing in 802.16 mesh networks / O.Yu. Evseeva, E. M. Al-Azzawi // *Telecommunications and Radio Engineering.* – 2015. – Vol.74, Is. 18. – P. 1619 – 1633.
6. Евсеева О.Ю. Модель маршрутизации в IEEE 802.16 mesh-сетях с гарантированным качеством обслуживания / О.Ю. Евсеева, Эсса Мохаммед Аль-Аззави // *Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, Ч. 1.* – Ростов-на-Дону.: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2014. – С. 127 – 130.
7. Yevsyeyeva O. Optimal Cross-Layer Routing in 802.16 Mesh Networks With Different Classes of Service / Oksana Yevsyeyeva, Essa Mohammed Al-Azzawi// *Scholars Journal of Engineering and Technology.* – 2015. –Vol. 3 (1A). – P. 21 – 32.
8. Евсеева О.Ю. Модель динамической маршрутизации в кластеризованной MESH-сети / О.Ю. Евсеева, Эсса Мохаммед Аль-Аззави // *Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики, Ч. I.* – Ростов-на-Дону: ПЦ «Университет» СКФ МТУСИ, 2015. – С. 30 – 33.
9. Nameer Q. The comparative analysis of VOIP networks for IMS and traditional based technology / Qasim Nameer, Essa Mohammed Al Azzawi, Ali Ihsan Abdulsahib Al-Ansar // *68-ма наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів, 4 – 6 грудня 2013 р.: матеріали конф., Ч. II.* – Одеса: ОНАЗ, 2013. – С. 33 – 34.
10. Аль-Аззави Э. М. Математическая модель маршрутизации и распределения канальных ресурсов WiMax сети в режиме Mesh / Эсса Мохаммед Аль-Аззави, О.Ю.Евсеева // *Проблемы телекоммуникаций: 8-ма Міжнар. наук.-техн. конф., 22–25 квітня 2014 р.: зб. тез.* – К.: НТУУ КПІ, 2014. – С. 111 – 114.
11. Al-Azzawi E. M. Mathematical models of cross-layered routing in 802.16 mesh networks / Essa Mohammed Al-Azzawi, Mushtaq Talib Al-Shuraifi // *Радіоелектроніка і молодь у XXI ст.: 18-й Міжнар. молодіжний форум: зб. матеріалів форуму, Т. 4.* – Харків: ХНУРЕ, 2014. – С.23 – 24.
12. Garkusha S. Model of transmission rate allocation Wimax with taking onto account the defined priorities / S. Garkusha, Essa Mohammed Al-Azzawi // *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2014): XII-th International Conference, February 25 – March 1, 2014: proc. of the conf.* – Lviv-Slavske: Publishing House of Lviv Polytechnic, 2014. – P. 504 – 506.
13. Yevsyeyeva O. An Algorithm for Clustering And Aggregation Of Wireless Mesh Network's Topology / Oksana Yevsyeyeva, Essa Mohammed Al-Azzawi // *Problems of Infocommunications. Science and Technology (PICS&T-2014): First International IEEE Conference, 14-17 October, 2014: proc. of the conf.* – Kharkiv, Ukraine, 2014. – P. 37 – 38.

14. Al-Azzawi E. M. Delay minimizing strategy for slot allocation in TDMA-based wireless mesh networks / Essa Mohammed Al-Azzawi // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: 4-та Міжнар. наук.-пр. конф., 30-31 жовт. 2014 р.: матеріали конф., Ч.3. – Одеса: ОНАЗ, 2014. – С. 54 – 57.

15. Al-Azzawi E. M. Choosing of optimality criterion for cross-layer routing in wimax mesh-networks / Essa Mohammed Al-Azzawi, O. Yu. Yevsyeyeva // 69-та наук.-техн. конф. професорсько-викладацького складу, науковців, аспірантів та студентів, 3 – 5 грудня 2014 р.: матеріали конф., Ч. II. – Одеса: ОНАЗ, 2014. – С. 33 – 35.

16. Al-Azzawi E. M. Hierarchical approach for traffic control in clustered wireless mesh networks / Essa Mohammed Al-Azzawi // Радіоелектроніка і молодь у XXI ст.: 19-й міжнар. молодіжний форум: зб. матеріалів форуму, Т. 4. – Харків: ХНУРЕ, 2015. – С. 9 – 10.

17. Al-Azzawi E. M. Performance analysis of routing in wireless MESH-networks based on model in space of states / Essa Mohammed Al-Azzawi, O. Yu. Yevsyeyeva // Проблеми телекомунікацій (ПТ-2015): IX Міжнар. наук.-техн. конф.: зб. матеріалів конф. – К.: НТУУ «КПІ», 2015. – С. 228 – 230.

18. Yevsieieva O. Choosing of Optimal Cluster Size in WiMax Mesh Network Under Hierarchical Cross-Layer Routing / Oksana Yevsieieva, Essa Mohammed Al-Azzawi // Problems of Infocommunications. Science and Technology (PICS&T-2015): Second International IEEE Conference, 13-15 October, 2015: proc. of the conf. – Kharkiv, Ukraine, 2015. – P. 29 – 32.

19. Al-Azzawi E. M. Estimation of performance of TDMA-based wireless mesh networks / Essa Mohammed Al-Azzawi // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: 5-та Міжнар. наук.-пр. конф., 29-30 жовт. 2015 р.: матеріали конф., Ч.3. – Одеса: ОНАЗ, 2015. – С. 4 – 6.

## АНОТАЦІЯ

*Аль-Аззаві Е. М.* Динамічні моделі і методи маршрутизації на основі розподілу ресурсів для WiMAX мереж в режимі mesh. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі (17 – Електроніка та телекомунікації). – Одеська національна академія зв'язку ім. О. С. Попова, Одеса, 2017.

Дисертаційна робота присвячена вдосконаленню методів маршрутизації в WiMAX mesh-мережах з гарантованою якістю обслуговування на основі розподілу їх каналних ресурсів шляхом розробки нових динамічних потокових математичних моделей і методів з метою підвищення ефективності використання ресурсів і продуктивності безпроводова мережі в цілому. В роботі запропоновано динамічну математична модель в просторі станів, яка забезпечує розрахунок сукупності маршрутів з одночасним розподілом часових слотів в WiMax mesh-мережі. Запропонована математична модель WiMax mesh-мережі отримала подальший розвиток шляхом розширення її на мережі з гарантованою якістю обслуговування. З метою підвищення масштабованості запропоновано метод ієрархічної маршрутизації для кластеризованої WiMAX mesh-мережі, що до-

зволило сформулювати задачу маршрутизації в мережі як послідовність оптимізаційних задач внутрішньої і міжкластерної маршрутизації, які розв'язуються по черзі і взаємно координуються.

**Ключові слова:** безпроводова mesh-мережа, модель в просторі станів, розподіл слотів, кросрівнева маршрутизація, гарантована якість обслуговування, багатошляхова маршрутизація, ієрархічна маршрутизація.

### АННОТАЦІЯ

*Аль-Аззави Е. М.* Динамические модели и методы маршрутизации на основе распределения ресурсов для WiMAX сетей в режиме mesh. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети (17 – Электроника и телекоммуникации). – Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова, Одесса, 2017.

Диссертационная работа посвящена совершенствованию методов маршрутизации в WiMAX mesh-сетях с гарантированным качеством обслуживания на основе распределения их канальных ресурсов путем разработки новых динамических потоковых математических моделей и методов с целью повышения эффективности использования ресурсов и производительности беспроводной сети в целом.

Mesh-режим функционирования сетей WiMAX наряду с такими преимуществами как гибкость построения, расширение зоны покрытия, высокая надежность доставки трафика, устойчивость к отказам и потенциально более эффективное использование сетевых ресурсов, ведет к усложнению задач управления, прежде всего маршрутизации. Исходя из специфики построения mesh-сетей, задачи маршрутизации в них неразрывно связаны с процедурами распределения канальных ресурсов, в качестве которых в рамках WiMAX mesh-сети выступают временные слоты. Анализ известных алгоритмов маршрутизации и распределения слотов в WiMAX mesh-сетях продемонстрировал, что зачастую указанные задачи рассматриваются изолированно друг от друга и носят эвристический характер. С целью повышения эффективности использования ресурсов беспроводных сетей, их производительности и обеспечения QoS задача маршрутизации должна трактоваться и решаться как задача распределения канальных ресурсов (временных слотов), а эвристические процедуры должны быть заменены на строго формализованные методы.

В этой связи в работе получила дальнейшее развитие математическая модель в пространстве состояний путем ее адаптации для решения задач маршрутизации на основе распределения канальных ресурсов в WiMax mesh-сети. Новизна модели состоит во введении булевых переменных управления, связанных с назначением временных слотов, расчет которых обеспечивает искомую совокупность маршрутов с одновременным распределением слотов вдоль них, причем выделение ресурсов производится в объеме, соответствующем интенсивности поступающего на обслуживание трафика. В рамках модели задача маршрутизации формулируется как оптимизационная, при этом обеспечивается учет

динамического характера поступающих на обслуживание пользовательских потоков и состояния самой сети, возможность управления как канальными, так и буферными ресурсами сети, многопутевой способ доставки трафика и повторное использование слотов.

Предложенная динамическая математическая модель WiMax mesh-сети в пространстве состояний получила дальнейшее развитие путем расширения ее на сети с гарантированным качеством обслуживания. Новизна модели состоит во введении скоростных и временных показателей QoS и механизма контроля последовательности временных слотов, используемых вдоль маршрутов, с целью уменьшения межконцевой задержки. Как показали результаты исследования, модель WiMAX mesh-сети с гарантированным качеством обслуживания обеспечивает поиск таких маршрутных решений, при которых достигается задержка, минимально возможная при данном количестве доступных слотов.

Многопутевой характер доставки трафика обеспечивает сбалансированное использование канальных и буферных ресурсов и позволяет минимизировать количество используемых слотов, за счет чего достигается повышение скорости передачи трафика на 30 – 100% при том же количестве числе слотов и с выполнением при этом временных QoS-требований пользователя. При этом максимальная скорость передачи, которая может быть достигнута в соответствии с предлагаемой моделью, приближается к пропускной способности сети.

С целью обеспечения масштабируемости управляющих решений в работе предложена концепция иерархической кроссуровневой маршрутизации в WiMAX mesh-сети. Ее реализация предполагает кластеризацию сети, иерархическую структуру управления, и деление всего множества слотов, доступных для передачи пользовательского трафика, на подмножества (пулы), где каждому кластеру сети выделяется свой пул слотов. В работе предлагается рассматривать задачу расчета необходимого количества пулов слотов как задачу расчета хроматического числа графа конфликтов кластеров, а задачу распределения пулов слотов между кластерами – как задачу раскраски этого же графа. Причем пулы слотов могут использоваться одновременно несколькими кластерами, а внутри кластера повторное использование слотов не допускается. В соответствии с предложенной концепцией получила дальнейшее развитие динамическая модель WiMAX mesh-сети, представленная в пространстве состояний, что позволило сформулировать задачу маршрутизации в кластеризованной сети как последовательность поочередно решаемых оптимизационных задач внутренней и межкластерной маршрутизации. Предложенный подход обеспечивает повышение масштабируемости за счет снижения размерности векторов управления, динамический характер управляющих решений, возможность управления канальными и буферными ресурсами одновременно, совместное решение задач маршрутизации и распределения слотов, многопутевой способ доставки трафика и повторное использование слотов. Особенностью предлагаемого метода иерархической маршрутизации является наличие оптимального размера кластера, который, как показали результаты моделирования, зависит преимущественно от размера и структуры mesh-сети.

**Ключевые слова:** беспроводная mesh-сеть, модель в пространстве состояний, распределение слотов, кроссуровневая маршрутизация, гарантированное качество обслуживания, многопутевая маршрутизация, иерархическая маршрутизация.

### ABSTRACT

*Al- Azzawi E. M.* Dynamic models and methods of routing based on resource allocation for WiMAX network in mesh mode. – Qualifying scientific work with manuscript copyrights.

Dissertation for obtaining the candidate of technical sciences degree in specialty 05.12.02 “Telecommunication systems and networks” (17 – Electronics and telecommunications). – Odessa National A.S.Popov Academy of Telecommunications, Odessa, 2017.

The dissertation is devoted to improving of methods for routing in WiMAX mesh-networks with guaranteed quality of service based on allocation of their link resources through the development of new dynamic flow-based mathematical models and methods in order to improve the efficiency of resource use and performance of wireless networks in whole. A dynamic mathematical model in space of states that provides route calculation together with the simultaneous allocation of time slots in WiMax mesh-network was offered. The offered mathematical model WiMax mesh-network was developed by extending it to the network with a guaranteed quality of service. In order to improve the scalability of the mathematical model a method of hierarchical routing in clustered WiMAX mesh-network was proposed. The method formulates the routing problem in the clustered network as a sequence of optimization problems of internal (inside cluster) and external (between clusters) routing which are solved one by one and mutually coordinated.

**Keywords:** wireless mesh-network, model in space of states, cross-layer routing, allocation of slots, guaranteed quality of service, multipath routing, hierarchical routing.

Підписано до друку 6.12.2017.  
Формат 60/88/16 Обсяг 0,9 друк. арк.  
Тираж 100 прим. Зам. № 6144.  
Віддруковано в редакційно-видавничому центрі ОНАЗ ім. О.С. Попова  
м. Одеса, вул. Ковалевського, 5  
Тел. 7050 494  
© **ОНАЗ, 2017**