

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**БАК РОМАН ІВАНОВИЧ**



УДК 621.396

**ПІДВИЩЕННЯ ДОСТУПНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ В  
МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - кандидат технічних наук, доцент  
**Чайковський Ігор Борисович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
доцент кафедри телекомунікацій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент  
**Отрох Сергій Іванович**,  
Державний університет телекомунікацій, завідувач  
кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій;

кандидат технічних наук, старший науковий  
співробітник  
**Скулиш Марія Анатоліївна**,  
Національний технічний університет України  
"Київський політехнічний інститут імені Ігоря  
Сікорського", доцент кафедри інформаційно-  
телекомунікаційних мереж.

Захист дисертації відбудеться "30" листопада 2018р. о 14:30 год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. Професорська, 2, ауд. 218 XI навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "27" жовтня 2018 р.

*Учений секретар спеціалізованої  
вченої ради*



І.В. Демидов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Щорічно збільшуються об'єми передавання інформації через мережі мобільного зв'язку, однак модернізація та ущільнення коміркової структури відбуваються лише у процесі розширення або за неможливості забезпечення достатнього рівня якості телекомунікаційних послуг існуючими засобами.

Популярність інформаційних сервісів та соціальних мереж спричинила стрімке зростання об'ємів мультимедійної інформації. Відповідно, бажана швидкість доступу до Інтернету щорічно зростає, що позначається на ресурсах мереж як локального, так і глобального рівня. Звідси виникає протиріччя між доступною для абонента часткою радіоресурсу і потребою надання абонентам доступу до мереж мобільного зв'язку в будь-якому місці і в будь-який час. Найефективнішим способом розв'язання цього протиріччя, з точки зору втрат запитів на телекомунікаційні послуги, є збільшення кількості базових станцій шляхом ущільнення коміркової структури в усіх сегментах мережі, де коли-небудь були зафіксовані перевантаження. Однак, міграція та динамічний характер абонентського навантаження призводять до того, що такий підхід є надзвичайно дорогим. З точки зору постачальників послуг економічна ефективність системи превалює над технічною доцільністю, тому вони нарощують кількість базових станцій (БС) тільки у місцях, де перевантаження мають регулярний характер. Відповідно, підвищення доступності телекомунікаційних послуг для абонентів у мережах мобільного зв'язку в умовах пікових навантажень значною мірою залежить від ефективності методів керування радіоресурсами, велика частина яких пов'язані із балансуванням абонентського навантаження.

Питаннями розроблення методів підвищення доступності телекомунікаційних послуг для абонентів коміркових мереж мобільного зв'язку займалися такі іноземні та українські вчені Klaus I. Pedersen, Lin Zhang, Berna Sayrac, Weidong Wang, Wenyu Li, Гаркуша С.В., Безрук В.М., Уривський Л.О., Воропаєва В. Я та інші.

Проте, досі не до кінця розв'язаними залишаються завдання динамічного розподілу абонентського навантаження, при якому водночас можуть задіюватись якомога більша кількість доступних ресурсів мережі та враховуватись вимоги до якості надання послуг і ефективності використання каналів зв'язку.

Отже, розроблення моделей, методів та алгоритмів підвищення доступності телекомунікаційних послуг шляхом балансування абонентського навантаження під час пікових навантажень на окремі сегменти мереж мобільного зв'язку з забезпеченням вимог до якості надання телекомунікаційних послуг без залучення додаткових ресурсів є актуальним науковим завданням.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційної роботи безпосередньо пов'язана з положеннями Постанови Верховної Ради України про «Концепцію національної інформаційної політики», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні», «Стратегії розвитку інформаційного суспільства в Україні», Закону України «Про основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки». Дисертаційні дослідження виконувались у відповідності до наукового напрямку кафедри телекомунікацій Національного університету

«Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі». Дисертаційна робота виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт: «Дослідження та розроблення телекомунікаційних мережних систем для застосувань телематики та телеметрії» (ДБ/КОМ), (2011-2012 рр.), № держреєстрації 0111U001223, «Методи побудови та моделі інформаційно – телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN – технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN) (2015-2016), № держреєстрації 0115U000444.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення доступності послуг зв'язку в коміркових мережах безпроводового доступу в умовах пікових навантажень на окремі сегменти мережі.

В межах дисертаційних досліджень сформульовано та розв'язано такі завдання:

1. Аналіз процесу керування мобільністю, методів та алгоритмів балансування навантаження у мережах мобільного зв'язку для визначення способів їх удосконалення.

2. Удосконалення моделей топологічних структур коміркових мереж для підвищення ефективності балансування абонентського навантаження.

3. Удосконалення методу балансування абонентського навантаження на рівні мережі радіодоступу у мережах мобільного зв'язку для підвищення їх доступності в моменти пікових навантажень на сегменти мережі, сформовані групами комірок.

4. Розроблення узагальненого методу оцінки ефективності використання каналу зв'язку, який одночасно враховує частотну та енергетичну ефективності функціонування системи.

5. Розроблення імітаційної моделі обслуговування викликів у мережах мобільного зв'язку, яка використовує запропоновані моделі та методи.

6. Моделювання та дослідження показників ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку із використанням запропонованих методів, моделей та алгоритмів.

**Об'єктом дослідження** в дисертації є процеси підтримки мобільності абонентів у коміркових мережах мобільного зв'язку.

**Предметом дослідження** є показники доступності телекомунікаційних послуг у коміркових мережах мобільного зв'язку в процесі балансування абонентського навантаження.

**Методи дослідження.** В процесі досліджень використано основи теорії безпроводового зв'язку (завдання дисертаційної роботи 4, 5, 6), теорію телетрафіку (завдання дисертаційної роботи 5, 6), теорію ймовірності та математичної статистики (завдання дисертаційної роботи 5, 6), методи аналітичного та імітаційного моделювання (завдання дисертаційної роботи 5, 6).

#### **Наукова новизна отриманих результатів.**

1. Вперше запропоновано ітераційний метод балансування абонентського навантаження у комірковій мережі радіодоступу, який відрізняється від відомих урахуванням у процесі розподілу доступних мережних ресурсів не лише сусідніх комірок, а й більш віддалених від цільової, враховує завантаженість комірок, тип абонентського навантаження, швидкість переміщення абонентського терміналу та

ефективність використання ним каналу зв'язку, забезпечує перенесення частки абонентського навантаження від перевантаженої до будь-якої доступної недовантаженої комірки мережі без зростання рівня втрат запитів.

2. Набула подальшого розвитку модель топологічної структури коміркової мережі мобільного зв'язку на основі графу, яка, на відміну від існуючих, враховує в процесі формування зв'язків між мережними елементами множину зайнятих користувачами ресурсів та їх стан стосовно сусідніх сегментів мережі, що дає змогу підвищити ефективність балансування абонентського навантаження.

3. Набув подальшого розвитку метод оцінювання ефективності використання каналу зв'язку, який, на відміну від відомих, використовує узагальнений критерій його частотної та енергетичної ефективності, шляхом урахування віддалі між межею Шеннона та точкою, що позначає частотну та енергетичну ефективності безпровідного інтерфейсу підсистеми радіомережі і дає змогу визначити оптимальну стратегію планування системи мобільного зв'язку.

#### **Практичне значення отриманих результатів:**

1. Розроблено алгоритм балансування абонентського навантаження у комірковій мережі мобільного зв'язку, який дає змогу до 15% зменшити втрати запитів в умовах пікових навантажень на окремі групи комірок.

2. Запропоновано методику визначення можливості перенесення частки абонентського навантаження в процесі його балансування, яка враховує швидкість переміщення абонентів, вимоги до якості надання телекомунікаційних послуг та ефективність використання радіоканалів.

3. Запропоновано методику пошуку напрямків для поетапного перенесення абонентського навантаження, яка враховує кількість проміжних секторів або комірок мережі мобільного зв'язку, завантаженість яких не зміниться в процесі балансування.

4. Розроблено алгоритм оптимізації призначення базових станцій (БС) у мережах 5G за кількістю і щільністю макро- і мікро- БС, який дає змогу від 30% до 40 % зменшити кількість активних БС для більшості сценаріїв розподілу навантаження зі збереженням достатньої якості обслуговування.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено:

– у ПП «Цифрові технології» (м. Львів) для вибору оптимальної стратегії планування мережі мобільного зв'язку шляхом оптимізації призначення базових станцій та оцінки ефективності використання каналу зв'язку;

– у навчально-науковому процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсів лекцій та лабораторних практикумів з дисциплін «Системи мобільного зв'язку» та «Технології мереж мобільного зв'язку».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях опублікованих у співавторстві авторові належать: [1] – досліджено особливості формування коміркової структури мережі та моделювання процесів обслуговування абонентів; у роботі [2] – оптимізація показників якості обслуговування в сегментах мережі мобільного зв'язку; [3, 9] – метод балансування абонентського навантаження у коміркових мережах мобільного зв'язку та модель топологічної структури коміркової мережі

мобільного зв'язку на основі теорії графів; [4] – розроблення та дослідження методу адаптивного управління розподілом радіочастотних ресурсів у мережі мобільного зв'язку наступного покоління; [5, 13] – розроблення методу визначення та порівняння ефективності використання каналу зв'язку; [6] – дослідження та розвиток концепції єдиної точки доступу до сервісу; [7, 10] – розроблення та дослідження методу оптимізації розподілу мережних ресурсів в системах мобільного зв'язку; [8] – дослідження методів балансування мультисервісного IP-навантаження; [11] – моделювання процесів оптимізації розміщення базових станцій у мережах 5G; [12] – дослідження методу балансування абонентського навантаження в гетерогенних мережах мобільного зв'язку; [14] – розроблення та моделювання підсистеми моніторингу стану термінального обладнання абонента.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень доповідалися та обговорені на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій» (м. Львів, 2012), «Computer Science & Engineering» (м. Львів, 2011), «Проблеми телекомунікацій» (м. Київ, 2016), «IEEE Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» (сmt. Поляна-Свалява, 2015, 2017), IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (м. Київ, 2017). Також результати роботи у повному обсязі обговорені на засіданнях та наукових семінарах кафедри телекомунікацій

**Публікації.** Основні положення та результати дисертації опубліковано у 14 наукових працях, з них 8 статей у наукових фахових виданнях, з яких 6 публікацій у наукових фахових виданнях України [1-6], 3 з яких у виданнях, що включені до науко-метричних баз [1-3], 2 – у наукових періодичних виданнях інших держав (Internet Things Eng. Appl, Канада; Int. J. Serv. Econ. Manag., Австрія) [7-8], 5 публікацій у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій [9-13], з них 3 проіндексовано у науко-метричній базі Scopus [9, 10, 12], 1 публікація в збірнику праць всеукраїнської науково-практичної конференції [14].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з анотації, переліку скорочень, вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 188 сторінок друкарського тексту, в тому числі 6 сторінок вступу, 102 сторінки основного тексту, 57 рисунків, список використаних джерел зі 121 найменування, 3 додатків.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** наведено основні концепції дисертаційної роботи. Відображено суть і стан наукового завдання, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету та окремі завдання дослідження, наукову новизну, практичну цінність. Наведено дані про результати роботи, їх практичне значення, апробацію цих результатів на наукових конференціях.

**В першому розділі** дисертації – «Аналіз методів, моделей та алгоритмів забезпечення доступності послуг у коміркових мережах мобільного доступу» – здійснено аналітичний огляд наукових праць за тематикою дисертаційних досліджень для встановлення умов та вимог щодо надання телекомунікаційних послуг у мережах мобільного доступу. Встановлено, що на процеси надання

телекомунікаційних послуг та забезпечення їх неперервності визначальний вплив мають механізми керування мобільністю та балансування абонентського навантаження.

Більшість методів балансування абонентського навантаження можна поділити на два основних типи: балансування навантаження за критерієм імовірності блокування запитів та балансування на основі показника завантаженості. Для першого типу характерним є менший об'єм службових даних, оскільки процес балансування починається тільки в момент перевищення порогового значення імовірності блокування запитів. Наприклад, розподіл навантаження між комірками проводиться шляхом зменшення радіусу перевантаженої та збільшення радіусу сусідніх до неї комірок за допомогою регулювання потужності випромінювання базових станцій.

Другий тип балансування навантаження є кращим з практичної точки зору, оскільки він враховує пропускну здатність і ступінь балансування навантаження як у виборі комірки, так і в процесі виконання хендоверу. Наприклад, процес балансування навантаження починається з найбільш завантаженої комірки з метою досягнення рівномірного завантаження у мережі.

Проте, усі розглянуті механізми в процесі балансування навантаження використовують ресурси тільки сусідніх комірок. Тому такі механізми не підходять для ситуацій, коли в умовах пікових навантажень перебувають групи із сусідніх комірок. Звідси випливає формулювання наукового завдання роботи.

**Другий розділ роботи – «Розроблення та дослідження методів і алгоритмів підвищення доступності послуг в коміркових мережах мобільного зв'язку»** – присвячено розробленню методів та алгоритмів для підвищення доступності в коміркових мережах мобільного доступу шляхом розроблення і застосування нового механізму балансування навантаження.

Для підвищення ефективності балансування навантаження запропоновано **модель коміркової структури мережі мобільного зв'язку** (рис. 1.а) у вигляді графа (без урахування (рис. 1.б) або з урахуванням перекриття несуміжних секторів (рис. 1.в)), де кожен вузол відповідає сектору комірки.

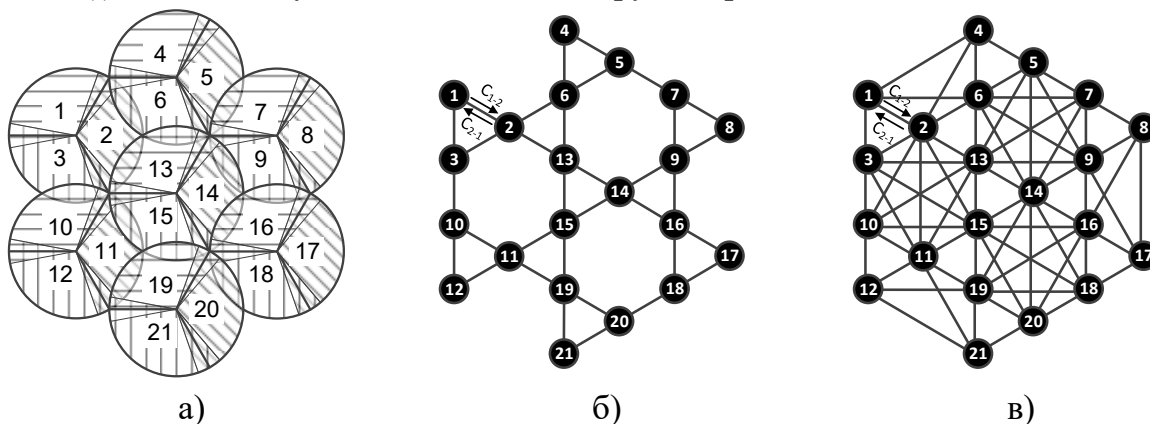


Рис. 1. Структурна модель мережі з трисекторними комірками: а) ідеальна коміркова структура мережі; б) граф без урахування перекриття несуміжних секторів; в) граф з урахуванням перекриття несуміжних секторів

З'єднання вузлів позначають існування спільної зони обслуговування для відповідних секторів, що є базовою умовою для можливості балансування навантаження у досліджуваній мережі.

Вагові коефіцієнти ребер (наприклад, для ребра 1–2) позначають величину пропускну здатності (або каналного ресурсу)  $C_{1-2}$ , яку використовують абоненти сектору 1, за умови, що рівень потужності сигналу  $Ps_2$ , який абоненти отримують із сектору 2, перевищує мінімальне робоче значення  $Ps_{\text{доп}}$ .

Кожен вузол графа характеризується коефіцієнтом завантаженості  $i$ -го сектору ( $K_i$ ):

$$K_i = \frac{C_i}{C_{i\max}}, \quad i = \overline{1, 2, \dots, N}, \quad (1)$$

де  $C_i$ ,  $C_{\max i}$  – зайнята та максимальна пропускну здатності  $i$ -го сектору;  $N$  – кількість секторів (вузлів графа).

Запропонований метод балансування абонентського навантаження у комірковій мережі мобільного зв'язку можна представити послідовністю із п'яти кроків:

**Крок 1.** Пошук сектору  $i$  з найбільшим коефіцієнтом завантаження  $K_i$ . Якщо коефіцієнт завантаження  $K_i$  не перевищує встановлене допустиме значення, наприклад  $K_{\text{доп}} = 0.8$ , то продовжуємо пошук.

Якщо  $K_i$  перевищує  $K_{\text{доп}}$ , то знаходимо мінімальну величину пропускну здатності  $C_{i\min}$ , яку необхідно вивільнити у секторі:

$$C_{i\min} = (K_i - K_{\text{доп}}) \cdot C_{\max i}, \quad K_i > K_{\text{доп}}. \quad (2)$$

Якщо існує вихід з вузла  $i$ , тобто

$$C_{i\min} \leq C_{i-x}, \quad (3)$$

де  $x$  - номер будь-якого сусіднього з  $i$ -им сектора, то переходимо до кроку 2, якщо ні – то починаємо крок 1 спочатку, і пропускаємо проаналізований сектор.

**Крок 2.** Пошук множини маршрутів  $H$  від вузла  $i$  до вузла  $j$ , в яких пропускну здатність шляхів не менша  $C_{i\min}$ , а коефіцієнт завантаження сектору  $j$  не перевищуватиме  $K_{\text{доп}}$  після перенесення в нього навантаження  $C_{i\min}$ :

$$H = \left\{ h_{ij} \mid \left( K_j > K_{\text{доп}} - \frac{C_{\min i}}{C_{\max j}} \right) \wedge (C_{h_{ij}} \geq C_{\min i}) \wedge (i \neq j) \right\}, \quad j = \overline{1, 2, \dots, N} \quad (4)$$

де  $h_{ij}$  – шлях від вузла  $i$  до вузла  $j$ .

**Крок 3.** Пошук у множині  $H$  шляху  $h_{ij}$  з мінімальним рангом  $R(h_{ij})$ :

$$R(h_{ij}) = \min(R(H)), \quad h_{ij} \in H. \quad (5)$$

**Крок 4.** Вибір терміналів у кожному вузлі (секторі) шляху  $h_{ij}$  (окрім сектору  $j$ ), для яких буде змінено сектор обслуговування.



Для кожного вузла  $n$  шляху  $h_{ij}$  формуємо множину  $A_n$  з усіх терміналів  $a_n$ , які обслуговуються в секторі  $n$ , отримують сигнал з достатнім рівнем потужності  $Ps_{a_{n+1}}$  для обслуговування із сектору  $(n+1)$  та мають якомога меншу середню швидкість переміщення, яка не перевищує встановленої допустимої  $V_{доп}$ :

$$A_n = \left\{ a_n \mid \left( Ps_{a_{n+1}} \geq Ps_{доп} \right) \wedge \left( V_{сер a_n} < V_{доп} \right) \right\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j). \quad (6)$$

Якщо виконується наступна умова:

$$\sum_{a_n \in A_n} C_{a_n} < C_{\min i}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (7)$$

де  $C_{a_n}$  - пропускна здатність, яку використовує термінал  $a$  в секторі  $n$ , то до множини  $A_n$  додаємо ще й термінали, у яких середня швидкість переміщення перевищує допустиму  $V_{доп}$ .

$$A_n = A_n \cup \left\{ a_n \mid \left( Ps_{a_{n+1}} \geq P_{доп} \right) \wedge \left( V_{доп} \leq V_{сер a_n} \right) \wedge (n \neq j) \right\}. \quad (8)$$

Так продовжуємо до тих пір, поки виконується умова (7).

Якщо умова (7) не виконується, то множину терміналів  $AB_n$  для зміни сектору обслуговування з  $n$  на  $(n+1)$  можна визначити як

$$AB_n = A_n, \quad (9)$$

при виконанні наступної умови:

$$C_{A_n} < C_{i \min}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (10)$$

де  $C_{A_n}$  – пропускна здатність, яку використовують термінали з множини  $A_n$ .

Якщо умова (10) не виконується, то з множин  $A_n$  формуємо множини терміналів  $B_n$ , керуючись типом сервісу ( $ToS$ ) (вищий пріоритет мають сервіси з меншою чутливістю до затримки та джиттеру):

$$B_n = \left\{ a_n \mid (a_n \in A_n) \wedge (ToS_{a_n} = q) \right\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j). \quad (11)$$

Якщо

$$\sum_{a_n \in B_n} C_{a_n} < C_{i \min}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (12)$$

то  $q = q - 1$ .

$$B_n = B_n \cup \left\{ a_n \mid (a_n \in A_n) \wedge (ToS_{a_n} = q) \right\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j). \quad (13)$$

Так продовжуємо, поки виконується умова (12).

Якщо умова не виконується, то множину терміналів  $AB_n$  для зміни сектору обслуговування з  $n$  на  $(n+1)$  можна визначити як:

$$AB_n = B_n, \quad (14)$$

при виконанні наступної умови

$$C_{B_n} < C_{\min i}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (15)$$

де  $C_{B_n}$  – мінімальна пропускна здатність, яку використовують термінали множини  $B_n$ .

Якщо умова (15) не виконується, то визначення множини  $AB_n$  відбувається за мінімальною швидкістю переміщення терміналів з множини  $B_n$ .

$$AB_n = \{a_n \mid (a_n \in B_n) \wedge (V_{cep a_n} = V_{\min B_n})\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (16)$$

де  $V_{B_n, \min}$  – мінімальна швидкість переміщення терміналів множини  $B_n$ .

Якщо

$$\sum_{a_n \in AB_n} C_{a_n} < C_{\min i}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (17)$$

то

$$B_n = B_n \setminus AB_n, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (18)$$

$$AB_n = AB_n \cup \{a_n \mid (a_n \in B_n) \wedge (V_{cep a_n} = V_{\min B_n})\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j). \quad (19)$$

Так продовжуємо до тих пір, поки виконується умова (17), тобто поки сумарна пропускна здатність, яку використовують термінали з множини  $AB_n$ , є меншою від величини, яку необхідно вивільнити у перевантаженому секторі. Якщо ж умова (17) не виконується, то переходимо до кроку 5.

**Крок 5.** Переміщення абонентського навантаження з сектору  $i$  в сектор  $j$ , тобто вимушений хендовер терміналів по шляху  $h_{ij}$ , починаючи з передостаннього в  $j$ -ий, і закінчуючи з  $i$ -го в другий.

Запропонований метод балансування навантаження використовує ресурси будь-якої недовантаженої комірки (превага надається найближчим, щоб мінімізувати кількість хендоверів) для збільшення доступності ресурсів перевантаженої. А у виборі терміналів для вимушеного хендоверу враховуються вимоги до якості надання послуг.

Як додатковий критерій для вибору частки навантаження запропоновано узагальнений показник ефективності використання каналу зв'язку – векторна відстань до межі Шеннона – **метод порівняння ефективності використання каналу зв'язку**. Цей показник визначає еквівалентне співвідношення енергетичної та частотної ефективності використання каналу зв'язку і дає змогу визначити оптимальну стратегію планування безпроводного доступу.

Критерій оптимальності  $D$  – мінімум векторної відстані до межі Шеннона (20):

$$D_{\min} = \min\{D_1, D_2, \dots, D_n\}. \quad (20)$$

Для вираження ефективності використання каналу зв'язку знаходимо максимум узагальненого показника ефективності (21):

$$D_{\max} = \max\{D_1, D_2, \dots, D_n\}. \quad (21)$$

Приріст ефективності для кожного з  $n$  абонентів визначається відносно найменш ефективного (22), тобто:

$$\Delta D_i = \left(1 - \frac{D_i}{D_{\max}}\right) \cdot 100\%, \quad (22)$$

де  $i = 1..n$  – індекс кожного абонента.

На рис. 2 наведено спосіб побудови узагальненого показника ефективності для двох абонентських терміналів при відомих їх частотній ( $\gamma$ ) та енергетичній ( $\beta$ ) ефективностях використання каналу зв'язку.

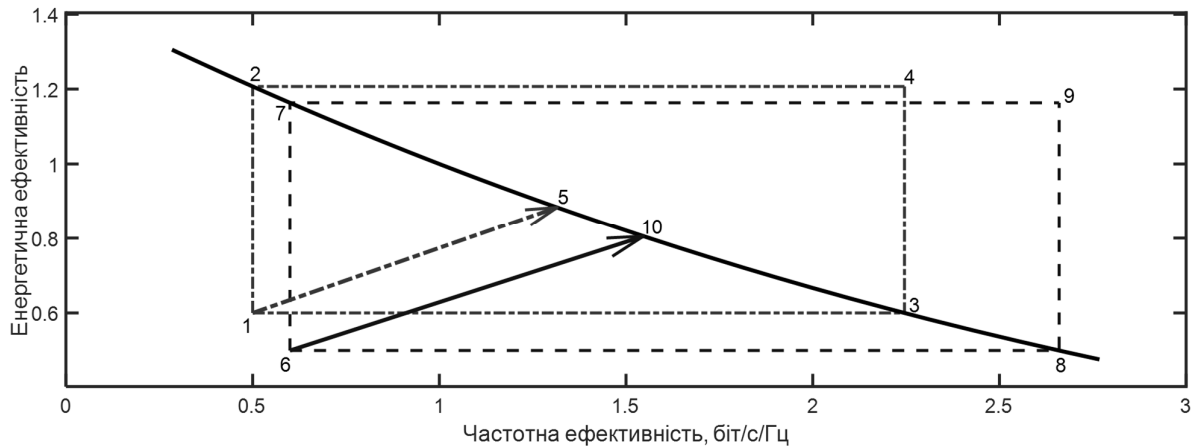


Рис. 2. Графічне відображення узагальненого показника ефективності використання каналу зв'язку для двох абонентських терміналів

Точка 1 ( $\gamma_1 = 0.5$ ,  $\beta_1 = 0.6$ ) та точка 6 ( $\gamma_2 = 0.6$ ,  $\beta_2 = 0.5$ ) відображають, відповідно, стани першого та другого терміналів стосовно їх частотних та енергетичних ефективностей відносно межі Шеннона. Величини  $D_1$  та  $D_2$  визначаються як модулі векторів (1,5) та (6,10), відповідно. Точки 5 та 10 знаходяться на перетині діагоналей 1-4 і 6-9 з межею Шеннона. Точки 4 та 9 – це дзеркальні проекції абонентів за межею Шеннона. Точки 2 і 3 та 7 і 8 – проекції точок 1 і 6 на криву межі Шеннона.

У третьому розділі дисертації – «**Моделювання процесу обслуговування абонентів у коміркових мережах мобільного доступу**» – розроблено імітаційну модель обслуговування викликів у комірковій мережі мобільного зв'язку, яка використовує запропонований метод балансування абонентського навантаження, метод оцінювання ефективності використання каналу зв'язку, а також модель коміркової структури мережі. Імітаційна модель враховує розподіли швидкостей та напрямів руху абонентів, та їх мережну активність в різний час протягом доби, реалізуючи, таким чином, різні сценарії їх переміщення та генерації навантаження. Урахування траєкторії руху абонентів дає змогу прогнозувати завантаження окремих зон коміркової мережі, що забезпечить підвищення ступеня балансування абонентського навантаження. Генерація активності абонентських терміналів відбувається з одночасним урахуванням тривалості комунікаційних сеансів, інтенсивності надходження запитів на їх початок, інтенсивностей початку та завершення їх обслуговування, та максимальної одночасної кількості сеансів у

системі, що дає змогу сформувати абонентське навантаження на радіомережу з локальними перевантаженнями.

На рис. 3 представлено приклади розподілу швидкостей переміщення ( $V_{аб}$ , км/год) абонентів, яких розділено на 8 груп (див. табл. 1). Ці приклади відображають специфіку поведінки абонентів в різний час протягом доби. Найбільша кількість абонентів завжди належить першій групі, що відповідає квазістатичному стану. Коли спостереження ведеться у період з 8:00 до 10:00 або з 16:00 до 19:00, то суттєво зростає частка абонентів у групах з 2 до 6, що відповідає періоду активної міграції абонентів між домом і місцем праці (рис. 3, а). В інший час, окрім нічного, розподіл абонентів відповідає ситуації на рис. 3, в. У темний період доби спостерігається зменшення динаміки переміщення абонентів (рис. 3, б).

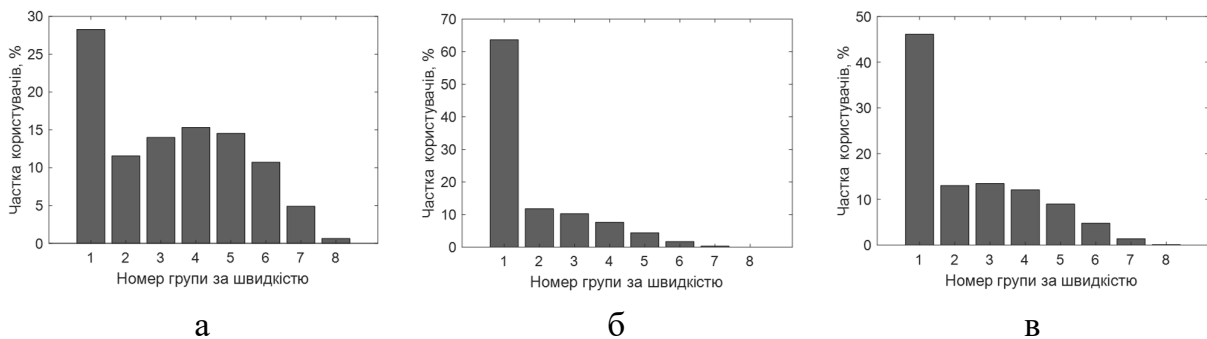


Рис.3. Варіанти розподілу абонентів на групи за швидкістю переміщення у різні періоди доби: а) з 8:00 до 10:00 або з 16:00 до 19:00; б) ніч; в) решта доби.

Для перевірки ефективності запропонованої моделі та методів було проведено моделювання процесу надання телекомунікаційних послуг у коміркових мережах мобільного зв'язку в умовах пікових навантажень на окремі сегменти мережі. Моделювання виконувалось з урахуванням наступних припущень: для кожного активного терміналу одночасно повинно бути не більше одного сеансу зв'язку; усі сеанси вимагають однакової пропускну здатності і мають однаковий пріоритет; сеанс вважається успішно завершеним, якщо його тривалість була такою ж, як запланована; сеанс втрачено, коли він не може розпочатися або закінчився достроково; коміркова структура однорідна з трьома секторами в кожній комірці; територія має прямокутну форму; користувачі не покидають задану область протягом часу моделювання; сектор стає перевантаженим, коли рівень його завантаженості перевищує задане порогове значення.

Перед початком процесу моделювання поведінки функціонування мережі відбувається генерація таких даних:

- індивідуальних траєкторій для кожного користувача (рис. 4);
- запланованої мережної активності для кожного користувача;
- коміркової структури, з урахуванням планованого навантаження для виникнення перевантажень.

Моделювання відбувається у два етапи з однаковими варіантами генерованих даних:

- звичайний етап, який передбачає використання лише базового балансування навантаження, тобто лише сусідні комірки беруть участь у процесі балансування;
- етап з використанням запропонованого методу балансування навантаження з багатоступеневим хендовером.

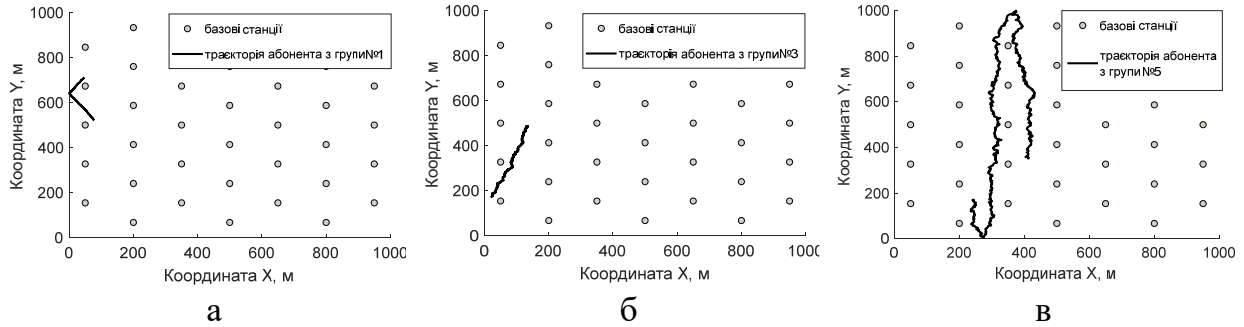


Рис. 4. Приклади траєкторії переміщення абонентів на заданому периметрі в процесі моделювання: а) для абонента групи 1; б) для абонента групи 3; в) для абонента групи 5

На рис. 5 показано кількість активних сеансів у системі протягом двох етапів моделювання: з базовим балансуванням навантаження та з використанням запропонованого методу балансування навантаження. Оскільки на початку моделювання в системі відсутні активні сеанси, то в діапазоні від 0 с до 100 с їх кількість стрімко зростає. Відповідно, результати на цьому інтервалі практично однакові для обох етапів, як показано на рис. 5-6.

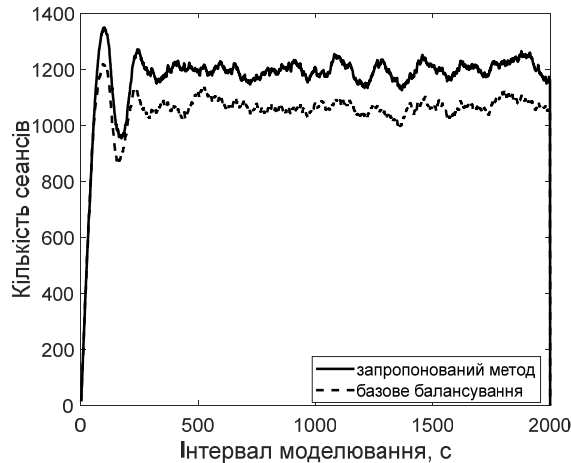


Рис. 5. Кількість активних сеансів в системі з базовим балансуванням навантаження та з використанням запропонованого методу

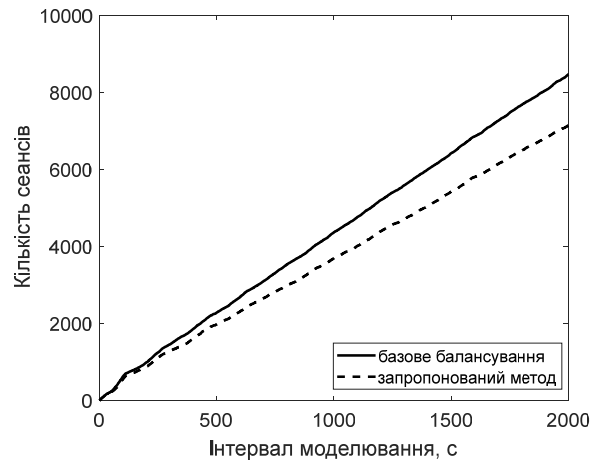


Рис. 6. Кількість втрат сеансів для етапу з базовим балансуванням навантаження та з використанням запропонованого методу

Далі, починаючи з 200 с, система входить у режим насичення, і помітно різницю у кількості активних сеансів (рис. 5) та втрат сеансів (рис. 6) для обох режимів роботи. Використання запропонованого методу балансування навантаження дає змогу зменшити кількість втрачених запитів на послуги до 15% в умовах пікових навантажень на сегмент мережі.

Вивільнення ресурсів у перевантажених секторах за допомогою цього методу супроводжується збільшенням кількості хендверів (рис. 7). В результаті збільшується об'єм службових даних, що може дещо знизити продуктивність мережі.

Середня кількість вивільнень ресурсів та середня кількість вимушених хендверів, які використовуються лише для балансування навантаження, постійно зростає, починаючи з 40 секунди моделювання (рис. 8). Якщо тривалість пікового навантаження на мережу займатиме тривалий час, то середні кількості вивільнень ресурсів та середні кількості вимушених хендверів досягнуть максимуму і перестануть зростати, що починає спостерігатись із 1900 секунди моделювання.

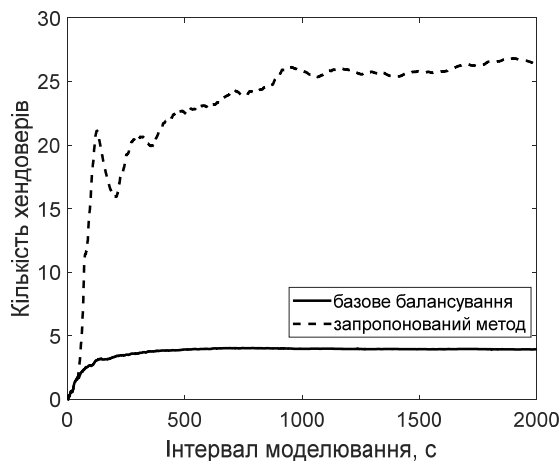


Рис. 7. Середня кількість хендверів для двох режимів моделювання

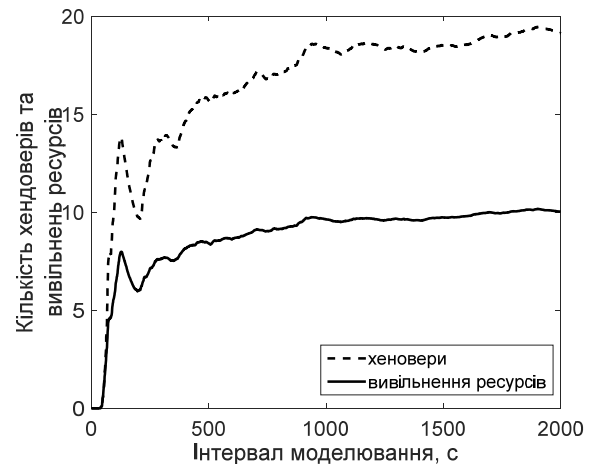


Рис. 8. Середні миттєві кількості перенесень навантаження та кількості хендверів, які використовуються для балансування навантаження

В процесі імітаційного моделювання коміркова структура мережі містила 66 секторів згенерованої мережі мобільного зв'язку. Найдовший шлях, використаний у процесі вивільнення ресурсу, містив 17 вимушених хендверів. Це означає, що в момент вивільнення ресурсів у перевантаженому секторі найближчим для перенесення частки навантаження був сектор (із навантаженням нижче порогового значення), який знаходився на віддалі 17 переходів по графу коміркової структури мережі. На рис. 9 наведено приклад такого графа коміркової структури мережі, який відображає один з миттєвих станів мережі в процесі моделювання.

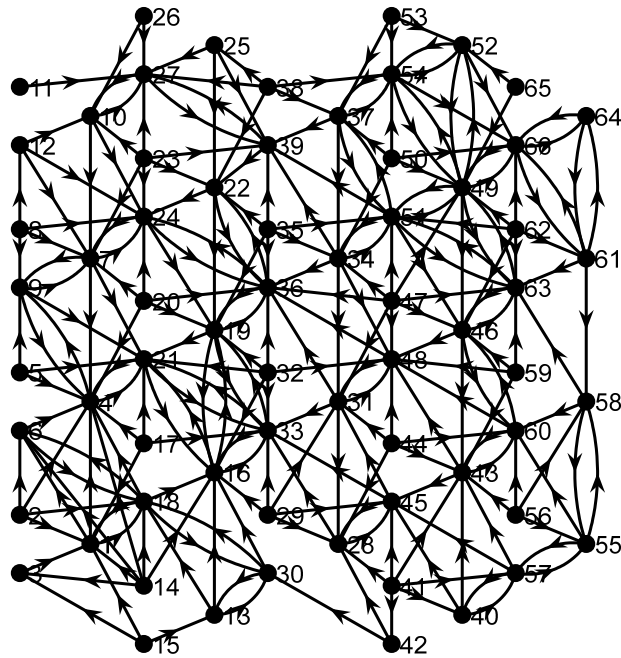


Рис. 9. Граф зв'язку вузлів коміркової мережі

**Четвертий розділ роботи – «Оптимізація структури коміркових мереж мобільного зв'язку із забезпеченням максимальної доступності телекомунікаційних послуг»** – присвячений актуальним практичним аспектам побудови та функціонування мереж мобільного зв'язку з акцентом на технології 4G та 5G.

Для підвищення ефективності процесу надання послуг у коміркових мережах мобільного зв'язку запропоновано систему збору та оброблення інформації, яка дає змогу зменшити тривалість виконання ітерації запропонованого алгоритму балансування навантаження.

Для того, щоб в реальних умовах обмежити розмірність завдання пошуку навантаження, яке підлягає балансуванню, запропоновано класифікацію активних терміналів за швидкістю переміщення  $V_{аб}$  (км/год), нижча швидкість відповідає вищому пріоритету для вимушеного хендоверу (табл. 1).

Швидкість переміщення абонентських терміналів запропоновано визначати через інтервали часу  $\Delta t$  (інтервал визначення стану термінального пристрою абонента) на основі даних про їх попереднє і поточне розташування або отримувати безпосередньо від терміналу:

$$\Delta t = \frac{R_{ком}}{V_{сп} \cdot k}, \quad (23)$$

де  $R_{ком}$  – радіус комірки;  $V_{сп}$  – верхня межа швидкості у групі, до якої належить абонент (по замовчуванню абонента відносять до групи 4);  $k$  – кількість фіксацій стану термінального пристрою абонента за тривалість переміщення на величину  $R_{ком}$ .

Таблиця 1. Розподіл активних терміналів на групи за швидкістю їх переміщення

Назва групи	Група 1	Група 2	Група 3	Група 4	Група 5	Група 6	Група 7	Група 8
Швидкість $V_{аб}$ , км/год	$V_{аб} < 1$	$1 < V_{аб} \leq 2$	$2 < V_{аб} \leq 4$	$4 < V_{аб} \leq 8$	$8 < V_{аб} \leq 15$	$15 < V_{аб} \leq 30$	$30 < V_{аб} \leq 60$	$V_{аб} > 60$

Визначення координат, швидкостей абонентських терміналів та рівень потужності сигналу від обслуговуючої та сусідніх БС здійснюється одночасно для всіх терміналів в межах однієї групи і окремо для кожної з груп.

Координати та параметри абонентських пристроїв зберігаються в системі моніторингу у вигляді динамічних масивів даних, які містять такий мінімальний набір параметрів:

- координати терміналу протягом останніх 5 хв ( $x, y$ );
- швидкість переміщення  $V_{аб}$ , км/год;
- середня швидкість  $V_{сер}$ , км/год;
- тип сервісу;
- рівень потужності сигналу від обслуговуючої та сусідніх БС.

Ці масиви система ініціалізує тільки для активних абонентських терміналів в момент початку сеансу зв'язку і видаляє після його завершення окремо для кожного терміналу. В процесі роботи мережі зв'язку масиви швидкостей та координат збільшуються з інтервалом  $\Delta t$  секунд за рахунок додавання до них нових даних.

**Алгоритм призначення базових станцій в мережах 5 покоління.** Дослідження показують, що 80% користувачів концентруються на 20% радіопокриття. Використання малих комірок дає змогу проводити оптимізацію радіопокриття. При цьому основним завданням є мінімізація кількості макро- і мікро- БС (базових станцій) в мережі при задоволенні наступних обмежень:

- для усіх користувачів повинні задовольнятися вимоги по SINR;
- всі користувачі повинні отримувати потужність сигналу, що перевищує заданий пороговий рівень;
- користувач  $k$  може обслуговуватись БС  $i$ , тільки якщо БС  $i$  є активною в даний момент;
- кожен користувач може обслуговуватись як мінімум однією БС;
- кожна БС може обслуговувати певну кількість користувачів на основі доступних піднесучих і типу обслуговуючої БС (макро-, мікро-).

Підхід до розв'язання завдання мінімізації кількості активних БС базується на послідовному виключенні БС. Запропонований алгоритм (рис. 10) оптимізує кількість і призначення базових станцій у мережі і виводить результуючий набір базових станцій, достатній для обслуговування поточного навантаження.

Розрахунок відстані між користувачами і БС виконується на основі зваженого розбиття Вороного, при цьому враховується розподіл потужності для макро- і



мікро-БС. Призначення обслуговуючих БС до окремих користувачів відбувається шляхом розрахунку зваженої відстані між вибраним користувачем і усіма БС в мережі.

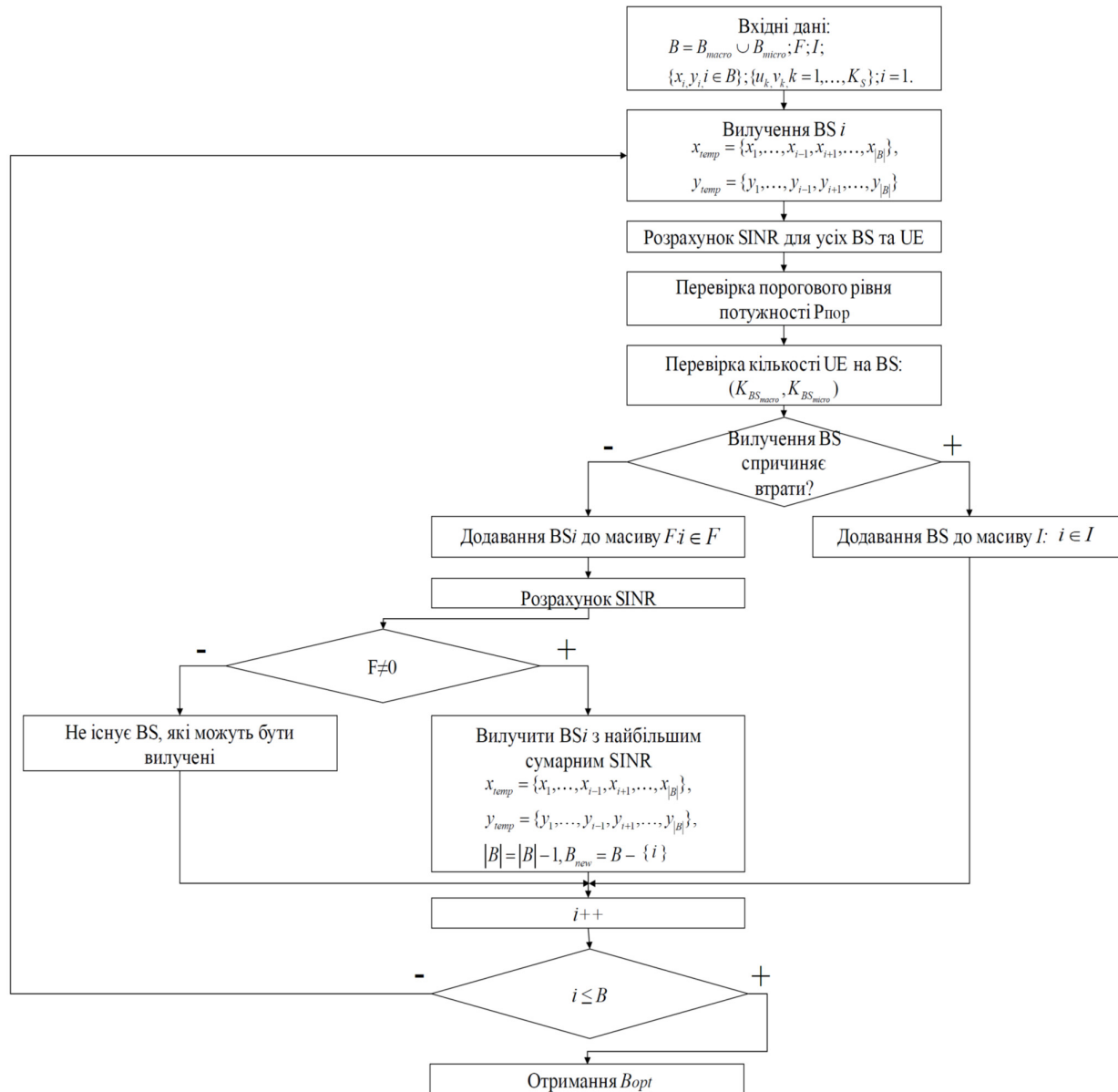


Рис. 10. Блок-схема алгоритму призначення базових станцій

Як правило, зони з високою щільністю абонентського навантаження покриваються великою кількістю малих комірок для забезпечення QoS. Для більшості сценаріїв навантаження запропонований алгоритм дає змогу зменшити від 30% до 40 % кількість активних БС із збереженням достатньої якості обслуговування.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розроблення моделей, методів та алгоритмів підвищення доступності телекомунікаційних послуг шляхом балансування абонентського навантаження під час пікових

навантажень на окремі сегменти мереж мобільного зв'язку з забезпеченням вимог до якості надання телекомунікаційних послуг без залучення додаткових ресурсів.

1. Проаналізовано умови та вимоги до надання телекомунікаційних послуг у мережах мобільного зв'язку. Встановлено, що на процеси надання послуг зв'язку і забезпечення їх неперервності визначальний вплив мають механізми керування мобільністю та балансування абонентського навантаження. Здійснено класифікацію моделей балансування абонентського навантаження. Визначено, що усі розглянуті механізми здатні використовувати ресурси тільки сусідніх комірок в процесі балансування навантаження, саме тому вони є неефективними в ситуаціях, коли в умовах пікових навантажень перебувають групи із сусідніх комірок.

2. Запропоновано модель коміркової структури мережі мобільного зв'язку на основі графа, яка враховує множину зайнятих користувачами ресурсів та їх стан стосовно сусідніх сегментів мережі, і дає змогу пришвидшити пошук шляхів їх розвантаження в процесі балансування навантаження. Для опису структур з комірками, які поділені на сектори, для відображення базового та більш повного взаємозв'язку компонентів радіомережі передбачено застосування графа без урахування та з урахуванням перекриття несуміжних секторів.

3. Розв'язано завдання підвищення доступності послуг зв'язку у коміркових мережах мобільного зв'язку в умовах пікових навантажень. Для цього запропоновано метод балансування абонентського навантаження у комірковій мережі мобільного зв'язку, який відрізняється від відомих використанням в процесі балансування ресурсів не тільки сусідніх комірок, а й більш віддалених стосовно цільової, та враховує завантаженість комірок, тип абонентського навантаження, швидкість переміщення абонентського терміналу та ефективність використання каналу зв'язку, та забезпечує перенесення величини абонентського навантаження від перевантаженої до будь-якої доступної недовантаженої комірки без зростання рівня втрат запитів та без зміни параметрів радіомережі.

4. Запропоновано метод оцінки ефективності використання каналу зв'язку, який, на відміну від відомих, використовує узагальнений критерій частотної та енергетичної ефективності системи, враховує віддаль між межею Шеннона та точкою, що позначає частотну та енергетичну ефективності системи та дає змогу визначити оптимальну стратегію планування системи мобільного зв'язку. Застосування цього методу забезпечує вибір найбільш оптимального каналу зв'язку для перенесення навантаження в процесі балансування.

5. Розроблено імітаційну модель обслуговування викликів у комірковій мережі мобільного зв'язку, яка використовує запропонований метод балансування абонентського навантаження, метод оцінювання ефективності використання каналу зв'язку, а також модель коміркової структури мережі. Імітаційна модель враховує розподіли швидкостей та напрямів руху абонентів, та їх мережну активність в різний час протягом доби, реалізуючи, таким чином, різні сценарії їх переміщення та генерації навантаження, що забезпечує гнучкість та загальність результатів моделювання. Урахування траєкторії руху абонентів дає змогу прогнозувати завантаження окремих зон коміркової мережі, що забезпечить

підвищення ефективності балансування абонентського навантаження. Генерація активності абонентських терміналів відбувається з одночасним урахуванням тривалості комунікаційних сеансів, інтенсивності надходження запитів на їх початок, інтенсивностей початку та завершення їх обслуговування, та максимальної одночасної кількості сеансів у системі, що дає змогу сформувати абонентське навантаження на радіомережу з локальними перевантаженнями та підвищити адекватність моделювання функціонування коміркової мережі мобільного зв'язку.

6. Для перевірки ефективності запропонованих моделей та методів проведено моделювання процесу функціонування коміркової мережі мобільного зв'язку та встановлено, що удосконалена модель балансування абонентського навантаження у комірковій мережі мобільного зв'язку дає змогу зменшити втрати запитів на послуги до 15% в умовах пікових навантажень на окремі сегменти мережі.

7. Запропоновано алгоритм призначення базових станцій у мережах 5G, який дає змогу зменшити кількість активних макро- і мікро- БС у мережі шляхом послідовного виключення базових станцій та призначення обслуговуючих БС до окремих користувачів на основі розрахунку зваженої відстані між вибраним користувачем і усіма БС в мережі. Розроблений алгоритм дає змогу зменшити від 30% до 40 % кількість активних БС зі збереженням достатньої якості обслуговування для більшості сценаріїв розподілу абонентського навантаження.

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

### **Статті у наукових фахових виданнях України, що включені до наукометричних баз даних:**

1. Р. І. Бак, П. О. Гуськов, та О. А. Лаврів, “Імітаційна макромодель поведінки абонентів у мережі коміркового зв'язку,” Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,” no. 849, pp. 274–284, 2016. (МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

2. П. О. Гуськов, Р. І. Бак, А. Л. Швець, Р. С. Колодій та Б. В. Коваль, “Проектування мережі С-RAN за критерієм наскрізної затримки,” Комп'ютерні технології друкарства, no. 35, pp. 98–106, 2016. (МНБ ІСІ, ISSN 2411-9210)

3. Р. І. Бак, І. Б. Чайковський та Р. А. Бурачок, “Метод балансування абонентського навантаження мережі коміркового зв'язку,” Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,” no. 766, pp. 102–107, 2013. (МНБ ІСІ, ISSN 0321-0499)

### **Статті у наукових фахових виданнях України:**

4. О. М. Яремко, Т. А. Максимюк та Р. І. Бак, “Метод адаптивного розподілення потужності в мобільній мережі при варіації абонентського навантаження,” Збірник наукових праць Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України, no. 66, pp. 137-143, 2012. (ISSN 2309-7655)

5. М. М. Климаш, А. Г. Ложковський, О. А. Лаврів та Р. І. Бак, “Графоаналітичний підхід до порівняння ефективності систем безпроводного зв'язку,” Комп'ютерні технології друкарства, no. 27, pp. 189–193, 2011. (ISSN 2411-9210)

6. М. М. Климаш, О. А. Лаврів та Р. І. Бак, “Конвергенція мобільних мереж GSM, CDMA, WiMAX на основі технології NGN-SOFTSWITCH та формування ідеології єдиного терміналу,” Вісник Національного університету “Львівська політехніка”, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,” no. 618, pp. 95–101, 2008. (ISSN 0321-0499)

**Статті у наукових періодичних виданнях інших держав:**

7. B. Buhyl, P. Huskov, O. Lavriv, R. Bak, and A. Luntovsky, “Maximization of Service Flows Rates as a Solution of Network Capacity Allocation Problem,” *Internet Things Eng. Appl.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–10, May 2018. (МНБ CrossRef, ISSN 2371-8609(Print))

8. Y. Hayali, O. Lavriv, B. Buhyl, R. Bak, and M. Klymash, “Models and mechanisms for traffic balancing of IPTV VoD service,” *Int. J. Serv. Econ. Manag.*, vol. 5, no. 4, pp. 291–300, 2013. (ISSN 1753-0822 (Print), ISSN 1753-0830 (Online))

**Публікації у збірниках праць міжнародних науково-технічних конференцій:**

9. R. Bak, O. Lavriv, and B. Koval, “Load balancing based on multi-hop handover for wireless cellular networks,” in 2017 IEEE 1st Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering, UKRCON 2017 - Proceedings, 2017, pp. 1103–1106. (МНБ Scopus)

10. O. Lavriv, B. Buhyl, P. Huskov, and R. Bak, “Heterogeneous network capacity distribution among service flows,” in 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, CADSM 2017 - Proceedings, 2017, pp. 173–175. (МНБ Scopus)

11. П. О. Гуськов та Р. І. Бак, “Метод розміщення базових станцій в мережах мобільного зв'язку п'ятого покоління,” у Збірнику тез доповідей 10-а Міжнародної науково-технічної конференції "Проблеми телекомунікацій – 2016", 2016, pp. 247–250.

12. O. Kostiv and R. Bak, “Decrease of local overloads in heterogeneous wireless networks considering users mobility,” in 13 International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, 2015, pp. 490–494. (МНБ Scopus)

13. Р. Бак та А. Поліщук, “Порівняння ефективності систем безпроводного зв'язку графо-аналітичним методом,” у Збірнику тез доповідей V Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2011, 2011, pp. 252-253.

**Публікація у збірнику праць всеукраїнської науково-технічної конференції:**

14. Р. І. Бак, І. Б. Чайковський, Я. В. Шийка та М. М. Гнатчук, “Спосіб підвищення доступності радіоресурсу систем мобільного зв'язку в перевантаженому режимі роботи,” у Збірнику тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції “Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012,” 2012, pp. 89–91.

## АНОТАЦІЯ

**Бак Р.І. Підвищення доступності телекомунікаційних послуг в мережах мобільного зв'язку.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуального наукового завдання розроблення моделей, методів та алгоритмів підвищення доступності телекомунікаційних послуг шляхом балансування абонентського навантаження під час пікових навантажень на окремі сегменти мереж мобільного зв'язку. Проведено аналіз стану та тенденцій розвитку коміркових мереж мобільного зв'язку. Встановлено, що на процеси надання послуг зв'язку і забезпечення їх неперервності визначальний вплив мають механізми керування мобільністю та балансування абонентського навантаження. Вперше запропоновано ітераційний метод балансування абонентського навантаження у комірковій мережі мобільного зв'язку, який у процесі розподілу враховує доступні мережні ресурси не лише сусідніх комірок, а й більш віддалених від цільової, враховує завантаженість комірок, тип абонентського навантаження, швидкість переміщення абонентського терміналу та ефективність використання ним каналу зв'язку, забезпечує перенесення частки абонентського навантаження від перевантаженої до будь-якої доступної недовантаженої комірки мережі без зростання рівня втрат запитів. Розвинуто модель топологічної структури коміркової мережі мобільного зв'язку на основі графу, яка в процесі формування зв'язків між мережними елементами враховує множини зайнятих користувачами ресурсів та їх стан стосовно сусідніх сегментів мережі, що дає змогу підвищити ефективність балансування абонентського навантаження. Отримав подальший розвиток метод оцінювання ефективності використання каналу зв'язку, який використовує узагальнений критерій його частотної та енергетичної ефективності, шляхом урахування віддалі між межею Шеннона та точкою, що позначає частотну та енергетичну ефективності безпровідного інтерфейсу підсистеми радіомережі і дає змогу визначити оптимальну стратегію планування мережі мобільного зв'язку. Проведено моделювання процесу функціонування коміркової мережі мобільного зв'язку в умовах пікових навантажень на окремі групи комірок.

**Ключові слова:** коміркові мережі мобільного зв'язку, хендовер, балансування навантаження, ефективність використання радіоканалу.

## АННОТАЦИЯ

**Бак Р.И. Повышение доступности телекоммуникационных услуг в сетях мобильной связи.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет «Львовская политехника» Министерства образования и науки Украины, г. Львов, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи разработки моделей, методов и алгоритмов повышения доступности телекоммуникационных услуг путем балансирования абонентской нагрузки во время пиковых нагрузок на отдельные сегменты сетей мобильной связи. Проведен анализ состояния и тенденций развития сотовых сетей мобильной связи. Определено, что на процессы предоставления услуг связи и обеспечения их непрерывности определяющее влияние оказывают механизмы управления мобильностью и балансирование абонентской нагрузки. Впервые предложен итерационный метод балансирования абонентской нагрузки в сотовой сети мобильной связи, который в процессе распределения учитывает доступны сетевые ресурсы не только соседних ячеек, но и более отдаленных от целевой, учитывает загруженность ячеек, тип абонентской нагрузки, скорость перемещения абонентского терминала и эффективность использования им канала связи, обеспечивает перенос части абонентской нагрузки от перегруженной к любой доступной недогруженными ячейке сети без роста уровня потерь запросов. Развита модель топологической структуры сотовой сети мобильной связи на основе графа, которая учитывает в процессе формирования связей между сетевыми элементами множество занятых пользователями ресурсов и их состояние относительно соседних сегментов сети, что позволяет повысить эффективность балансирования абонентской нагрузки. Получил дальнейшее развитие метод оценки эффективности использования канала связи, который использует обобщенный критерий его частотной и энергетической эффективности, путем учета расстояния между границей Шеннона и точкой, обозначающей частотную и энергетическую эффективности беспроводного интерфейса подсистемы радиосети и позволяет определить оптимальную стратегию планирования сети мобильной связи. Проведено моделирование процесса функционирования сотовой сети мобильной связи в условиях пиковых нагрузок на отдельные группы ячеек.

**Ключевые слова:** сотовые сети мобильной связи, хэндовер, балансирование нагрузки, эффективность использования радиоканала.

#### ABSTRACT

**Bak R.I. Models and algorithms for increasing the availability of communication services in cellular wireless access networks.** – On the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Ph.D. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry for education and science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to solving the relevant scientific task of development the methods, models and algorithms for increasing the telecommunication services availability by using the load balancing during rush-hour in particular segments of mobile communication network. The current state and trends of cellular network development has been analysed in details. It was determined that process of seamless and continuous service provision in mobile network is significantly affected by mobility management and load balancing mechanisms. A new iterative method of load balancing for mobile communication network has been introduced first time. The novelty of the proposed

method is that it takes into account resource availability in both neighbour and more distant cells, cells load, user's velocity and traffic demand and efficiency of spectrum utilization. All these factors in total provide effective load distribution among the cells without interruption of service provision process. The topological model of cellular network has been further developed based on the graph, which takes into account the set of resources occupied by users, connections among the radio network elements, and state of users' connection within target cells neighborhood to improve the efficiency of load balancing. For the description of cells structures, that are divided into sectors, for the mapping of the basic and more complete interconnection between the components of the radio network, the graph is proposed without taking into account the overlap of non-related sectors and with taking into account this overlap. The method of channel utilization efficiency estimation has been further developed by generalized criterion of spectral and energy efficiency, by using the distance to the Shannon limit for each user radio link that allows finding the optimal strategy for radio access network planning. The efficiency of mobile network operation in conditions of peak load on the particular cells has been tested by the developed simulation model. This system allows to reduce the number of the iterations of the proposed load balancing algorithm. Also, the base stations allocation for 5G mobile network has been proposed to reduce the number of active macro- and micro-BSs in the network by successively excluding base stations and the assignment of serving BSs to individual users based on calculation of the weighted distance between the selected user and all the BSs in the network.

**Keywords:** cellular mobile communication networks, handover, load balancing, radio channel efficiency.