

ІМІТАЦІЙНА МАКРОМОДЕЛЬ ПОВЕДІНКИ АБОНЕНТІВ У МЕРЕЖІ КОМІРКОВОГО ЗВ'ЯЗКУ

© Бак Р. І., Гуськов П. О., Лаврів О. А., 2016

Запропоновано імітаційну макромодель поведінки абонентів у мережі коміркового зв'язку, яка враховує її структуру, особливості переміщення абонентів та їхню активність, зокрема процес генерації запитів абонентськими терміналами. На вході моделі задають параметри коміркової структури, інтервал моделювання, параметри потоку абонентських викликів, кількість груп абонентів за швидкістю переміщення та максимальну можливу швидкість переміщення абонентів. Результатами моделювання є сформована згідно із заданими правилами коміркова структура з базовими станціями, які розміщені в центрі шестикутних комірок, ємність мережі за викликами, згенеровані на інтервалі моделювання виклики абонентів, характеристика їх обслуговування та кількість необслужених викликів унаслідок перевантаження мережі з урахуванням особливостей переміщення абонентів.

Ключові слова: мережа коміркового зв'язку, переміщення абонентів, активність абонентів.

R. Bak, P. Huskov, O. Lavriv
Lviv Polytechnic National University

SIMULATION MACROMODEL OF SUBSCRIBER'S BEHAVIOR IN CELLULAR COMMUNICATION NETWORK

© Bak R., Huskov P., Lavriv O., 2016

The paper proposes the simulation macro model of subscribers' behavior in cellular communications network, considering its structure, peculiarities of the subscribers' movement and their activity, including the requests generation process by subscribers' terminals. Model input obtains the set of cellular structure parameters, simulation interval, parameters of the user's requests flow, number or caller groups by moving speed and maximum possible speed of subscribers. The results of the simulation are: generated according to the set rules cellular structure of the base stations, which are located in the center of hexagonal cells, the capacity of the network in terms of calls, generated subscriber's requests in the range of simulation interval, characteristics of their processing and the number of non-processed requests in the reason of network congestion considering the subscribers movement. The continuous hexagonal coverage of a given area with lowest possible ceiling and the maximal distances between neighboring base stations according with their cell ranges is received based on the proposed method of forming the cellular structure of mobile network received. It shows the number of base stations, their location. Based on subscriber's movement simulation we define a set of coordinates of each subscriber location at any simulation step. These coordinates depict different scenarios of subscribers moving that consist of individual trajectories for each subscriber considering their personal speed and movement direction. The amount of required equipment to service the subscriber load entering the coverage zone may be calculated based on simulation results.

Key words: cell communication network, subscriber moving, subscriber activity.

Вступ

У сучасних мережах зв'язку спостерігаються активні процеси конвергенції та інтеграції технологій і послуг, що призвели до впровадження і широкого використання мереж із єдиною технологічною та концептуальною основою для надання різних видів послуг. Побудова таких мереж

забезпечує гнучке введення нових видів послуг та спільні принципи обслуговування для всіх абонентів або груп абонентів. Оскільки більшість нових видів послуг доволі вимогливі до пропускної здатності, то у мережах коміркового зв'язку виникає завдання забезпечення необхідного радіоресурсу для цих послуг, особливо в моменти пікового локального абонентського навантаження.

Сучасні механізми управління здатні здійснювати перерозподіл радіоресурсу для абонентів у межах сектору з урахуванням послуг, якими вони користуються. Для дослідження цих механізмів слід здійснити моделювання коміркової мережі зв'язку, поведінки абонентів, розподілу абонентського навантаження, а також власне його балансування з урахуванням локальних перевантажень.

Завдання балансування абонентського навантаження у коміркових мережах активно досліджують вітчизняні та зарубіжні науковці. Більшість таких досліджень можна поділити на два типи [1]: балансування навантаження за критерієм імовірності блокування запитів [2–4] та на основі показника завантаженості [5–7]. Для першого типу, на відміну від другого, характерний менший об'єм службових даних, оскільки процес балансування починається тільки в момент перевищення порогового значення імовірності блокування запитів. Зокрема, у [8] у випадку досягнення порогового значення імовірності блокування запитів розподіл навантаження між комітками проводять, зменшуючи радіус перевантаженої та збільшуючи радіус сусідніх з нею коміток через регулювання потужності випромінювання базових станцій.

Другий тип балансування навантаження є кращим з практичного погляду, оскільки він враховує пропускну здатність і ступінь балансування навантаження і у виборі комітки, і в процесі виконання хендверу. Так, у [9] процес балансування навантаження починається з найзавантаженішої комітки з метою досягнення рівномірного завантаження у мережі.

Проте сьогодні відсутні механізми балансування навантаження, які використовують не тільки сусідні комітки, а й віддаленіші від цільової, оскільки це потребує централізації збирання статистики та прийняття рішень щодо передавання керування окремими абонентськими пристроями.

Отже, розроблення моделей балансування абонентського навантаження в мережах коміркового зв'язку з використання повної коміркової структури за рахунок централізованого управління хендвером є актуальним науковим завданням. Його розв'язування потребує урахування структури коміркової мережі, особливостей переміщення абонентів та їх активності, що можна здійснити на підставі запропонованої у статті імітаційної макромоделі поведінки абонентів.

Формування структури мережі коміркового зв'язку

Для моделювання процесів балансування абонентського навантаження в коміркових мережах мобільного зв'язку спочатку потрібно розв'язати задачу автоматизованого формування структури мережі радіодоступу, першим етапом якої є знаходження координат базових станцій (БС). Для спрощення приймемо, що територія є рівнинною та прямокутною, розміщення БС – рівномірне, а комітки подамо у вигляді шестикутників (рис. 1).

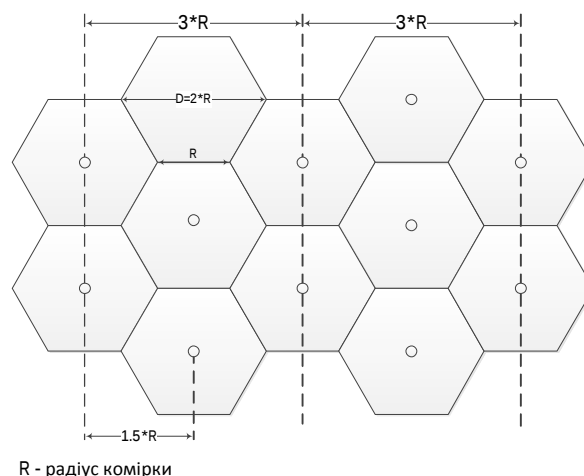


Рис. 1. Фрагмент структури мережі коміркового зв'язку

Як видно з рис. 1, такий спосіб покриття базовими станціями є періодичним з періодом $3 \cdot R$ по горизонталі. Відстань між сусідніми БС, що розташовані на одній горизонталі, становить $3 \cdot R$. Кількість повних періодів по горизонталі n_x становитиме:

$$n_x = \left\lfloor \frac{X}{3 \cdot R} \right\rfloor, \quad (1)$$

де X – довжина території покриття; R – радіус комірки;

$$z_x = \frac{X}{3 \cdot R} - n_x, \quad (2)$$

де z_x – залишок періоду.

Якщо $X > R$, то кількість стовпців та координату x базових станцій першого стовпця обчислюють за співвідношеннями (3) та (4)

$$n_c = \begin{cases} 2 \cdot n_x, & z_x \leq \frac{1}{3} \\ 2 \cdot n_x + 1, & \frac{1}{3} < z_x \leq \frac{5}{6} \\ 2 \cdot n_x + 2, & z_x > \frac{5}{6} \end{cases} \quad (3)$$

де n_c – загальна кількість стовпців;

$$X_1 = \begin{cases} R \cdot \left(1 + 1.5 \cdot \left(z_x - \frac{1}{6} \right) \right), & z_x \leq \frac{1}{3} \\ R \cdot 1.5 \cdot z_x, & \frac{1}{3} < z_x \leq \frac{5}{6} \\ R \cdot \left(1 + 1.5 \cdot \left(z_x - \frac{7}{6} \right) \right), & z_x > \frac{5}{6} \end{cases} \quad (4)$$

де X_1 – координата x базових станцій першого стовпця.

Якщо $X \leq R$, то справедливі такі твердження:

$$n_c = 1. \quad (5)$$

$$X_1 = 1.5 \cdot R \cdot z_x = \frac{X}{2}. \quad (6)$$

Для базових станцій кожного наступного стовпця координата x визначається за співвідношенням (7)

$$X_n = X_0 + 1.5 \cdot R \cdot (n-1), \quad n = 2, \overline{n_c}, \quad (7)$$

де X_n – координата x базових станцій n -го стовпця.

На рис. 2 наведено геометричні віддалі між сусідніми базовими станціями гексагональної сітки, розміщеними на різних горизонтальних осях. Це використовується для обчислення ординат базових станцій у процесі формування коміркової структури на заданому периметрі.

Як видно з рис. 2, кількість базових станцій у парних та непарних стовпцях відрізняється на 1

$$n_y = \left\lceil \frac{Y}{R \cdot \sqrt{3}} \right\rceil, \quad (8)$$

де Y – ширина території покриття; n_y – кількість БС у парних стовпцях ($n_y - 1$ – кількість БС у непарних стовпцях).

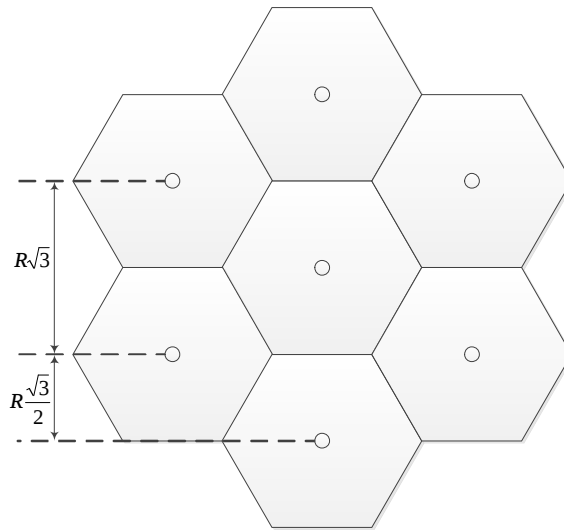


Рис. 2. Віддалі між сусідніми базовими станціями на різних горизонтальних осях

$$z_y = n_y - \frac{Y}{R \cdot \sqrt{3}}, \quad (9)$$

де z_y – залишок періоду.

Початкова координата y базових станцій у парних стовпцях:

$$Y_{1П} = R \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (1 - z_y). \quad (10)$$

Початкова координата y базових станцій у непарних стовпцях:

$$Y_{1Н} = R \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (2 - z_y). \quad (11)$$

Координата y для усіх інших базових станцій визначається:

- для парних стовпців

$$Y_{nП} = R \cdot \sqrt{3} \cdot \left(n - \frac{z_y - 1}{2} \right), \quad n = 2, n_y, \quad (12)$$

- для непарних стовпців

$$Y_{nН} = R \cdot \sqrt{3} \cdot \left(n - \frac{z_y}{2} \right), \quad n = 2, (n_y - 1), \quad (13)$$

де $Y_{nП}$, $Y_{nН}$ – координати y n -х базових станцій парного ($_{nП}$) та непарного ($_{nН}$) стовпців, відповідно.

Загальна кількість базових станцій становить:

$$N_{BC} = n_x \cdot n_y - \left\lfloor \frac{n_x}{2} \right\rfloor. \quad (14)$$

На рис. 3 подано результат автоматизованого формування коміркової структури мережі на основі описаного вище методу з вхідними параметрами:

- довжина території покриття – 1000 м;
- ширина території покриття – 1000 м;
- радіус комірки – 100 м, що відповідає умовам щільної багатоповерхової міської забудови.

Варто зазначити, що на рис. 3 наявні непокриті фрагменти території на границях периметра, що є особливістю запропонованої методики. Вважаємо, що ця територія забезпечена радіопокриттям із сусідніх периметрів.

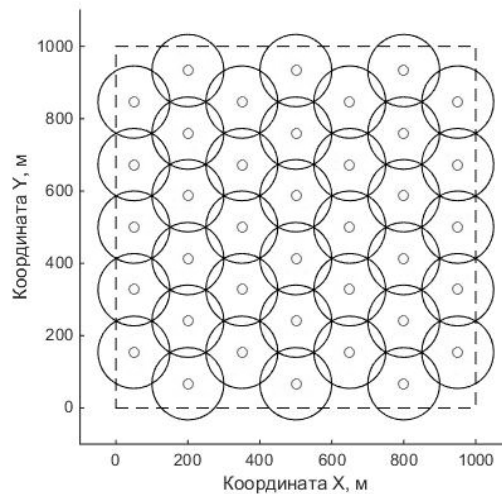


Рис. 3. Приклад коміркової структури мережі заданого периметра

Моделювання переміщення абонентів

Моделювання руху абонента здійснюють, задаючи величини переміщення r (м) та кут переміщення f (радіан). Переміщення залежить від швидкості абонента V_{ab} (м/с), яка визначається так:

$$V_{ab} = V_{\max} \cdot k, \quad (15)$$

де $V_{\max}$ – максимально можлива швидкість переміщення абонента (за замовчуванням $V_{\max} = 33$ м/с); k – безрозмірний коефіцієнт, що визначається як добуток K випадкових чисел, згенерованих за допомогою рівномірного закону розподілу на проміжку від 0 до 1.

Середнє значення отриманих швидкостей прямуватиме до значення

$$V_{ab_сер} = \frac{V_{\max}}{2^K}. \quad (16)$$

Зміна напрямку руху абонента визначається кутом переміщення, який складається з кількох складових:

$$f = a + b \cdot (0.5 - b), \quad (17)$$

де a – постійна складова кута переміщення абонента, радіан; b – величина діапазону допустимої зміни кута переміщення, радіан; b – рівномірно розподілене випадкове число на проміжку від 0 до 1.

$$a = p \cdot (1 - 2 \cdot d), \quad (18)$$

де d – рівномірно розподілене випадкове число на проміжку від 0 до 1.

$$b = 2 \cdot p \cdot g \cdot f_v, \quad (19)$$

де g – рівномірно розподілене випадкове число на проміжку від 0 до 1; f_v – коефіцієнт впливу швидкості на зміну напрямку переміщення, значення f_v належать проміжку від 0 до 1. Що більше значення V_{ab} , то менше значення f_v і, відповідно, менша допустима зміна кута переміщення

$$f_v = \left(1 - \frac{V_{ab}}{V_{\max}}\right)^m, \quad (20)$$

де m – степеневий показник, зростання якого призводить до меншої мінливості напрямку переміщення.

Переміщення r визначається як:

$$r = \Delta t \cdot V_{ab} \cdot ((1 - p) + 2 \cdot p \cdot a), \quad (21)$$

де Δt – інтервал часу, закладений у один крок моделювання (с); p – коефіцієнт, що виражає максимальну варіацію швидкості абонента протягом часу Δt (за замовчуванням $p = 0,1$, тобто

максимальна варіація швидкості абонента становить $\pm 10\%$), a – рівномірно розподілене випадкове число на проміжку від 0 до 1.

Початкові координати абонента X_0 та Y_0 задають випадковими за допомогою рівномірного закону розподілу в межах території покриття.

Наступні координати абонента визначаються на кожному кроці моделювання зі значень r та f :

$$X_n = X_{n-1} + r \cdot \cos(f). \quad (22)$$

$$Y_n = Y_{n-1} + r \cdot \sin(f). \quad (23)$$

Величини $V_{a\bar{b}}$, $V_{\max}$, k , a , b та f_v визначаються один раз на початку моделювання окремо для кожного абонента, а величини r , f , X_n та Y_n визначають на кожному кроці моделювання окремо для кожного абонента.

Також запропоновано поділ абонентів на групи за швидкістю переміщення $V_{a\bar{b}}$, м/с [10]:

- Група 1 ($V_{a\bar{b}} < 0.25$).
- Група 2 ($0.25 < V_{a\bar{b}} \leq 0.5$).
- Група 3 ($0.5 < V_{a\bar{b}} \leq 1$).
- Група 4 ($1 < V_{a\bar{b}} \leq 2$).
- Група 5 ($2 < V_{a\bar{b}} \leq 4$).
- Група 6 ($4 < V_{a\bar{b}} \leq 8$).
- Група 7 ($8 < V_{a\bar{b}} \leq 16$).
- Група 8 ($V_{a\bar{b}} > 16$).

На рис. 4 подано приклади розподілу абонентів за швидкістю переміщення. Ці приклади відображають специфіку поведінки абонентів в різний час протягом доби. Найбільша кількість абонентів завжди належить першій групі, що відповідає квазістатичному положенню. 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 активного переміщення абонентів між домом і місцем праці (рис. 4, *а*). В інший час, окрім нічного, розподіл абонентів відповідає ситуації на рис. 4, *б*. У темний період доби спостерігається зменшення динаміки переміщення абонентів (рис. 4, *в*).

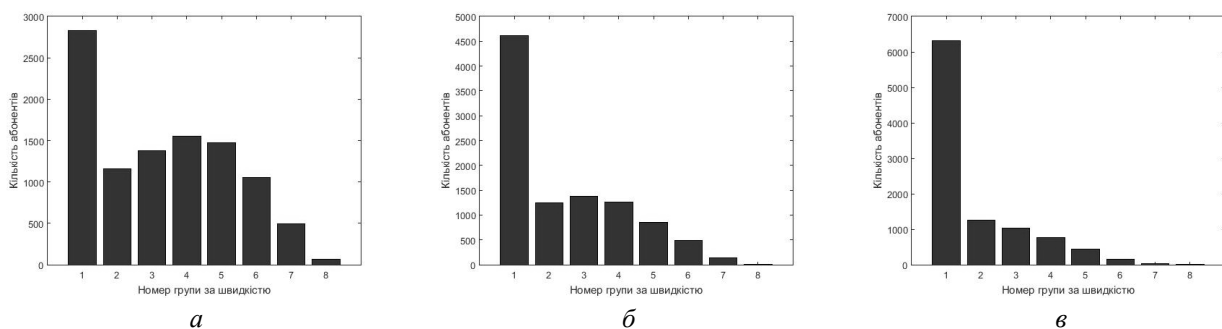


Рис. 4. Варіанти розподілу абонентів на групи за швидкістю переміщення для різних K :
а – $K = 4$; *б* – $K = 5$; *в* – $K = 6$

Зазначимо, що в процесі моделювання руху абонентів не здійснювалась прив'язка до конкретної місцевості. Приклади варіантів траєкторії руху абонентів подано на рис. 5. У абонентів з більшою швидкістю спостерігається довша траєкторія переміщення протягом інтервалу моделювання.

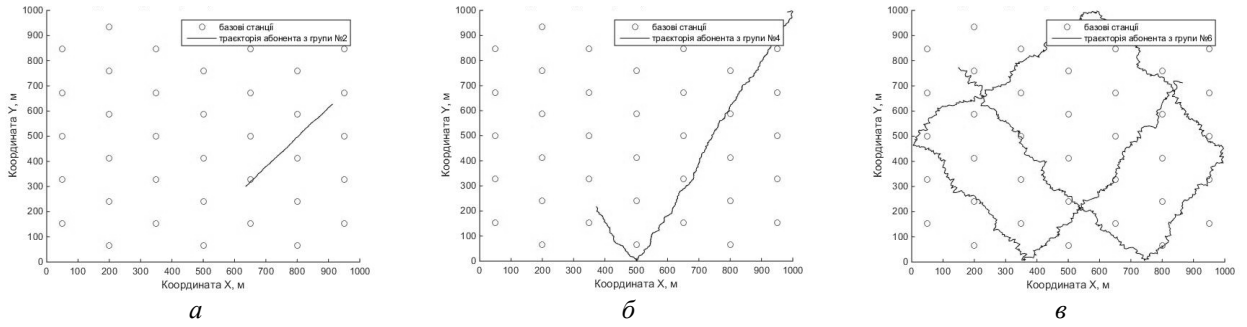


Рис. 5. Приклади траєкторії переміщення абонентів на заданому периметрі у процесі моделювання:
а – для абонента групи 2; б – для абонента групи 4; в – для абонента групи 6

Моделювання активності абонентських терміналів

Моделювання активності абонентських терміналів ґрунтується на імітаційному статистичному моделюванні процесу надходження та обслуговування запитів на комунікаційні сеанси [11]. В процесі моделювання кожному абоненту на основі розподілу Пуассона згенеровано масив тривалостей (*Length*) комунікаційних сеансів та інтервалів (*Interval*) між ними. Відповідно, для одного користувача моменти початку (*Start*) та завершення (*End*) *n*-го сеансу становлять:

$$\begin{aligned} Start_i &= End_{n-1} + Interval_n, & n \in [2; N] \\ End_i &= Start_n + Length_n, & n \in [1; N] \end{aligned} \quad (24)$$

де *n* – номер комунікаційного сеансу; *N* – максимальна кількість сеансів одного користувача протягом інтервалу моделювання; $Start_1 = Interval_1$.

На кожному кроці моделювання *i* протягом інтервалу $[i-1; i]$ визначаємо такі параметри:

- кількість запитів на початок комунікаційного сеансу – *Arrival_density_i*;
- кількість розпочатих сеансів – *Start_density_i*;
- кількість завершених сеансів – *End_density_i*;
- кількість втрачених сеансів – *Loss_density_i*;
- кількість активних сеансів – *Load_i*.

Кількість запитів на початок комунікаційного сеансу визначено як кількість сеансів, що повинні розпочатися в *i*-й момент інтервалу моделювання:

$$Start_{nk}^k \equiv i \Rightarrow Arrival_density_i = Arrival_density_i + 1, \quad (25)$$

де $Start_{nk}^k$ – момент початку наступного комунікаційного сеансу абонента *k*; *nk* – номер наступного сеансу.

Кількість завершених сеансів в *i*-й момент інтервалу моделювання визначено як кількість сеансів, моменти завершення яких дорівнюють *i*:

$$End_{nk}^k \equiv i \Rightarrow \begin{cases} End_density_i = End_density_i + 1 \\ nk = nk + 1 \\ Load_i = Load_i - 1 \end{cases}, \quad (26)$$

де End_{nk}^k – момент завершення наступного комунікаційного сеансу абонента *k*.

Кількість комунікаційних сеансів, розпочатих в *i*-й момент інтервалу моделювання, визначають як кількість сеансів, моменти початку яких дорівнюють *i*, з урахуванням максимально можливої кількості активних сеансів *Max_Load*:

$$Start_{nk}^k \equiv i \Rightarrow \begin{cases} Load_i < Max_Load \Rightarrow \begin{cases} Start_density_i = Start_density_i + 1 \\ Load_i = Load_i + 1 \end{cases} \\ Load_i \equiv Max_Load \Rightarrow \begin{cases} End_{nk}^k = i - 1 \\ nk = nk + 1 \\ Loss_i = Loss_i + 1 \end{cases} \end{cases}. \quad (27)$$

На початку моделювання, тобто для кроку моделювання $i = 1$, приймають, що початкове значення параметра $Load_i$ дорівнює 0, а $pk = 1$. Для кожного наступного кроку i початкове значення параметра $Load_i$ приймають таким, що дорівнює обчисленому на попередньому кроці значенню $Load_{i-1}$.

Вхідні параметри моделювання мережевої активності абонентів такі:

- середнє значення інтервалу між сеансами, $l = 200$ с;
- максимальна кількість сеансів для кожного абонента, $N = 50$;
- середнє значення тривалості викликів, $T = 81$ с;
- максимальна кількість викликів $N = 50$;
- максимальна кількість одночасних комунікаційних сеансів у системі $Max_Load = 40$;
- тривалість інтервалу моделювання $Time_life = 10000$ с;
- загальна кількість користувачів $N_user = 1000$.

Результати моделювання активності абонентів подано на рис. 6, 7.

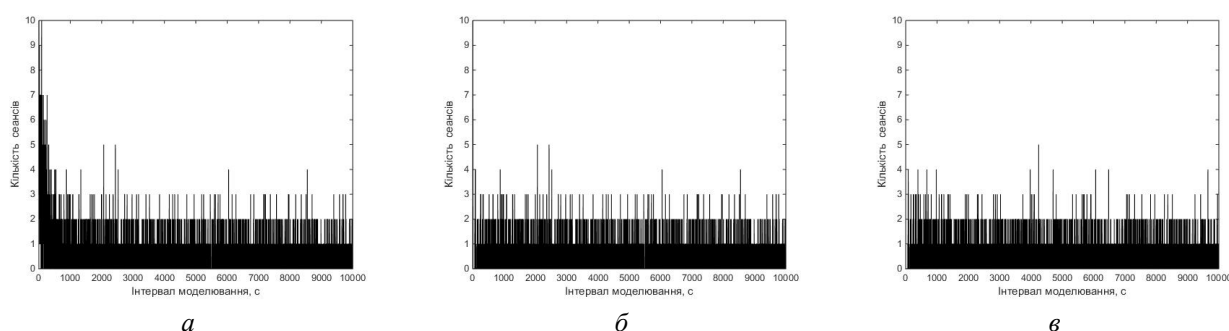


Рис. 6. Інтенсивність надходження запитів на встановлення комунікаційних сеансів (а), початку (б) та завершення (в) їх обслуговування

Інтенсивність надходження, початку обслуговування та завершення комунікаційних сеансів наведено на рис. 6, а, б та в, відповідно. Порівнюючи їх значення у певний момент моделювання, визначають кількість активних та втрачених комунікаційних сеансів (рис. 7, а).

На рис. 7, б подано загальні показники функціонування мережі коміркового зв'язку за комунікаційними сеансами у кожен момент інтервалу моделювання.

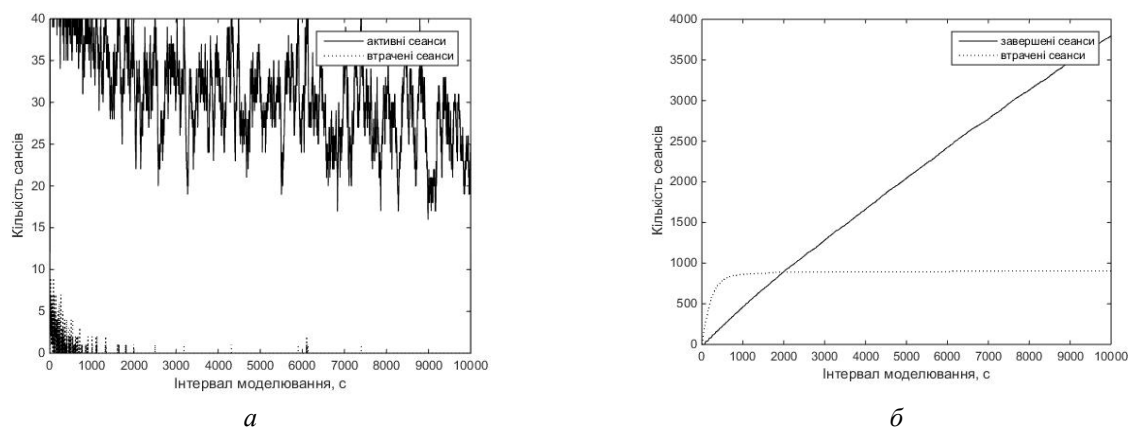


Рис. 7. Результати моделювання мережевої активності абонентів: а – миттєвої; б – сумарної

Аналіз результатів моделювання та досліджень

На основі запропонованого методу автоматизованого формування коміркової структури мережі мобільного зв'язку отримано суцільне гексагональне покриття заданої території з макси-

мальним віддаленням сусідніх базових станцій відносно заданого радіуса комірки та мінімально можливим міжкомірковим перекриттям. Це дає змогу визначити кількість базових станцій, їх координати та обсяг необхідного обладнання для обслуговування абонентського навантаження, що потрапляє у зону їх покриття.

На основі моделювання переміщення абонентів отримано набір координат місцезнаходження кожного абонента у кожен момент моделювання, здійснено розподіл абонентів на групи за швидкостями, що необхідно для подальшого централізованого прийняття рішень щодо управління мобільністю в моменти локальних перевантажень. Отримано сценарії переміщення абонентів, що складаються з індивідуальних траєкторій для кожного абонента, які формуються з урахуванням швидкості та напрямку їх руху.

У результаті моделювання активності абонентських терміналів на підставі даних про початок та завершення комунікаційних сеансів одержано інтенсивності надходження запитів на їх встановлення, а також – початку та завершення їх обслуговування (рис. 6). На отриманих характеристиках миттєвих значень завантаження та втрат у системі (рис. 7, а) чітко виражені локальні перевантаження, на подолання яких і спрямовано методи балансування абонентського навантаження, зокрема [10]. На основі сумарних та миттєвих значень завантаження та втрат системи є можливість визначити імовірність втрат сеансів, а також доступність системи, що важливо для прогнозування її стану.

Напрями подальших досліджень

У межах сформульованого наукового завдання – розроблення моделей балансування абонентського навантаження у мережах коміркового зв'язку з використання повної коміркової структури за рахунок централізованого управління хендвером – у статті здійснено моделювання поведінки абонентів у мережі коміркового зв'язку, а саме їх мережевої активності та переміщення у межах згенерованої коміркової структури на заданому периметрі. Невирішеними залишаються завдання розроблення моделі функціонування мережі на основі модифікованого методу управління мобільністю, дослідження процесу балансування абонентського навантаження у межах запропонованої моделі, розроблення системи централізованого управління хендвером на основі моніторингу стану базових станцій та абонентської активності [12].

Розв'язання сформульованих завдань подальших досліджень дасть змогу збільшити продуктивність мережі за абонентським навантаженням, зменшити імовірність відмови в обслуговуванні, підвищити ступінь балансування абонентського навантаження та, як наслідок, досягти розв'язання сформульованого наукового завдання.

Отримані та очікувані результати можуть використовувати підрозділи управління базовою мережею операторів коміркового зв'язку для збільшення доступності радіоресурсів у разі виникнення локальних перевантажень (місця масового скупчення абонентів, години найбільшого навантаження тощо), збільшення тарифних доходів, поліпшення якості надання послуг зменшенням імовірності відмови в обслуговуванні.

Висновок

Запропоновано метод автоматизованого формування коміркової структури мережі, що дає змогу максимізувати площу радіопокриття. Цей метод відрізняється від відомих тим, що передбачає розбиття території на прямокутні зони з комірками однакового радіуса, на яких реалізується автоматизоване розміщення базових станцій. Це забезпечує операторові змогу використання мінімально можливої кількості базових станцій.

Модель руху абонентів дає можливість реалізувати різні сценарії їх переміщення, що забезпечує гнучкість та загальність результатів моделювання. Ця модель відрізняється від відомих тим, що задає координати абонентів не тільки під час їх активних комунікаційних сеансів, а

протягом усього інтервалу моделювання, та враховує специфіку поведінки абонентів в різний час упродовж доби. Урахування траєкторії руху абонентів дає змогу прогнозувати завантаження окремих зон коміркової мережі, що забезпечить підвищення ступеня балансування абонентського навантаження.

Модель активності абонентських терміналів дає змогу сформувати абонентське навантаження на радіомережу з локальними перевантаженнями. Ця модель відрізняється від відомих тим, що завантаженість системи, а відповідно і втрати, визначаються з одночасним урахуванням тривалостей комунікаційних сеансів, інтенсивності надходження запитів на їх початок, інтенсивностей початку та завершення їх обслуговування, та максимальної одночасної кількості сеансів у системі, що дає змогу підвищити адекватність моделювання абонентського навантаження мережі коміркового зв'язку.

1. Alatishe S. Adeyem, Dike U. Ike Review of Load Balancing Techniques in 3GPP LTE System // *International Journal of Computer Science Engineering (IJCSE)*. July 2013. Vol. 2 No.04. P. 112–116.
2. Tonguz O. K., Yanmaz E. The mathematical theory of dynamic load balancing in cellular networks // *IEEE Trans. on Mobile Computing*. Dec 2008. Vol. 7, no. 12. P. 1504–1518.
3. Eklundh B. Channel utilization and blocking probability in a cellular mobile telephone system with directed retry // *IEEE Trans. Comm.* Apr. 1986. Vol. 34, no. 3. P. 329–337.
4. Jiang H., Rappaport S. S. CBWL: A new channel assignment and sharing method for cellular communication systems // *IEEE Trans. Vehicular Technology*. May 1994. Vol. 43, no. 4. P. 313–322.
5. Dynamic load balancing through coordinated scheduling in packet data systems / Das S., Viswanathan H., and Rittenhouse G. // *IEEE Proc. INFOCOM*. 2003.
6. Generalized proportional fair scheduling in third generation wireless data networks / Bu T., Li L., Ramjee R. // *IEEE Proc. INFOCOM*. Apr. 2006.
7. Dynamic association for load balancing and interference avoidance in multi-cell networks / Son K., Chong S., Veciana G. // *IEEE Trans. on Wireless Communications*. Jul. 2009. Vol. 8, no. 7. P. 3566–3576.
8. Omar Altrad, Sami Muhaidat. Load Balancing Based on Clustering Methods for LTE Networks // *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT)*. – February Edition, 2013. Vol. 3, Issue 2.
9. Dynamic Load Balancing and Throughput Optimization in 3GPP LTE Networks / Wang H., Ding L., Wu P., Pan Z., Liu N., and You X. // *IWCMC*. June 28-July 2 2010. Caen, France, 2010.
10. Бак Р. І., Чайковський І. Б., Бурачок Р. А. Метод балансування абонентського навантаження мережі коміркового зв'язку // *Вісн. Нац. ун-ту “Львів. політехніка”*. Серія : Радіоелектроніка та телекомунікації : [зб. наук. пр.] / Нац. ун-т “Львів. політехніка”. Львів : Вид-во Львів. політехніки. 2013. № 766. С. 110–115.
11. Аналіз імовірнісних характеристик трафіку інфокомунікаційної корпоративної мережі / Романчук В. І., Лаврів О. А., Поліщук А. В., Бак Р. І. // *Зб. наук. пр. УАД. Львів, 2011. Вип. 26. С. 145–151*.
12. Спосіб підвищення доступності радіоресурсу систем мобільного зв'язку в перевантаженому режимі роботи / Бак Р. І., Чайковський І. Б., Шийка Я. В., Гнатчук М. М. // *Науково-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012”*, 7–9 листопада 2012 р. : зб. тез доп. Львів. 2012. С. 89–91.

References

1. Alatishe S. Adeyem and Dike U. Ike (2013), “Review of Load Balancing Techniques in 3GPP LTE System”, *International Journal of Computer Science Engineering (IJCSE)*, vol. 2 no. 04, pp. 112–116.
2. Tonguz, O. K., and Yanmaz, E. (2008), “The mathematical theory of dynamic load balancing in cellular networks”, *IEEE Trans. on Mobile Computing*, vol. 7, no. 12, pp. 1504-1518.
3. Eklundh, B. (1986), “Channel utilization and blocking probability in a cellular mobile telephone system with directed retry”, *IEEE Trans. Comm.*, vol. 34, no. 3, pp. 329–337.
4. Jiang, H. and Rappaport, S. S. (1994), “CBWL: A new channel assignment and sharing method for cellular communication systems”, *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 43, no. 4, pp. 313–322.
5. Das, S., Viswanathan, H. and Rittenhouse, G. (2003),

“Dynamic load balancing through coordinated scheduling in packet data systems”, *IEEE Proc. INFOCOM*. 6. Bu, T., Li, L. and Ramjee, R. (2006), “Generalized proportional fair scheduling in third generation wireless data networks”, in *IEEE Proc. INFOCOM*. 7. Son, K., Chong, S. and Veciana, G. (2009), “Dynamic association for load balancing and interference avoidance in multi-cell networks,” *IEEE Trans. on Wireless Communications*, vol. 8, no. 7, pp. 3566–3576. 8. Altrad, O. and Muhaidat, S. (2013), “Load Balancing Based on Clustering Methods for LTE Networks” *Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT)*, vol. 3, issue 2. 9. Wang, H., Ding, L., Wu, P., Pan, Z., Liu, N. and You, X. (2010), “Dynamic Load Balancing and Throughput Optimization in 3GPP LTE Networks,” *IWCMC*, June 28-July 2 2010, Caen, France. 10. Bak, R. I., Chaikovskiy, I. B and Burachok, R. A. (2013), “Method of Subscriber Network Load Balancing in Celular Network”, *Visnyk Natsionalnoho Universytetu “Lvivska Politekhnikha”. Seriiia : Radioelektronika ta Telekomunikatsii*, no. 766, pp. 110–115. 11. Romanchuk, V.I., Lavriv, O.A., Polishchuk, A.V. and Bak, R.I. (2011), “Analysis of traffic’s probability characteristics of infocommunication corporate network” *Zbirnyk naukovykh prats UAD*, issue 26, pp. 145–151. 12. Bak, R. I., Chaikovskiy, I. B., Shyika, Ya. V. and Hnatchuk, M. M. (2012) “Method of increasing the radioresource availability of mobile communication system in overload mode”, *Naukovo-metodychna konferentsiia “Suchasni problemy telekomunikatsii i pidhotovka fakhivtsiv v haluzi telekomunikatsii”*, 7–9 November 2012, Lviv, pp. 89–91.