

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

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

БАК РОМАН ІВАНОВИЧ

УДК 621.396

ДИСЕРТАЦІЯ

**Підвищення доступності телекомунікаційних послуг в мережах
мобільного зв'язку**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»

(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Науковий керівник –
Чайковський Ігор Борисович,
к.т.н., доцент

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*

/І.В. Демидов/

Львів – 2018

АНОТАЦІЯ

Бак Р.І. Підвищення доступності телекомунікаційних послуг в мережах мобільного зв'язку.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 – Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, 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 з забезпеченням вимог до якості надання телекомунікаційних послуг без залучення додаткових ресурсів.

В першому розділі здійснено аналітичний огляд наукових праць за тематикою дисертаційних досліджень для встановлення умов та вимог щодо надання послуг зв'язку у мережах безпроводового доступу. Встановлено, що на процеси надання послуг зв'язку 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 коефіцієнта 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 при виборі комірки, так і в процесі виконання хендверу. 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 сусідніх комірок. Тому такі механізми не підходять для ситуацій, коли в умовах пікових навантажень перебувають цілі групи сусідніх комірок. Звідси випливає формулювання наукового завдання роботи.

Другий розділ роботи присвячено розробленню методів та моделей підвищення доступності в коміркових мережах безпроводового доступу шляхом застосування удосконаленого механізму балансування навантаження. Для підвищення ефективності балансування навантаження запропоновано модель коміркової структури мережі безпроводового доступу у вигляді графа (без урахування або з урахуванням перекриття несуміжних секторів), де кожен вузол відповідає сектору комірки. З'єднання вузлів позначають існування спільної зони обслуговування для відповідних секторів, що є базовою умовою для можливості балансування навантаження у досліджуваній мережі. Запропоновано метод балансування абонентського навантаження у комірковій мережі радіодоступу, 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. Запропоновано метод оцінювання ефективності використання каналу зв'язку, який, на відміну від відомих, використовує узагальнений критерій частотної та енергетичної ефективностей системи «термінал-базова мережа», враховує віддаль між межею Шенона та точкою, що позначає частотну та енергетичну ефективності системи та дає змогу визначити оптимальну стратегію планування безпроводового доступу. Застосування цього

методу забезпечує вибір найбільш оптимального каналу зв'язку для перенесення навантаження в процесі його балансування.

У третьому розділі розроблено імітаційну модель обслуговування викликів у комірковій мережі безпроводового доступу, 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, 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 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 сформулювати абонентське навантаження на радіомережу з локальними перевантаженнями та підвищити адекватність моделювання процесів функціонування коміркової мережі безпроводового зв'язку. Для перевірки ефективності запропонованих моделей та методів проведено моделювання процесу функціонування коміркової мережі безпроводового доступу та встановлено, що удосконалена модель балансування абонентського навантаження у комірковій мережі радіодоступу дає змогу зменшити втрати запитів на послуги до 15% в умовах пікових навантажень на окремі сегменти мережі

У четвертому розділі для підвищення ефективності процесу надання послуг у коміркових мережах радіодоступу запропоновано систему збору та обробки 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. Також запропоновано алгоритм розміщення 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 із збереженням достатньої якості обслуговування для більшості сценаріїв абонентського навантаження.

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

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. V. 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.

2. Бак Р.І. Імітаційна макромодель поведінки абонентів у мережі коміркового зв'язку / Бак Р.І., Гуськов П.О., Лаврів О.А. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" № 849. "Радіоелектроніка та телекомунікації". – Львів. – 2016. – С. 274-284.

3. Бак Р.І. Метод балансування абонентського навантаження мережі коміркового зв'язку / Бак Р.І., Чайковський І.Б., Бурачок Р.А. // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". № 766 "Радіоелектроніка та телекомунікації". – Львів. – 2013. – С. 102-107.

4. Yasser Hayali. Models and mechanisms for traffic balancing of IPTV VoD service / Yasser Hayali, Orest Lavriv, Bogdan Buhyl, Roman Bak, Mykhailo Klymash // *International Journal of Services, Economics and Management*. – 2013. – Т.5, № 4. – С. 291-300.

5. Климаш М.М. Графо-аналітичний підхід до порівняння ефективності систем безпроводного зв'язку / М.М.Климаш, А.Г.Ложковський, О.А.Лаврів, Р.І.Бак // Зб. наук. пр. УАД. "Комп'ютерні технології друкарства". Вип. 27. – Львів. – 2011. – С. 189-193.

6. Яремко О.М. Метод адаптивного розподілення потужності в мобільній мережі при варіації абонентського навантаження / О.М. Яремко, Т.А. Максим'юк, Р.І. Бак // Національна академія наук України. Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова. Збірник наукових праць. Вип. 66. – Київ. – 2012. – С. 137-143.

7. П.О. Гуськов. Проектування мережі С-RAN за критерієм наскрізної затримки / П.О. Гуськов, Р.І. Бак, А.Л. Швець, Р.С. Колодій, Б.В. Коваль // Зб. наук. пр. УАД. "Комп'ютерні технології друкарства". – Львів. – 2016. – С. 98-106.

8. Климаш М.М. Конвергенція мобільних мереж GSM, CDMA, WiMAX на основі технології NGN-SOFTSWITCH та формування ідеології єдиного терміналу / М.М.Климаш, О.А. Лаврів, Р.І. Бак // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації №618. Львів 2008. – С. 95-101.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

9. Roman Bak. Load Balancing Based on Multi-Hop Handover for Wireless Cellular Networks / Roman Bak, Orest Lavriv, Bohdan Koval // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). – Ukraine, Kyiv. – May-June, 2017 – P. 1103-1106.

10. O Lavriv. Heterogeneous network capacity distribution among service flows / O Lavriv, B Buhyl, P Huskov, R Bak // The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM): proceedings 14th International conference CADSM-2017. – Ukraine, Polyana. – February, 2017. – P. 173-175.

11. Orest Kostiv. Decrease of local overloads in heterogeneous wireless networks considering users mobility/ Orest Kostiv, Roman Bak // The experience of

designing and application of CAD systems in microelectronics (CADSM): proceedings 13th International conference CADSM-2015. – Ukraine, Polyana. – February, 2017. – P. 490-494

12. Гуськов П.О. Метод розміщення базових станцій в мережах мобільного зв'язку п'ятого покоління / Гуськов П.О., Бак Р.І. // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016. – Київ, Україна. – Квітень, 2016. – С. 247 – 250.

13. Бак Р.І. 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". - Львів, Україна. – Листопад, 2012. – С. 89-91.

14. Бак Р. Порівняння ефективності систем безпроводного зв'язку графо-аналітичним методом / Бак Р., Поліщук А. // Матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2011. – Львів, Україна. – Листопад, 2011. – С. 252-253.

ABSTRACT

Bak R.I. Increasing the availability of telecommunication services in mobile networks. – Proficiency scientific treatise 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» (172 – Telecommunications and Radioengineering). – Lviv Polytechnic National University of the Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The dissertation is devoted to the solution of the actual scientific problem of developing models, methods and algorithms for increasing the accessibility of telecommunication services by balancing the subscriber load during peak loads on separate segments of mobile communication networks, ensuring the requirements for the quality of providing telecommunication services without the involvement of additional resources.

In the first section an analytical review of scientific works on the topic of dissertation research was carried out to establish conditions and requirements for the provision of communication services in wireless access networks. It is established that the mechanisms of mobility management and balancing of subscriber loading have a decisive influence on the processes of providing communication services and ensuring their continuity. Most of the balancing methods of subscriber loading can be divided into two main types: load balancing by the criterion of probability of blocking queries and balancing based on the load factor. For the first type, a smaller amount of service data is characteristic, as the process of balancing begins only at the moment of exceeding the threshold of the quotient lock rate. For example, the load distribution between the cells is carried out by reducing the radius of the overload and increasing the radius of the adjacent cells to it by adjusting the power of the radiation of the base stations. The second type of load balancing is the best from a practical point of view, because it takes into account the bandwidth and the degree of load balancing both when selecting a cell, and in the process of performing a handler. For example, the load balancing process starts with the most loaded cell to achieve even load on the network. However, all considered mechanisms in the process of load balancing use the resources of neighboring cells. Therefore, such mechanisms are not suitable for situations where, in the conditions of peak load, there are whole groups of adjacent cells. Hence the wording of the scientific problem of work.

The second section of the paper is devoted to the development of methods and models for improving accessibility in cellular networks of wireless access through the application of an improved load balancing mechanism. In order to increase the load balancing efficiency, the model of the cellular structure of the wireless network in the form of a graph is proposed (without taking into account or taking into account the overlap of non-adjacent sectors), where each node corresponds to the sector of the cell. Junction nodes denote the existence of a common service area for the relevant sectors, which is the basic condition for balancing the load in the research network. The method of balancing the subscriber load in a radio network cellular network, which differs from the known use in the process of balancing the resources of not

only adjacent cells, but also more distant in relation to the target, and takes into account the load capacity of the cells, the type of user's load, the speed of the transfer of the subscriber terminal, and ensures the transfer of the amount of subscriber load from the overloaded to any available unloaded cell without growth the level of requests loss and without changing the parameters of the radio network. The method of estimating the efficiency of the use of a communication channel was contributed, which, unlike the known ones, uses a generalized criterion of frequency and energy efficiency of the "terminal-base network" system, takes into account the distance between the Shannon limit and the point indicating the frequency and energy efficiency of the system and allows to determine the best strategy for wireless access planning. The application of this method provides the choice of the most optimal communication channel for carrying the load in the process of its balancing.

In the third section, an imitation model for calls processing in a wireless network cell has been developed that uses the proposed method for balancing the user's load, the method for assessing the efficiency of the use of the communication channel, as well as the model of the cellular structure of the network. The simulation model model takes into account the distribution of speeds and directions of subscribers, their network activity at different times during the day, thereby implementing different scenarios for their movement and generation of load, which provides the flexibility and universality of simulation results. Taking into account the trajectory of subscriber traffic it allows to predict the loading of individual zones of the cellular network, which will increase the degree of balancing of subscriber load. Generation of subscriber terminals activity occurs simultaneously taking into account the duration of communication sessions, the intensity of receipt of requests for their beginning, the intensities of the beginning and the completion of their processing, and the maximum simultaneous number of sessions in the system, which allows to form a subscriber load on the network with local overloads and increase the adequacy of process modeling functioning of the cellular network of wireless communication. In order to verify the effectiveness of the proposed models and methods, a simulation of the operation of the cellular network of wireless access was carried out and it was

established that an improved model of balancing the subscriber load in the radio network cellular network allows to reduce the loss of requests for services to 15% in the conditions of peak loadings on separate segments of the network

In the fourth section, in order to increase the efficiency of the provision of services in the cellular networks of radio access, a system of data collection and processing was contributed, which allows to reduce the duration of the iteration loop of the proposed load balancing algorithm. In order to limit the size of the task of finding a load to be balanced in real terms, the classification of active terminals at the speed of movement is proposed. An algorithm for deploying base stations in 5G networks is also proposed, which enables to reduce the number of active macro- and micro-BSs in the network by sequentially excluding base stations and the assignment of serving BSs to individual users on the basis of calculation of the weighted distance between the selected user and all the BSs on the network. The developed algorithm allows to reduce from 30% to 40% the number of active BSs, while maintaining sufficient quality of service for most subscriber load scenarios.

Key words: mobile cellular networks, handover, load balancing, efficiency of radio channel utilization.

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

1. B. Buyl, P. Huskov, O. Lavriv, R. Bak, and A. Luntovskyy, "Maximization of Service Flows Rates as a Solution to Network Capacity Allocation Problem," *Internet Things Eng. Appl.*, Vol. 3 no. 1, May 2018, pp. 1-10

2. Bak R.I. Imitation macromodel of subscribers behavior in the network of cellular communication / Bak R.I., Guskov P.O., Lavriv O.A. // *The Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"* No. 849. "Radio Electronics and Telecommunications". – Lviv. – 2016. - P. 274-284.

3. Bak R.I. Method of balancing the subscriber load of the network of cellular communication / Bak R.I., Tchaikovsky I.B., Burachok R.A. // *The Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic"*. № 766. "Radio Electronics and telecommunications". – Lviv. - 2013. - P. 102-107.

4. Yasser Hayali. Models and mechanisms for traffic balancing of IPTV VoD service / Yasser Hayali, Orest Lavriv, Bogdan Buhyl, Roman Bak, Mikhaïlo Klymash // International Journal of Services, Economics and Management. - 2013. - V.5, № 4. - P. 291-300.

5. Klymash M.M. Graph-analytical approach to comparing the efficiency of wireless communication systems / M.M. Klymash, A.G. Lozhkovsky, O.A. Lavriv, R.I. Bak // Computer Printing Technologies. - Lviv. - 2011. - Issue 27. – P. 189-193.

6. Yaremko O.M. Method of adaptive power distribution in mobile network at variation of user's load / O.M. Yaremko, T.A. Maximyuk, R.I. Bak // National Academy of Sciences of Ukraine. Institute of Modeling Problems in Power Engineering them. G. E. Puhov: Collection of scientific works. - Kiev. - 2012. – Issue 66. - P. 137-143.

7. Guskov P.O. Designing the C-RAN network according to the criterion of cross-delineation / P.O. Guskov, R.I. Bak, A.L. Shvets, R.S. Kolodiy, B.V. Koval // Computer Printing Technologies. - Lviv. – 2016. - pp. 98-106.

8. Klymash M.M. Convergence of mobile networks GSM, CDMA, WiMAX on the basis of technology NGN-SOFTSWITCH and formation of the ideology of a single terminal / M.M. Klymash, O.A. Lavriv, R.I. Bak // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". No. 618. "Radio Electronics and telecommunications". - Lviv. - 2008. - P. 95-101.

Proceedings that certify an approvement of thesis materials:

9. Bak R. Load Balancing Based on Multi-Hop Handover for Wireless Cellular Networks / Roman Bak, Orest Lavriv, Bohdan Koval // 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). - Ukraine, Kyiv. - May-June 2017 - P. 1103-1106.

10. Lavriv O. Heterogeneous network capacity distribution among service flows / O. Lavriv, B. Buhyl, P. Huskov, R. Bak // The experience of designing and applying CAD systems in microelectronics (CADSM): proceedings 14th International conference CADSM-2017. - Ukraine, Polyana. - February, 2017. - P. 173-175.

11. Kostiv O. Decrease of local overloads in heterogeneous wireless networks considering user mobility / Orest Kostiv, Roman Bak // CADSM-2015 experience in the design and application of CAD systems in microelectronics. - Ukraine, Polyana. - February, 2017. - P. 490-494

12. Guskov P.O. Method of placement of base stations in mobile networks of fifth generation / Guskov P.O., Bak R.I. // X International scientific and technical conference "Problems of telecommunications" PT-2016. - Kyiv, Ukraine. - April, 2016. - C. 247-250.

13. Bak R.I. A method for increasing the availability of radio resources of mobile communication systems in an overloaded mode of work / R.I. Bak, I.B. Tchaikovsky, Ya.V. Shyika, M.M. Gnatchuk // Scientific-methodical conference "Modern problems of telecommunications and training of specialists in the field of telecommunications - 2012". - Lviv, Ukraine. - November, 2012. - P. 89-91.

14. Bak R. Comparison of the efficiency of wireless communication systems by graph-analytical method / Bak R., Polishchuk A. // Materials of the 5th International Conference of Young Scientists, CSE-2011. - Lviv, Ukraine. - November, 2011. - p. 252-253.

ЗМІСТ

Вступ.....	15
РОЗДІЛ 1. Аналіз методів, моделей та алгоритмів забезпечення доступності послуг у коміркових мережах мобільного доступу	21
1.1.Методи балансування навантаження в мережах мобільного зв'язку..	21
1.1.1. Сценарії та цілі балансування навантаження.....	21
1.1.2. Узагальнений процес балансування навантаження.....	22
1.1.3. Балансування навантаження в мережах 2G GSM.....	27
1.1.4. Балансування навантаження в мережах CDMA 3G.....	29
1.1.5. Особливості балансування навантаження в мережах LTE.....	31
1.2.Аналіз процедури управління мобільністю в LTE	35
1.3.Висновки до розділу 1	40
РОЗДІЛ 2. Розроблення та дослідження методів і алгоритмів підвищення доступності послуг в коміркових мережах мобільного зв'язку	42
2.1.Модель топологічної структури коміркової мережі мобільного зв'язку на основі графу.....	42
2.2.Метод балансування абонентського навантаження у мережі мобільного зв'язку	47
2.3.Метод порівняння ефективності використання каналів зв'язку.....	52
2.4.Прогнозування зони перебування активного абонента за допомогою лінійної апроксимації	56
2.5.Висновки до розділу 2	58
РОЗДІЛ 3. Моделювання процесу обслуговування абонентів у коміркових мережах мобільного доступу	60
3.1.Формування структури мережі коміркового зв'язку	60
3.2.Моделювання переміщення абонентів	64
3.3.Моделювання активності абонентських терміналів.....	68
3.4.Моделювання процесу обслуговування викликів у системі мобільного зв'язку.	72

3.5.Висновки до розділу 3	77
РОЗДІЛ 4. Оптимізація структури коміркових мереж мобільного зв'язку із забезпеченням максимальної доступності телекомунікаційних послуг	79
4.1.Система моніторингу стану активних термінальних пристроїв	79
4.2.Метод адаптивного розподілення потужності в мобільній мережі при варіації абонентського навантаження.....	81
4.3.Оцінювання максимального обсягу навантаження, що може бути переспрямоване у мережі за обраним шляхом	88
4.3.1. Формулювання завдання максимізації інтенсивностей сервісних потоків у системі мобільного зв'язку як завдання лінійного програмування.....	89
4.3.2. Вибір методу розв'язання завдання лінійного програмування....	92
4.3.3. Приклад розв'язання завдання максимізації інтенсивностей сервісних інформаційних потоків у системі мобільного зв'язку.....	94
4.4.Вплив балансування сервісних потоків на тривалість очікування надання послуг у системах мобільного зв'язку	101
4.5.Метод призначення базових станцій в мережах 5 покоління	111
4.6.Проектування мережі C-RAN за критерієм наскрізної затримки.....	115
4.7.Висновки до розділу 4	123
ВИСНОВКИ.....	125
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	128
ДОДАТОК 1. Програмний код імітаційної моделі обслуговування викликів у мережі мобільного зв'язку	143
ДОДАТОК 2. Акти впровадження результатів роботи.....	184
ДОДАТОК 3. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	186

ВСТУП

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 множини 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/призначення 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.

Результати спільних наукових праць було використано у дисертаційних роботах таких співавторів, як Лаврів О.А. [89] (для дослідження методів максимізації інтенсивностей сервісних інформаційних потоків у розподіленій телекомунікаційній мережній платформі, а також впливу процесів балансування сервісних потоків на тривалість очікування надання послуги), Яремко О.М. [90] (для реалізації методу адаптивного розподілення потужності

шляхом конфігурування радіоінтерфейсів системи мобільного зв'язку в умовах змін обсягів абонентського навантаження).

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, 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, 8 таблиць, список використаних джерел зі 121 найменування, 3 додатки.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ, МОДЕЛЕЙ ТА АЛГОРИТМІВ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДОСТУПНОСТІ ПОСЛУГ У КОМІРКОВИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ДОСТУПУ

1.1. Методи балансування навантаження в мережах мобільного зв'язку

1.1.1. Сценарії та цілі балансування навантаження

Внаслідок випадкового розподілу абонентів та експоненційно зростаючому попиту на послуги безпроводного передавання даних мобільні мережі стикаються з проблемами, які спричинені нерівномірним розподілом навантаження. Рис. 1.1 демонструє сценарій нерівномірного розподілу навантаження.

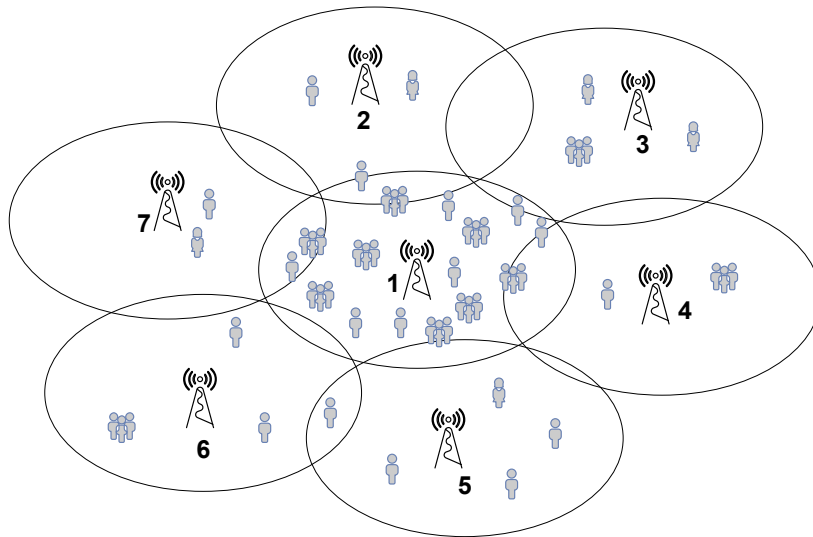


Рис. 1.1 Сценарій нерівномірного розподілу навантаження

Як показано на Рис. 1.1, БС 1 (комірка 1) знаходиться в оточенні шести сусідніх комірок. Зазвичай оператори визначають зону дії БС та попередньо розподіляють спектральні ресурси, базуючись на звичайному їх завантаженні, яке оцінюється на основі густини населення. Проте, під час соціальних подій (музичний концерт, мітинг, футбольний матч) тисячі користувачів збираються на невеликій території, наприклад комірка 1 Рис. 1.1. Трафік, згенерований

цими користувачами, часто перевищує пропускну здатність БС 1. Таким чином комірka 1 стає надмірно завантаженою, в той час, коли навантаження, створене користувачами в сусідніх комірках, є незначним. Це один з прикладів, коли мережі мобільного зв'язку зазнають нерівномірного розподілу навантаження.

Вплив нерівномірного розподілу навантаження відображається в різних аспектах. Надмірно завантажена комірka, наприклад, в даному випадку комірka 1, може відкидати запити доступу викликів нових користувачів, може не забезпечити обслуговування користувачів з необхідним QoS [28]. А спектр сусідніх комірок, наприклад, таких комірka 4 і комірka 5, недостатньо використовується.

Балансування навантаження – це одна із функцій управління радіоресурсами. Балансування навантаження може зменшити негативний вплив нерівномірного розподілу навантаження та покращити продуктивність мережі. Загальноприйнятими показниками ефективності для оцінки схеми балансування навантаження є:

- імовірність блокування викликів;
- частота невдалої передачі (для схем балансу навантаження на основі пересування);
- зменшення навантаження у надмірно завантаженої комірці.

1.1.2. Узагальнений процес балансування навантаження

Загальний процес балансування навантаження включає в себе три етапи. Мережевий контролер, наприклад, мобільний комутаційний центр в мережах 2G, ідентифікує комірku з перевантаженням (гаряча комірka), відповідно до умов її завантаженості. Тоді, гаряча комірka, вибирає менш завантажені сусідні комірki, як своїх партнерів. Після вибору партнера перевантажена комірka приймає конкретну схему балансування навантаження, щоб розділити завантаження з партнерами, наприклад, перерозподіл вільних каналів від партнерів або переміщення навантаження до своїх партнерів, як створене

користувачами на краю комірки. На Рис. 1.2 наведено приклад нерівномірного розподілу навантаження.

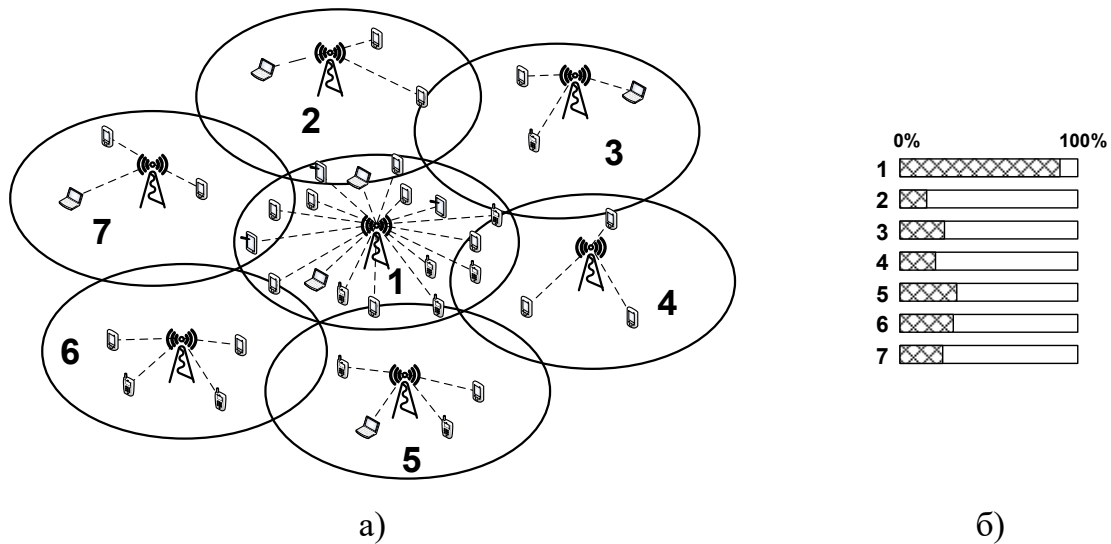


Рис. 1.2. Приклад нерівномірного розподілу навантаження між комірками: а) розподіл терміналів; б) завантаженість комірок

Розглянемо етапи загального процесу балансування навантаження.

1) **Оцінка завантаження.** Оцінка навантаження є важливим кроком для схем балансування навантаження. Завантаження комірки сформульовано як [3GPP10b]:

$$L = \frac{\text{Кількість задіяних несучих частот у комірці}}{\text{Загальна кількість несучих частот у комірці}} \quad (1.1)$$

Згідно з (1.1) навантаження комірки знаходиться в діапазоні від 0% до 100% ($0\% < L < 100\%$). Навантаження будь-якої комірки можна тут розділене на різні рівні:

- **Перевантаження:** трафік, створений користувачами, дорівнює або перевищує об'єм комірки, а саме, у комірці використані усі несучі.

- **надмірне навантаження:** в комірці використана велика кількість несучих, а саме, $100\% > L > LHL$. LHL є порогом для виявлення надмірно завантаженої комірки. Значення LHL становить 70% [33].

- **Легке навантаження:** в комірці використовується невелика кількість несучих частот, а саме, $L < LHL$.

Зверніть увагу, що рівняння (1.1) є прикладом розрахунку навантаження комірки [16]. Формула для розрахунку завантаження комірки базується на конкретній технології множинного доступу та схеми балансування навантаження. Крім того, різні схеми балансування можуть мати різні методи або значення порогу для визначення рівня завантаження комірки.

Балансування навантаження може бути запущене, коли навантаження комірки дорівнює або вище, ніж поріг LNL надмірного завантаження. У цьому випадку комірка з навантаженням вище LNL визначається як гаряча комірка. Наприклад, на Рис. 1.2, комірка **1** – це гаряча комірка, рівень завантаження якої запускає балансування навантаження.

2) **Вибір партнера.** Другий крок балансування навантаження комірки **1** полягає у виборі одної або кількох сусідніх комірок (наприклад, комірка **2**, комірка **3** ... комірка **7** на Рис. 1.2) як партнерів. Якщо комірка **1** вибирає неприйнятну по рівню завантаження сусідню комірку як свого партнера, то вона може стати надмірно завантаженою після балансування навантаження, що спричинить вищу ймовірність блокування викликів. У багатьох звичайних схемах балансування навантаження, таких як [39] [34] [29] [26] [38], цей крок ґрунтується на навантаженні сусідньої комірки.

3) **Перерозподіл каналів або переміщення навантаження.** Після вибору партнера/ів гаряча комірка виконує спеціальну схему балансування, щоб розділити навантаження з вибраними партнерами. Загалом, звичайні схеми балансування навантаження можна розділити на дві категорії: схеми перерозподілу каналів (Рис. 1.3) та схеми переміщення навантаження (Рис. 1.4).

Основна ідея схеми перерозподілу каналів полягає в тому, що гаряча комірка запозичує частину вільного спектру від сусідніх комірок. Схеми перерозподілу каналів підходять для мобільних мереж з коефіцієнтом повторного використання частоти більше (FRF) 1, де сусідні комірки використовують різний спектр частот.

Як показано на Рис. 1.4 (а), комірка **1**, **4** та **5** для обслуговування користувачів використовують спектр, який не перекривається. Коли комірка **1**

завантажується надмірно, вона може позичати вільні частотні ресурси з комірок 4 і 5. Внаслідок цього комірка 1 може обслуговувати більше нових викликів від користувачів і забезпечити кращу якість обслуговування.

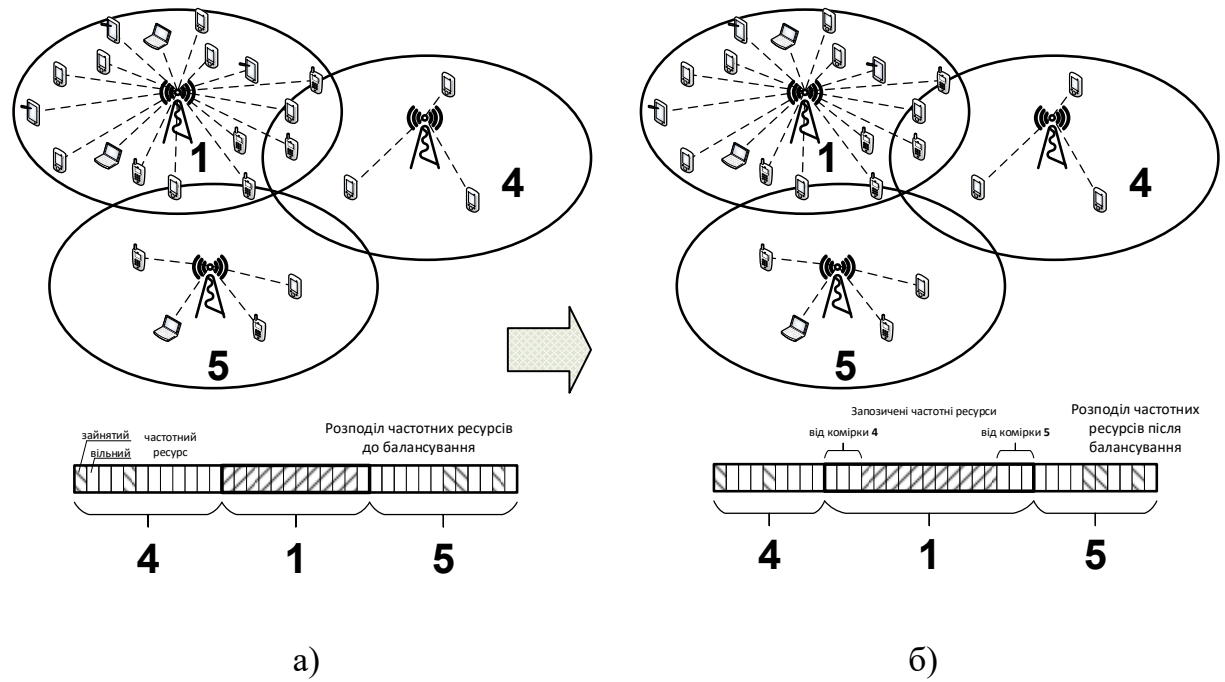


Рис. 1.3. Балансування навантаження на базі перерозподілу каналів

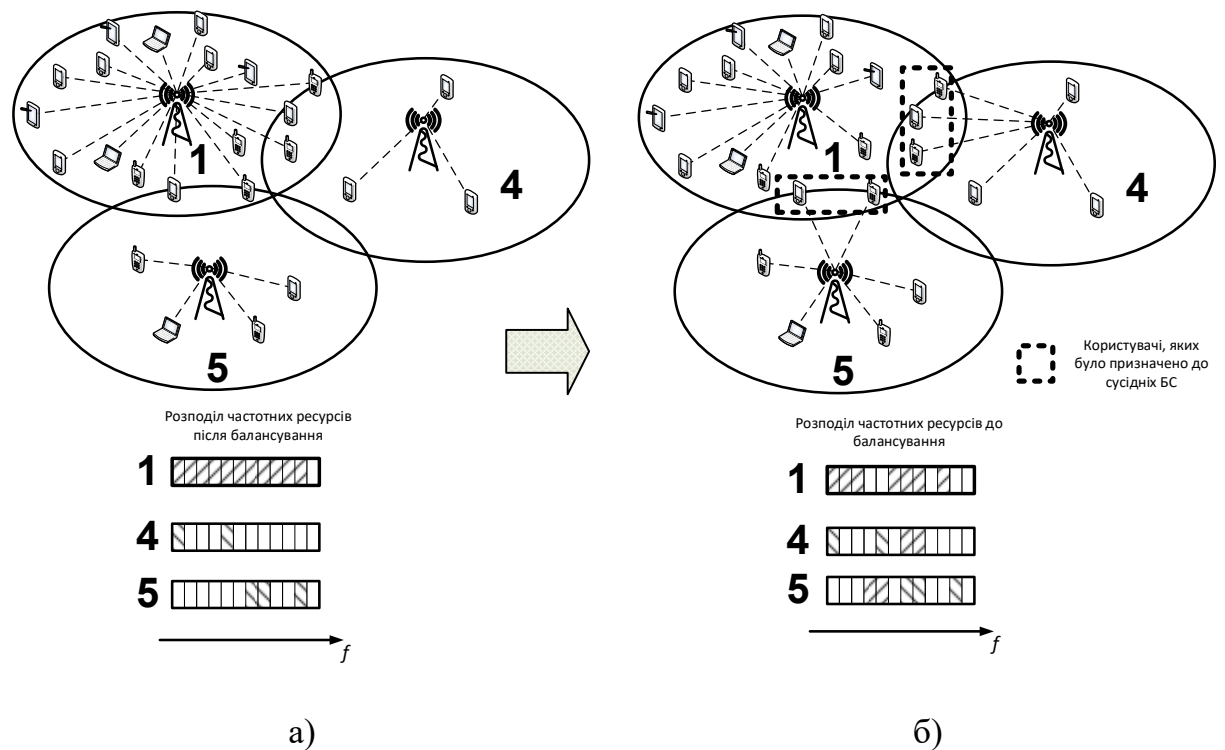


Рис. 1.4. Балансування навантаження на основі переміщення навантаження

Мобільні мережі з $FRF > 1$ можуть ефективно зменшувати міжкоміркові взаємні впливи. Проте, ці мережі мають меншу загальну спектральну ефективність, ніж мережі, які використовують повне повторне використання частот ($FRF = 1$), тобто різні комірки використовують спектр, що перекривається [31]. У цьому типі мереж, балансування навантаження базується на переміщенні навантаження: гаряча комірка переміщує крайових користувачів до сусідніх комірок за допомогою хендоверу (користувач визначається крайовим, тобто на межі між комірками, якщо різниця середніх значень прийнятих пілотних сигналів (RSRP) від сусідніх комірок менша, ніж порогове значення, наприклад, 3 дБ [21] [32]). На Рис. 1.4 (б) показана мережа з $FRF = 1$, комірка 1, 4 та 5 використовують однакову смугу пропускання спектру.

Коли комірка 1 стає надмірно завантаженою, відбувається переміщення деяких граничних користувачів на обслуговування у комірки 4 та 5. Це дозволяє зменшити кількість користувачів, які обслуговуються комірці 1, а вивільнений спектр використати для надання послуг зв'язку користувачам за новими запитами.

Протягом останніх двох десятиліть балансування навантаження було досліджено як в академічній, так і в промислових сферах. Кожна схема балансування навантаження пов'язана з конкретною технологією множинного доступу та технологією повторного використання частот в мережах мобільного зв'язку. На Рис. 1.5 показані широко використовувані схеми балансування навантаження від 2G до мобільних мереж LTE / LTE-Advanced.

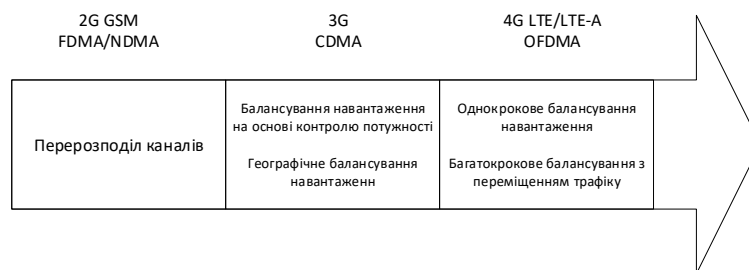


Рис. 1.5. Типові схеми балансування навантаження для різних поколінь мереж мобільного зв'язку

1.1.3. Балансування навантаження в мережах 2G GSM

На Рис. 1.6 показані дві технології множинного доступу, що використовуються в глобальних мережах мобільної зв'язку (GSM). У режимі множинного доступу з частотним розділенням (FDMA) сигнали для різних користувачів передаються в різних діапазонах частот одночасно. У режимі множинного доступу Time Division (TDMA) сигнали для різних користувачів передаються в тій же смузі частот у різний час [19].

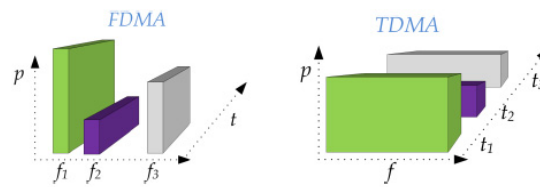


Рис. 1.6. Множинний доступ з частотним (FDMA) та часовим (TDMA) розподілом каналів [19]

GSM мережі водночас використовують FDMA та TDMA. У FDMA оператор розподіляє весь спектр на кілька несучих частот, і кожна носуча має унікальну частоту. У TDMA кожна несуча розділена на вісім часових інтервалів. Тому користувачі передають свої сигнали в різні часові інтервали різних несучих.

Якщо сусідні комірки призначають своїм користувачам однаковий часовий інтервал на однакових несучих, то ці користувачі зазнають суттєвих спільноканальних інтерференційних завад. Для того, щоб вирішити цю проблему, оператори мереж GSM використовують технологію повторного використання частоти для розділення несучих каналів в сусідніх комірках. На Рис. 1.7 показана типова 7-елементна технологія повторного використання частоти (FRF = 7). Мережа мобільного зв'язку складається з трьох кластерів, у кожному кластері – 7 комірок. Всі несучі поділяються на 7 груп, група А, В, С, D, Е, F, G, відповідно. У кластері кожній комірці попередньо виділяють одну відповідну групу нусучих частот. Для того, щоб зменшити спільноканальні впливи, група частот може бути повторно використана в комірках сусідніх

кластерів, якщо відстань перевищує мінімальну відстань повторного використання частоти (minimum frequency reuse distance).

Запозичення каналів є популярним методом балансування навантаження в мережах GSM [20]. Основна ідея полягає в тому, що гарячою комірка "позичає" несучі з внутрікластерних сусідніх комірок. Наприклад, на Рис. 1.7 передбачається, що Cell1 - це комірка з надмірним завантаженням і використовує всі несучі в групі A, тоді як Cell6 та Cell7 завантажені злегка. Потім Cell1 запозичує частину вільних частот з сусідніх внутрікластерних комірок, включаючи вільні частоти у групі F із Cell6, і вільні несучі в групі G із Cell7.

Існує три типові схеми перерозподілу каналів для GSM

Проста схема запозичень (SB - Simple borrowing scheme): гаряча комірка використовує вільну несучу з сусідніх внутрікластерних комірок, і використовується механізм блокування каналу [39].

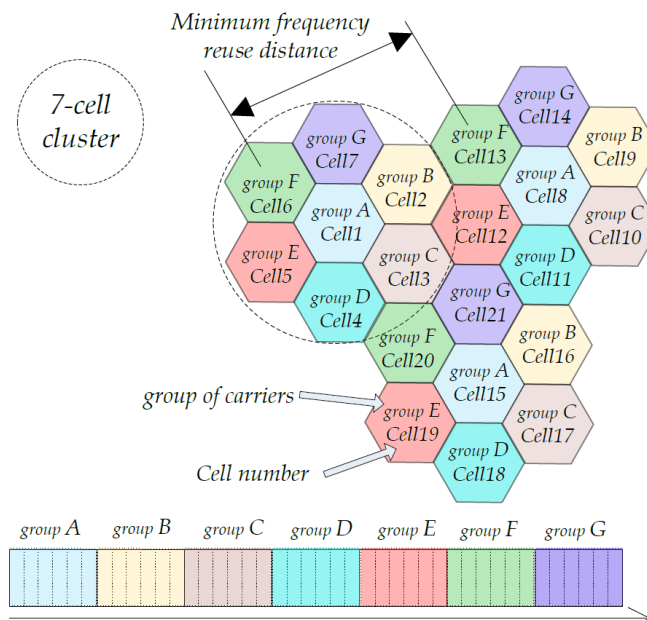


Рис. 1.7. Повторне використання частот у GSM

Механізм блокування каналу спрямований на зменшення спільноканальної інтерференції, що виникають внаслідок "запозичення" частотних каналів. Отже, коли гаряча комірка позичає несучу, комірки сусідніх кластерів в межах

мінімальної відстані повторного використання частот не можуть використовувати цю несучу [35]. Наприклад, на Рис. 1.7, якщо Cell1 "позичає" частоту (у групі F) від Cell6, Cell13 і Cell20 із сусідніх кластерів не можуть використовувати цю несучу (у групі F). Це пояснюється тим, що відстань від Cell₁-to-Cell₁₃ і Cell₁-to-Cell₂₀ менша за мінімальну відстань повторного використання частоти.

- Гібридна схема призначення (НА - Hybrid assignment scheme) також базується на перерозподілі каналів [27] [39]. У НА кожна комірка поділяє свої частоти на два набори: один набір вона залишає тільки для власного використання; а інший набір у поєднанні з *механізмом блокування каналу*, можуть використовувати сусідні комірки [39].

- Розподіл каналів без схеми блокування (CBWL – Channel borrowing without locking scheme). У CBWL перевантажена комірка використовує "позичені" частоти для надання послуг користувачам у внутрішній зоні комірки, використовуючи зменшений рівень потужності сигналу. Таким чином, спільноканальні інтерференційні завади, спричинені "позиченими" частотами, трохи більші, ніж для SB / НА. Тим не менш, механізм блокування каналів у CBWL не є необхідним, а однакові частоти можуть використовуватися комірками в сусідніх кластерах [25]. CBWL може досягати більш ефективного використання спектру, у порівнянні з SB та НА.

1.1.4. Балансування навантаження в мережах CDMA 3G

Множинний доступ. Стандарти 3G (UMTS, cdma2000) використовують технологію широкосмугового множинного доступу з кодовим розділенням каналів (CDMA), як показано на Рис. 1.8. У комірни користувачі одночасно передають сигнали в тій же смузі частот. Тому сигнал користувача діє як завада в каналі зв'язку для інших користувачів. Балансування навантаження може поліпшити продуктивність CDMA-мереж за рахунок зменшення кількості користувачів у надмірно завантаженій комірни, тим самим зменшуючи внутрішньокоміркові завади.

У мережах 3G CDMA всі комірки використовують один і той самий спектр, що залишає мало місця для перерозподілу каналів. Відповідно, балансування навантаження має інший підхід: завантажена комірka передає частину навантаження до менш завантажених сусідніх комірок [30, 35, 37, 49]. Розглянемо два основні типи балансування навантаження в мережах CDMA, включаючи схему балансування навантаження на основі потужності та схему географічне балансування навантаження.

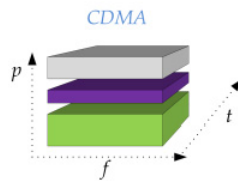


Рис. 1.8. Множинний доступ CDMA

Балансування навантаження на основі потужності. Рис. 1.9 ілюструє основну ідею схеми балансування навантаження на основі потужності в мережах WCDMA.

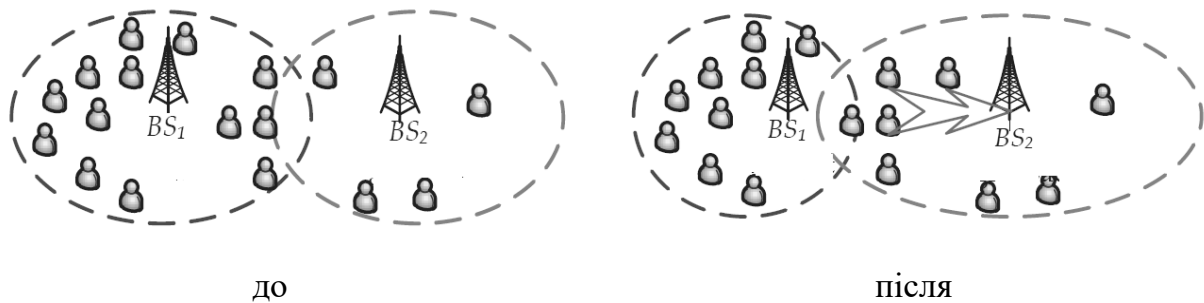


Рис. 1.9. Балансування навантаження на основі контролю потужності

Завантажена BS_1 зменшує потужність передавання каналі або відхиляє запити користувачів на збільшення потужності передавання [WZ05]. Внаслідок цього частину користувачів буде переміщено до менш завантаженої BS_2 . Зменшена кількість користувачів в $Cell_1$ призведе до покращення відношення сигнал/шум для $Cell_1$.

Географічне балансування навантаження (GLB – Geographic Load Balancing) досліджено в [30] [37]. Попередньою умовою GLB є те, що кожен БС

оснащена смарт-антенами. Смарт-антени використовують смарт-алгоритми обробки сигналів для визначення напрямку призначення сигналу, а потім динамічно відслідковують цільового користувача формуванням прменевої діаграми спрямованості антени [37].

Контролер мережі радіозв'язку (RNC – radio network controller) збирає інформацію про місцезнаходження користувачів, щоб дізнатись про змінний в часі розподіл навантаження в мережах мобільного зв'язку. Тоді, RNC використовує складні обчислення, такі як генетичний алгоритм, для оптимізації покриття кожної комірки і налаштовує шаблон розумних антен. Таким чином, GLB розумно змінює покриття мобільного зв'язку за географічним розподілом навантаження.

У порівнянні з схемою балансування навантаження на основі контролю потужності, GLB може більш точно налаштовувати покриття комірки. Це пояснюється тим, що складні обчислення дозволяють точно регулювати шаблон антени, тим самим забезпечуючи хороший розподіл навантаження між комірками. Обмеження GLB полягає в тому, що БС повинні бути обладнані розумними антенами, які є більш дорогими, ніж звичайні секторні антени.

1.1.5. Особливості балансування навантаження в мережах LTE

У порівнянні з мережами 3G, мережа 4G (3GPP LTE/LTE-Advanced мережі), забезпечує більш високі вимоги до швидкості передачі даних для сервісів. Завдяки високій ефективності використання спектру для мультиплексування з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDM - Orthogonal Frequency Division Multiplexing) мережі LTE/LTE-Advanced використовують множинний доступ з ортогональним частотним розділенням каналів (OFDMA - Orthogonal Frequency Division Multiple Access) як технологію множинного доступу.

Основною ідеєю системи OFDM є використання вузьких взаємно ортогональних піднесучих для передавання даних. Як показано на Рис. 1.10 (рис. 4.4 у [22]), OFDM розподіляє потік даних з високою швидкістю на кілька

паралельних потоків даних з низькою швидкістю. Кожний низькошвидкісний потік даних передається на окремій піднесучій. У момент відбору одиночної піднесучої, інші піднесучі мають нульове значення. Тому піднесучі є ортогональними.

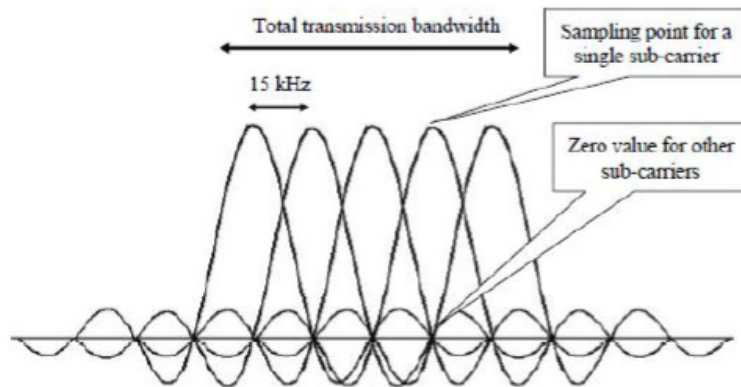


Рис. 1.10. Піднесучі OFDM [22]

OFDMA досягається шляхом призначення різних піднесучих для різних користувачів. OFDM/OFDMA надає наступні переваги для мереж мобільного зв'язку:

- Висока спектральна ефективність: комірка виділяє різні піднесучі для різних користувачів. Через ортогональність піднесучих, внутрікоміркові перешкоди значно послаблюються. Тому OFDMA-система може досягти високої швидкості [36].
- Частотно-селективні загасання: система OFDMA може ефективно боротися з частотно-селективним загасанням. Це пов'язано з тим, що OFDM перетворює широкопasmову передачу на вузькопasmове передавання на декількох піднесучих, а кожна піднесуча може бути використана як канал з плоским затуханням [22].
- Гнучкий розподіл ресурсів: відповідно до умов каналу система OFDMA може вибирати певні піднесучі для передавання, тим самим забезпечуючи гнучкий розподіл ресурсів; OFDMA-система також може повною мірою використовувати різноманіття частот та користувачів для досягнення високої продуктивності системи [22, 36].

Для досягнення високої ємності комірки, одна з технологій повторного використання частоти в мережах LTE / LTE-Advanced полягає в тому, що всі комірки мають один і той самий спектр (FRF = 1) [17, 31]. Схеми балансування навантаження на основі запозичень каналів, які широко використовуються в мережах 2G GSM, не широко використовуються в цих мережах.

В мобільних мережах LTE / LTE-Advanced, що базуються на OFDMA, внутрікоміркова інтерференція є незначною через ортогональність піднесучих. [86] Крім того, LTE / LTE-Advanced є мережами розподіленими за керуванням. Варто відзначити, що при використанні розподілених мереж управління зі схемами балансування навантаження, що регулюють потужність, можуть виникнути проблеми з покриттям і сигналізацією. Тому схеми балансування навантаження на основі методів керування потужністю, які використовуються в мережах 3G CDMA, не набули широкого використання в мережах технології LTE / LTE-Advanced на базі OFDMA.

Для ефективного балансування навантаження в мережах LTE / LTE-Advanced 3GPP release-8 визначено балансування навантаження рухомих користувачів (MLB) як функції SON₁ (самоорганізованих мереж) [15]. MLB має на меті переміщення навантаження трафіку з комірки виду «hot spot» (яка є найбільш завантаженою) до менш завантажених сусідніх комірок, коригуючи зміщення каналу передачі (HO_{off}), щоб забезпечити неперервне передавання даних.

Як правило, MLB складається з двох етапів: вибору комірки-донора мережних ресурсів та переспрямування трафіку [40-42, 44-48, 68, 80, 83, 95]. На етапі вибору комірки-донора мережних ресурсів найбільш завантажена комірка вибирає менш завантажені сусідні комірки як партнерів, які також називаються «комірками-мішенями» або, в деяких схемах MLB, «вибраними сусідніми комірками». Цей етап у багатьох звичайних схемах MLB базується на завантаженні надлишковим трафіком сусідньої комірки.

На етапі балансування навантаження рухомих користувачів мережі мобільного зв'язку, комірка з найбільшим завантаженням обчислює обсяги

трафіку, які вимагають переміщення і налаштовує HO_{off} до кожної комірці-партнера. Налагоджений HO_{off} збільшує зону радіопокриття, тим самим переміщуючи користувачів на межі зони обслуговування комірки у вибрані комірці партнера [43]. Етап переспрямування трафіку ілюструється на Рис. 1.11, де Cell₁ - це комірці, яка має намір забрати на обслуговування трафік від партнерської Cell₂. Однак RSRP₂ користувача від BS₂ є слабшим, ніж RSRP₁ від BS₁, і, отже, користувач на межі зони обслуговування комірки не може одержати перенаправлення. Для того, щоб перемістити межу зони обслуговування комірки, BS₁ налаштовує його HO_{off} щодо BS₂.

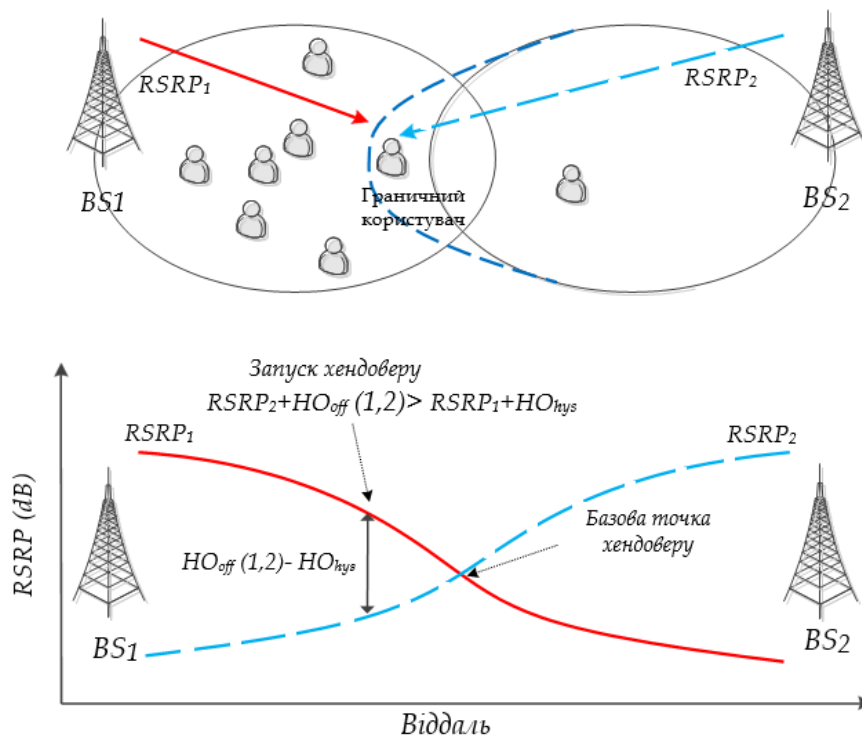


Рис. 1.11. Ілюстрація стадії переспрямування трафіку в MLB

Після того, як умова твердого переходу (подія A3 в [18]), що показано виразом (1.2), виконується, користувач буде переданий BS2.

$$HO_{off}(1, 2) + RSRP_2 > RSRP_1 + HO_{hys} \quad (1.2)$$

де HO_{hys} – заданий гістерезис хендоверу, $HO_{hys}=2\text{dB}$.

HO_{hys} може забезпечити значення гістерезису $HO_{off}(1,2)+RSRP_2$, що є на 2dB більшим, ніж RSRP₁. Це є необхідним для боротьби із «пінг-понг»

хендовером». Пінг-понг хендовер означає, що користувач дуже швидко призначається до Cell2 і потім знову повертається до Cell1 [23] і так далі.

1.2. Аналіз процедури управління мобільністю в LTE

Оскільки користувачі коміркових мереж мобільного зв'язку є рухомими і можуть під час користування послугами зв'язку переміщуватися, то виникає необхідність використання процедур, що дозволяють надавати безперервне обслуговування в процесі переходу між зонами дії різних базових станцій (БС). Саме для цього застосовується процедура хендоверу, яка забезпечує переключення обслуговування абонентського терміналу (АТ) з однієї базової станції на іншу [84-87, 98, 99].

Процедура хендоверу може бути застосована тільки до абонентських терміналів, які знаходяться в активному стані і зареєстровані в мережі. Розглянемо структуру процедури хендовера, яка характерна для мереж LTE (Long-Term Evolution).

На Рис. 1.12 процедура хендовера представлена по кроках. Вся процедура ділиться на три наступних етапи: підготовка, виконання і завершення хендовера. Етапи підготовки та виконання виконуються в мережі радіодоступу (RAN – Radio Access Network). Останній етап – завершення хендовера – задіює як мережу радіодоступу, так і опорну мережу (Core Network) [76].

БС використовує повідомлення RRC Connection Reconfiguration (RRC – Radio Resource Control – протокол контролю радіоресурсів) для повідомлення абонентського терміналу, в яких ситуаціях потрібно надсилати звіти щодо вимірювань (Measurement reports). Всього визначено 5 умов, при яких можлива відправка звітів і називаються вони подіями (Events) з номерами від А1 до А5 [85].

Для виконання внутрісистемного хендовера потрібне настання події А3 або А5. Подія А3 подія вказує на те, що рівень сигналу від сусідньої БС перевищив рівень сигналу від обслуговуючої БС на деяку задану величину.

Подія A5 відповідає ситуації, коли рівень сигналу від обслуговуючої БС став гіршим, ніж деяке задане значення 1, в той час, коли рівень сигналу від сусідньої БС став кращим, ніж задане значення 2 [85].

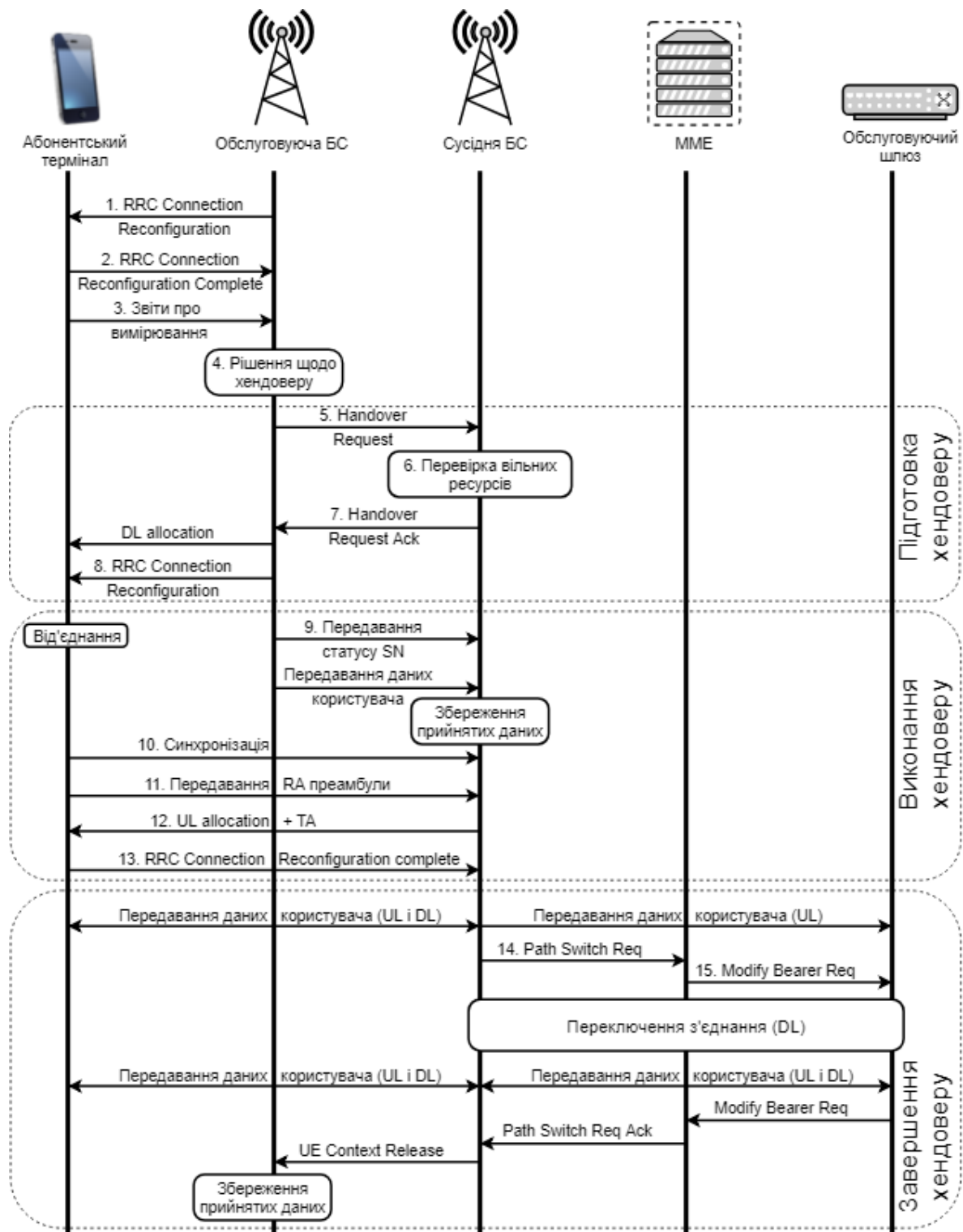


Рис. 1.12. Процедура хендоверу в LTE

Одразу, щойно АТ виявляє, що виконуються умови для одної з подій (A1-A5), він відправляє звіт про виміри (крок 3 на Рис. 1.12). У цьому повідомленні АТ повідомляє значення RSRP (Reference Signal Received Power – середнє значення потужності прийнятих пілотних сигналів) і RSRQ (Reference Signal Received Quality – середнє значення якості прийнятих пілотних сигналів) для обслуговуючого і сусіднього секторів, а також фізичний ідентифікатор сусіднього сектора (PCI – Physical Cell Identity). А глобальний ідентифікатор сектора (CGI - Cell Global Identity) буде передано тільки після спеціального запиту від БС, оскільки АТ знатиме його після прийняття блоків даних від сусідньої БС. CGI може знадобитися, коли для визначення сусідньої БС недостатньо лише ідентифікатора PCI сусіднього сектора. Наприклад, в процесі використання функціоналу ANR (Automatic Neighbour Relation – автоматичного визначення сусідів), коли в конфігураційних файлах не прописані сусідні БС. Ідентифікатора PCI буде достатньо, якщо сусідня БС вже є в базі даних обслуговуючої БС [86, 87].

Якщо обслуговуючій БС вдалося визначити сусідню БС і дотримані умови для виконання хендверу, то обслуговуюча БС починає ініціацію процедури хендверу, тобто відправляє повідомлення Handover Request сусідній БС (на Рис. 1.12 крок 5). Це повідомлення містить інформацію про АТ (так званий контекст АТ), а також про причину виконання хендверу. Якщо хендвер відбувається в ситуації погіршення якості радіоз'єднання з обслуговуючою БС і його покращення з сусідньою БС, то причина буде визначена як “Handover Desirable for Radio Reasons”. Іншою причиною хендверу може стати перерозподіл навантаження в мережі. Контекст АТ містить інформацію про те, які з'єднання потрібно створити на сусідній БС для обслуговування даного мобільного пристрою. Окрім цього, повідомлення Handover Request передає глобальний ідентифікатор сектора (CGI), в який переходить АТ, а також ідентифікатор вузла ММЕ (GUMMEI - Globally Unique MME Identity), де в поточний момент зареєстрований АТ. Цей ідентифікатор потрібний для виконання дій на останньому етапі хендверу.

Після того, як сусідня БС перевірить, що вона зможе забезпечити обслуговування ще одного АТ (процедура Admission Control, крок 6 на рисунку), вона відправляє відповідь повідомлення “Handover Request Acknowledge” обслуговуючої БС (крок 7 на Рис. 1.12). У “Handover Request Acknowledge” міститься повідомлення “RRC Connection Reconfiguration”, яке відправляється до АТ. У ньому передається PCI сусіднього сектора, параметри сусіднього сектора (ширина каналу, частоти низхідного і висхідного каналів, характеристики фізичних каналів і т.д.), а також параметри процедури випадкового доступу (RACH - Random Access Channel). Зокрема, там може бути вказаний номер преамбули, яка спеціально зарезервована для даного АТ на сусідній БС для виконання процедури хендоверу. Крім цього, в повідомленні “RRC Connection Reconfiguration” вказується значення таймера (T304), протягом якого АТ повинна виконати процедуру випадкового доступу (RACH). Якщо АТ не вдається успішно завершити цю процедуру до закінчення таймера, то вона починає процедуру відновлення RRC-з'єднання (RRC Connection Re-establishment). Значення таймера може складати: 50, 100, 150, 200, 500, 1000 або 2000 мс.

Після відправки повідомлення “RRC Connection Reconfiguration” обслуговуючій БС стартує етап виконання хендовера. Щоб не було втрати даних користувача, обслуговуюча БС відправляє повідомлення "SN Status Transfer", а також наявні дані користувача, до сусідньої БС. У цьому повідомленні передаються номери PDCP SN (Packet Data Convergence Protocol Sequence Number) для низхідного (DL) і висхідного (UL) з'єднань. Для низхідного з'єднання значення PDCP SN є таким, яке має бути призначене сусідній БС для передавання першого пакету АТ. Для UL обов'язково передається значення PDCP SN, що відповідає пакету даних, що повинен бути наступним прийнятим. Крім цього для UL може бути передана бітова маска, яка вказує на пакети даних, які повинні бути повторно передані, оскільки не були успішно передані (використовується у випадку порушення цілісності послідовності успішно прийнятих пакетів) [85].

В цей час АТ від'єднується від обслуговуючої БС (процедура Від'єднання) і синхронізується з сусідньою БС, обробляє сигнали первинної і вторинної синхронізації (PSS і SSS). Потім АТ виконує процедуру випадкового доступу (Random Access), яка може бути з колізіями (contention based) і без колізій (non-contention based). Для запобігання колізіям і зменшення часу виконання процедури хендоверу, БС може здійснити резервування певної RA-преамбули для АТ і повідомити про це повідомленням “RRC Connection Reconfiguration”. Якщо ж БС не робить цього, то АТ здійснює звичайну процедуру випадкового доступу, в процесі якої можливі виникнення колізій [84].

У відповідь на RA-преамбулу БС передає повідомлення RAR (Random Access Responce), в якому, якщо необхідно, коригує часове підстроювання АТ (Timing Advance). Також в цьому повідомленні передається інформація про виділений АТ ресурс для передачі L3 повідомлення – “RRC Connection Reconfiguration Complete”.

Після відправлення абонентським терміналом повідомлення “RRC Connection Reconfiguration Complete”, хендовер переходить в фазу завершення. В цей час АТ і БС можуть обмінюватись даними в обох напрямках: низхідному і висхідному. Але на ділянці між БС і шлюзом, БС може відправляти висхідний трафік, а низхідний трафік від шлюзу все ще передається на попередню БС, з подальшим перенаправленням на сусідню БС по інтерфейсу X2. Для того щоб обслуговуючий шлюз відправляв низхідний трафік одразу до сусідньої БС, необхідно оновити параметри відповідного GTP (GPRS Tunneling Protocol) тунелю шляхом відправлення повідомлення “Path Switch Request” на вузол MME (Mobility Management Entity). В цьому повідомленні вказується нова кінцева точка для GTP тунелю (TEID - Tunnel Endpoint Identity), відповідна сусідній БС. Крім того, там передається ідентифікатор зони відстеження (TAI - Tracking Area Identity) і ідентифікатор сектору, на якому зараз зареєстрований АТ (CGI - Cell Global Identity).

На основі повідомлення “Path Switch Request” вузол ММЕ вирішує чи зможе поточний обслуговуючий шлюз і надалі обслуговувати даний АТ. На Рис. 1.12 зображений випадок, коли зміна обслуговуючого шлюзу не потрібна. Якщо ж така зміна необхідна, то ММЕ посилає повідомлення “Create Session Request” до нового обслуговуючого шлюзу, після чого він взаємодіє з PDN шлюзом, щоб перенаправити низхідний потік даних відповідному GTP тунелю. В нашому випадку (без зміни обслуговуючого шлюзу), ММЕ відправляє повідомлення “Modify Bearer Request” обслуговуючому шлюзу. Отримавши це повідомлення, шлюз відправляє низхідний трафік іншій (сусідній) БС. І аж після цього АТ і обслуговуючий шлюз матимуть змогу обмінюватись даними напряму, без залучення "старої" БС.

Обслуговуючий шлюз підтверджує переключення адресата, посылаючи повідомлення “Modify Bearer Response” на ММЕ. А ММЕ, отримавши це повідомлення, відправляє “Path Switch Request Acknowledge” сусідній БС, яка в свою чергу завершує процедуру хендвера відправивши повідомлення “UE Context Release” обслуговуючій БС. Після отримання цього повідомлення обслуговуюча БС може видалити всю інформацію про АТ, цим самим звільнити зайняті нею ресурси. На цьому процедура хендвера завершується.

1.3. Висновки до розділу 1

Здійснено аналітичний огляд наукових праць за тематикою дисертаційних досліджень для встановлення умов та вимог щодо надання послуг зв'язку у мережах безпроводового доступу. Встановлено, що на процеси надання послуг зв'язку 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 комітками проводиться шляхом зменшення радіусу перевантаженої та збільшення радіусу сусідніх до неї коміток 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 комітки, так і в процесі виконання хендоверу. Наприклад, процес балансування навантаження починається з найбільш завантаженої комітки з метою досягнення рівномірного завантаження у мережі.

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

РОЗДІЛ 2. РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ І АЛГОРИТМІВ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТУПНОСТІ ПОСЛУГ В КОМІРКОВИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

2.1. Модель топологічної структури коміркової мережі мобільного зв'язку на основі графу

Розглянемо варіант ідеальної структури радіопокриття мережі мобільного зв'язку, у якій кожна комірка поділена на три сектори та має однакову величину зони дії (Рис. 2.1), в умовах плоскої території з прямою видимістю. При цьому, зони дії будь-яких трьох сусідніх комірок лише дотикаються одна до одної, а будь-яка частина території покриття знаходиться в зоні дії не більше, ніж двох комірок водночас. Таким чином досягається мінімізація площі спільних зон дії сусідніх БС зі збереженням суцільного покриття, тобто без виникнення сліпих зон між комірками. Спільні зони покриття секторів однієї комірки забезпечені внаслідок невеликого нахилу антен базових станцій [3].

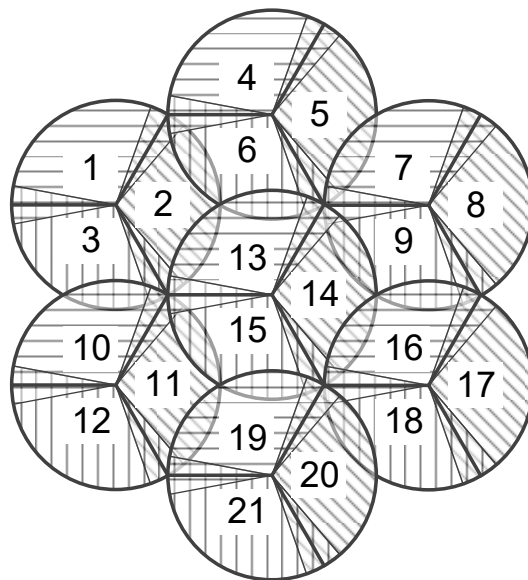


Рис. 2.1. Ідеальна структурна модель мережі з трисекторними комірками [3]

Сукупність секторів на Рис. 2.1 можна представити графом (Рис. 2.2), де кожен вузол – це сектор відповідної комірки. З'єднання вузлів позначають існування спільної зони покриття для відповідних секторів, що є базовою

умовою як для забезпечення мобільності абонентів, так для можливості балансування навантаження.

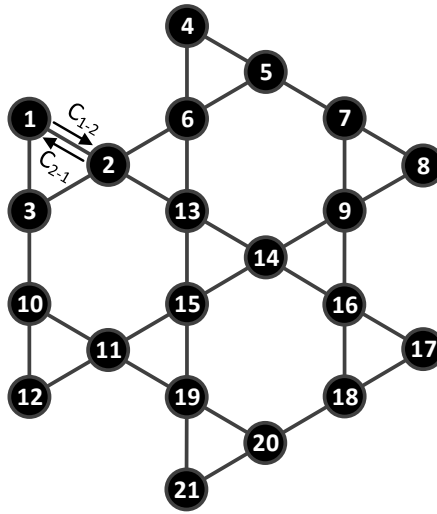


Рис. 2.2. Граф структурної моделі мережі з трисекторними комірками без урахуванням перекриття несуміжних секторів [3]

Топологію отриманого графа можна описати матрицею суміжності $\|M\|$, у якій кожен з елементів $m_{i,j}$ буде рівний 1 або 0 (1 – якщо сектори i та j мають спільну зону покриття, 0 – якщо не мають).

Вагові коефіцієнти ребер (наприклад, для ребра 1–2) означають величину пропускну здатності C_{1-2} , яку займають абоненти сектору 1, за умови, що рівень потужності сигналу Ps_2 (RSRP), який абонент отримує із сектору 2, рівний або перевищує мінімальне робоче значення $Ps_{\text{доп}}$.

Сукупність коефіцієнтів (C_{i-j}) ребер графа утворює матрицю пропусчних здатностей $\|C\|$ структурної моделі мережі мережі мобільного зв'язку. Матриця $\|C\|$ описує наявний стан мережі, з точки зору можливостей перенесення (хендоверу) величини навантаження C_{i-j} з сектору i в сектор j , при чому (i та j є секторами зі спільною частиною зони покриття).

Кожен вузол графа характеризується власним коефіцієнтом K_i , який позначає рівень завантаженості i -го сектору:

$$K_i = \frac{C_i}{C_{i_{\max}}}, \quad i = \overline{1, 2 \dots N}, \quad (2.1)$$

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

Зауважимо, що граф структурної моделі коміркової мережі, зображений на Рис. 2.2, враховує тільки перекриття суміжних секторів, наприклад, сектори 1 і 2, 2 і 6. Для більш повного опису зв'язків між компонентами радіомережі варто використовувати граф з урахуванням перекриття несуміжних секторів, наприклад, сектори 1 і 4, 1 і 6 (Рис. 2.3). Це дозволить в повній мірі використовувати доступні ресурси радіомережі системи мобільного зв'язку в процесі балансування абонентського навантаження у разі виникнення перевантажень.

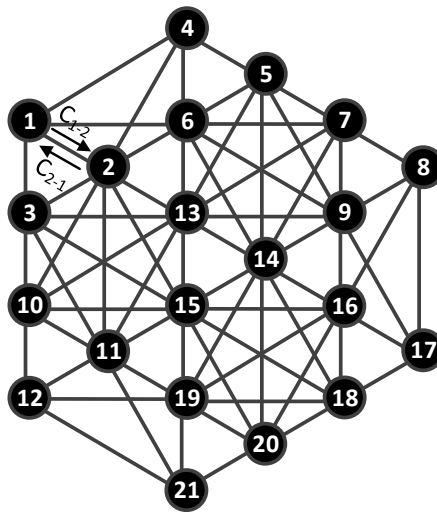


Рис. 2.3. Приклад графа структурної моделі мережі з трисекторними комірками з урахуванням перекриття несуміжних секторів [3]

Варіанти графів структурних моделей мереж з 6-секторними, 4-секторними комірками наведено на Рис. 2.4 та Рис. 2.5, відповідно.

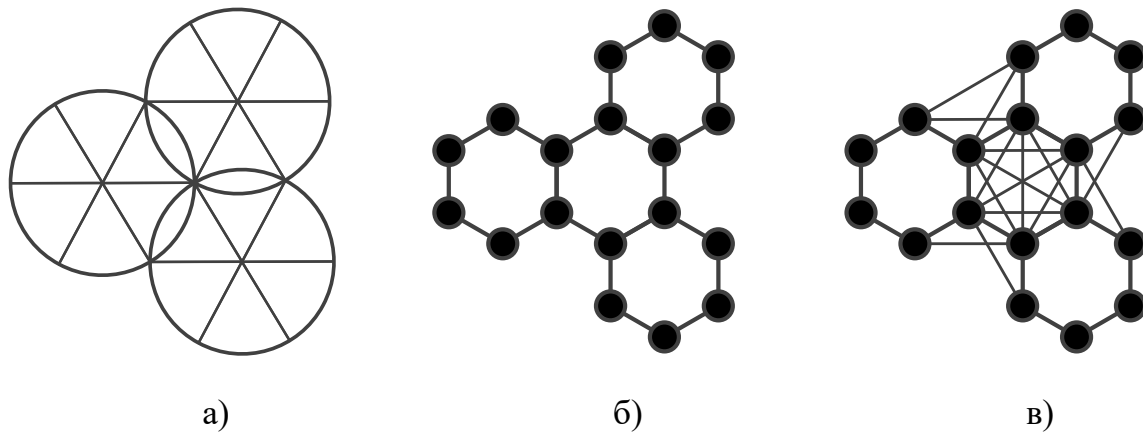


Рис. 2.4. Модель коміркової структури мережі з 6-секторними комірками: а) ідеальна; б) граф без урахуванням перекриття несуміжних секторів; в) граф з урахуванням перекриття несуміжних секторів

За умови зони дії не більше двох комірок, водночас, на будь-якій частині території покриття досягається найменша кількість ребер графа структурної моделі мережі. Внаслідок цього, графи для мереж з 3- та 6-секторними комірками мають сполучення вузлів кожен з кожним у місцях сполучення секторів сусідніх комірок, на відміну від графу для мережі із 5-секторними комірками.

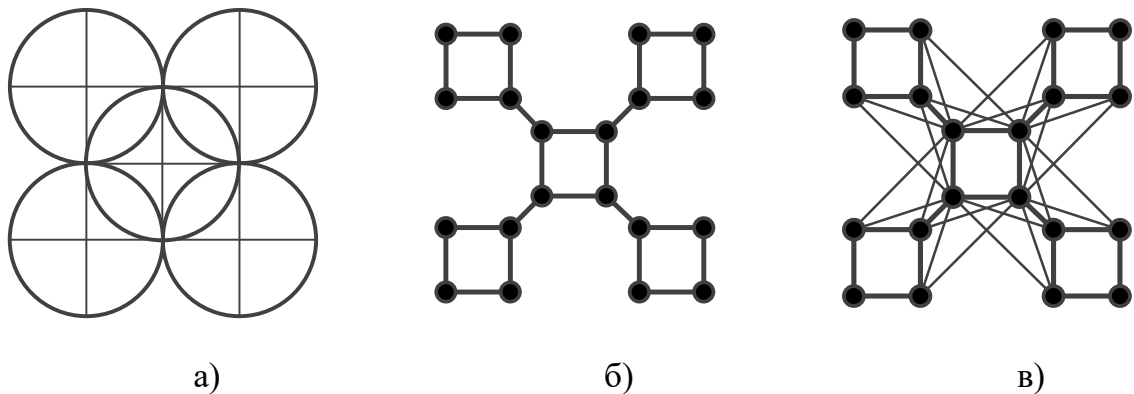


Рис. 2.5. Модель коміркової структури мережі з 4-секторними комірками: а) ідеальна; б) граф без урахуванням перекриття несуміжних секторів; в) граф з урахуванням перекриття несуміжних секторів

Для структури з моносекторними комірками характерною особливістю є існування лише одного варіанту графа структурної моделі мережі (Рис. 2.6).



Рис. 2.6. Модель коміркової структури мережі з моносекторними комірками: а) ідеальна; б) граф структурної моделі мережі без урахуванням перекриття несуміжних секторів; в) граф з урахуванням перекриття несуміжних секторів

У мережах 4G та 5G характерним для макрокомірок є використання різних частотних каналів для ближньої та дальньої зони дії БС [83]. Відповідно, на графі структурної моделі мережі мобільного зв'язку з'являться додаткові вузли (Рис. 2.7 вузли меншого розміру), які представлятимуть ближню зону кожної БС. Ці вузли з'єднані тільки з вузлами, відображають дальні зони секторів відповідних комірок (Рис. 2.7 вузли більшого розміру).

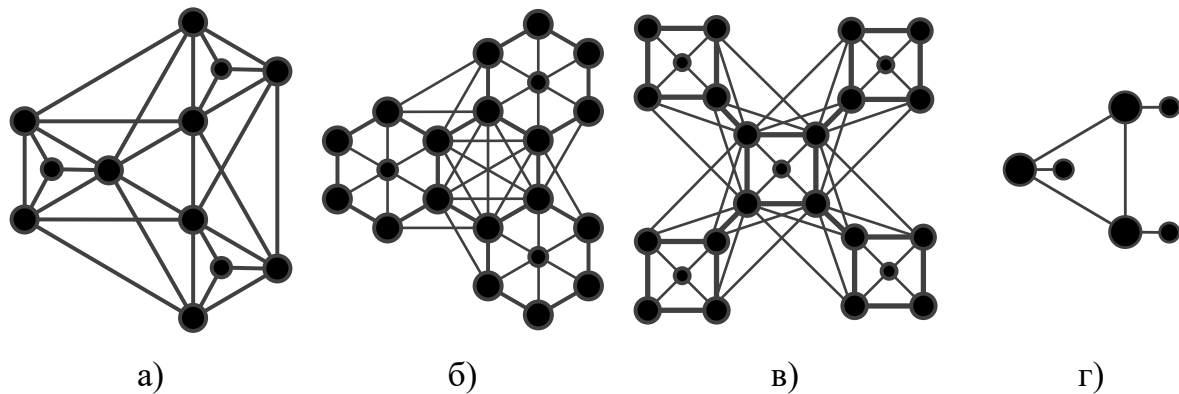


Рис. 2.7. Графи структурних моделей мережі мобільного зв'язку з конфігурацією комірок: а) 3 сектори; б) 6 секторів; в) 4 сектори; г) 1 сектор

В реальних мережах мобільного зв'язку коміркова структура не є однорідною внаслідок використання макро-, мікро-, піко- та фемто-БС, а також застосування водночас технологій різних поколінь (від 2G до 5G) [6, 17, 54, 94, 97]. Внаслідок цього граф структури мережі мобільного зв'язку буде комбінацією розглянутих вище варіантів.

2.2. Метод балансування абонентського навантаження у мережі мобільного зв'язку

Запропонований метод балансування абонентського навантаження спрямований на підвищення доступності телекомунікаційних послуг під час пікових навантажень на окремі сегменти мереж мобільного зв'язку.

Суть методу полягає у перенесенні частини абонентського навантаження із сектору з підвищеним завантаженням чи перевантаженням до сектору з меншим рівнем завантаження. Це здійснюється шляхом послідовного перенесення абонентського навантаження (вимушеного хендоверу) між суміжними секторами (чи комірками) в межах спільної зони обслуговування.

Для здійснення вимушеного хендоверу необхідним є виконання двох умов [3,12,14]:

- 1) рівень потужність сигналу, який абонент отримує від сусідньої базової станції, рівна або перевищує мінімальне робоче значення (перевага у абонентів, які отримують найвищий рівень сигналу);
- 2) переміщення абонента за середню тривалість сеансу зв'язку незначне у порівнянні з радіусом комірки (тому перевага надається абонентам з найменшою швидкістю переміщення).

Для того, щоб обмежити кількість даних, необхідних для аналізу та вибору абонентів щодо їх задіяння в процесі балансування навантаження, у п. 4.1 запропоновано класифікацію активних абонентів на 8 груп за швидкістю переміщення (чим нижча швидкість, тим вищий пріоритет для вимушеного хендоверу) та класом послуг (чим нижчий клас, тим вищий пріоритет для вимушеного хендоверу).

Запропонований метод балансування абонентського навантаження у комірковій мережі мобільного зв'язку, узагальнена структура якого наведена на Рис. 2.8, можна представити послідовністю із п'яти кроків [3].

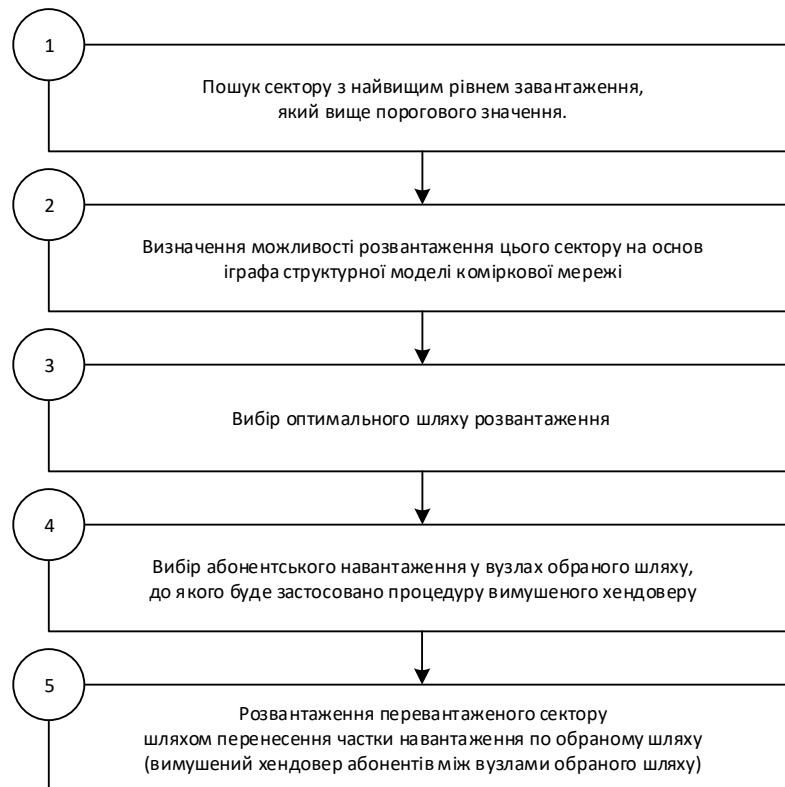


Рис. 2.8. Блок-схема методу балансування абонентського навантаження у комірковій мережі мобільного зв'язку

Крок 1. Пошук сектору i з найбільшим коефіцієнтом завантаження K_i . Якщо коефіцієнт завантаження K_i не перевищує допустиме значення $K_{\text{доп}} = 0.8$, то продовжуємо пошук, аналізуючи пропущені сектори, якщо такі є.

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

$$C_{i\text{min}} = (K_i - K_{\text{доп}}) \cdot C_{\text{max}i}, K_i > K_{\text{доп}} \quad (2.2)$$

Якщо існує вихід з вузла i , тобто

$$C_{i\text{min}} \leq C_{i-x}, \quad (2.3)$$

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 пропускна здатність шляхів не менша $C_{i\min}$, а коефіцієнт завантаження сектору j не перевищуватиме $K_{\text{доп}}$ після перенесення в нього навантаження $C_{i\min}$:

$$H = \left\{ h_{ij} \mid \left(K_j > K_{\text{доп}} - \frac{C_{\min i}}{C_{\max j}} \right) \wedge (C_{h_{ij}} \geq C_{\min i}) \wedge (i \neq j) \right\}, \quad j = \overline{1, 2, \dots, N} \quad (2.4)$$

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

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

$$R(h_{ij}) = \min(R(H)), \quad h_{ij} \in H. \quad (2.5)$$

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

Для кожного вузла n шляху h_{ij} формуємо множину A_n з абонентів a_n , які обслуговуються в секторі n , отримують сигнал з достатнім рівнем потужності $Ps_{a_{n+1}}$ для обслуговування із сектору $(n+1)$ та знаходяться у групі з найменшою швидкістю переміщення.

$$A_n = \left\{ a_n \mid (Ps_{a_{n+1}} \geq Ps_{\text{доп}}) \wedge (V_{\text{сеп } a_n} < V_{\text{сп1}}) \right\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j). \quad (2.6)$$

Якщо

$$\sum_{a_n \in A_n} C_{a_n} < C_{\min i}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (2.7)$$

то

$$A_n = A_n \cup \left\{ a_n \mid (Ps_{a_{n+1}} \geq Ps_{\text{доп}}) \wedge (V_{\text{сп1}} \leq V_{\text{сеп } a_n} < V_{\text{сп2}}) \wedge (n \neq j) \right\}. \quad (2.8)$$

Так продовжується, поки виконується умова (2.7).

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

$$AB_n = A_n, \quad (2.9)$$

якщо виконується наступна умова

$$\sum_{a_n \in A_n} C_{a_n} - C_{A_n \min} < C_{i \min}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (2.10)$$

де $C_{A_n \min}$ – мінімальна пропускна здатність, якою користується абонент множини A_n .

Якщо умова (2.10) не виконується, то з множин A_n формуємо множини абонентів B_n , керуючись класом сервісу q (початкове значення $q = 5$).

$$B_n = \{a_n \mid (a_n \in A_n) \wedge (ToS_{a_n} = q)\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j). \quad (2.11)$$

Якщо

$$\sum_{a_n \in B_n} C_{a_n} < C_{i \min}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (2.12)$$

то $q = q - 1$.

$$B_n = B_n \cup \{a_n \mid (a_n \in A_n) \wedge (ToS_{a_n} = q)\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j). \quad (2.13)$$

Так продовжується, поки виконується умова (2.12).

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

$$AB_n = B_n, \quad (2.14)$$

якщо виконується наступна умова

$$\sum_{a_n \in B_n} C_{a_n} - C_{\min B_n} < C_{\min i}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (2.15)$$

де $C_{B_n \min}$ – мінімальна пропускна здатність, якою користується абонент множини B_n .

Якщо умова (2.15) не виконується, то визначення множини AB_n відбувається за мінімальною швидкістю переміщення абонентів множин B_n .

$$AB_n = \{a_n \mid (a_n \in B_n) \wedge (V_{сер a_n} = V_{\min B_n})\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (2.16)$$

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

Якщо

$$\sum_{a_n \in AB_n} C_{a_n} < C_{\min i}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (2.17)$$

то

$$B_n = B_n \setminus AB_n, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (2.18)$$

$$AB_n = AB_n \cup \{a_n \mid (a_n \in B_n) \wedge (V_{\text{сеп} a_n} = V_{\min B_n})\}, \quad (n \in h_{ij}) \wedge (n \neq j), \quad (2.19)$$

Так продовжується доти, поки виконується умова (2.17). Якщо умова не виконується, то переходимо до кроку 5.

Крок 5. Переміщення абонентського навантаження з сектору i в сектор j , тобто вимушений хендовер абонентів по шляху h_{ij} , починаючи з передостаннього в j -ий, і закінчуючи з i -го в другий [3].

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

Для зменшення обсягів та часу обробки даних в процесі балансування навантаження, окрім запропонованих у п. 4.1 іршень, доцільно буде розділити коміркову структуру на зони аналізу можливості розвантаження сегментів мережі, які піддаються перевантаженню. В центрі кожної такої зони (Рис. 2.9) знаходяться перевантажені сегменти (заштриховані), а навколо них недовантажені (незаштриховані). Зменшення обсягів та часу обробки даних буде досягатись шляхом здійснення балансування навантаження в кожній зоні окремо, незалежно одна від одної.

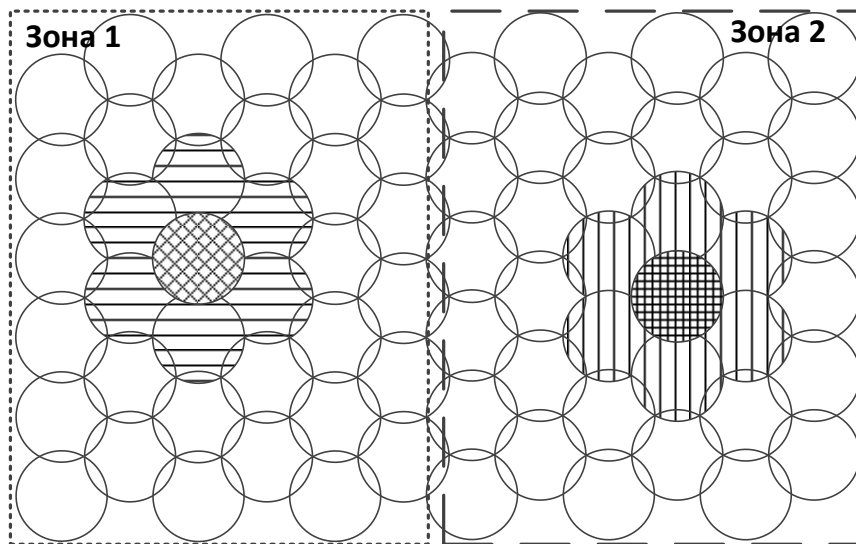


Рис. 2.9. Обмеження зони аналізу даних для пошуку шляхів розвантаження в процесі балансування навантаження

2.3. Метод порівняння ефективності використання каналів зв'язку

Активний абонентський термінал і базову станцію в процесі сеансу зв'язку можна розглядати як систему безпроводного зв'язку, а отже для кожного абонента є свій показник енергетичної та частотної ефективності використання каналу зв'язку. Як додатковий критерій для вибору частки навантаження запропоновано узагальнений показник ефективності використання каналу зв'язку – векторна відстань до межі Шеннона (D), що лежить в основі методу 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 [5, 13].

Для порівняння ефективності n систем за допомогою запропонованого показника, необхідно знайти величину D для кожної системи та визначити. Відповідно, більш оптимально використовувати канал зв'язку (з точки зору співвідношення затрачених частотних та енергетичних ресурсів) буде та

системою, у якій величина параметру D є мінімальною серед усіх проаналізованих n систем (2.20).

$$D_{\min} = \min\{D_1, D_2, \dots, D_n\}. \quad (2.20)$$

Для вираження ефективності системи знаходимо максимум інтегрального показника ефективності (2)

$$D_{\max} = \max\{D_1, D_2, \dots, D_n\}. \quad (2.21)$$

Приріст ефективності кожної з n систем визначається відносно найменш ефективної (3),

$$\Delta D_i = \left(1 - \frac{D_i}{D_{\max}}\right) \cdot 100\%, \quad (2.23)$$

де $i = 1..n$ – індекс кожної системи.

Запропонований метод дозволяє оцінити системи зв'язку за енергетичною та частотною ефективністю використання каналу і дозволяє на основі єдиного параметру, відстані до межі Шеннона, здійснювати вибір системи з більш оптимальним використанням каналу зв'язку. Нижче наведено спосіб визначення відстані до межі Шеннона.

Як відомо, межа Шеннона є теоретично встановленим аналітичним виразом, що дозволяє оцінити максимально можливе реальне співвідношення енергетичної та частотної ефективності системи зв'язку. Розглянемо випадок каналу зв'язку, у якому окрім корисного сигналу є лише білий адитивний гаусовий шум. Відповідно, співвідношення енергетичної і частотної ефективностей буде виражено наступним чином [88]:

$$\beta = \frac{\gamma}{2^\gamma - 1}, \quad (2.24)$$

де β – енергетична ефективність, γ – частотна ефективність.

Для системи зв'язку з показниками ефективності β_1 та γ_1 знаходимо координати β_1' та γ_1' точок на межі Шеннона при $\gamma = \gamma_1$ та при $\beta = \beta_1$ відповідно. За виразом 2.24 знаходимо координату β_1' при $\gamma = \gamma_1$. Приймаючи, $\beta = \beta_1$ отримаємо рівняння:

$$(2^{\gamma_1} - 1)\beta_1 - \gamma_1 = 0, \quad (2.25)$$

де γ_1 - координата точки на межі Шенона при $\beta = \beta_1$.

Точка з координатами γ_1' та β_1' - є дзеркальною проекцією даної системи зв'язку за межею Шеннона.

Провівши лінію через точки з координатами (γ_1, β_1) та (γ_1', β_1') отримаємо точку перетину (γ_2, β_2) з межею Шенона. Довжина відрізка з координатами кінців (γ_1, β_1) та (γ_2, β_2) буде визначати величину узагальненого показника ефективності системи зв'язку.

Використавши рівняння прямої, що проходить через дві точки, запишемо:

$$\frac{\gamma - \gamma_1}{\gamma_1' - \gamma_1} = \frac{\beta - \beta_1}{\beta_1' - \beta_1}. \quad (2.26)$$

Звідси,

$$\beta = \gamma \frac{\beta_1' - \beta_1}{\gamma_1' - \gamma_1} - \gamma_1 \frac{\beta_1' - \beta_1}{\gamma_1' - \gamma_1} + \beta_1. \quad (2.27)$$

Прийнявши, що

$$k = \frac{\beta_1' - \beta_1}{\gamma_1' - \gamma_1}, \quad b = \gamma_1 \frac{\beta_1' - \beta_1}{\gamma_1' - \gamma_1} + \beta_1, \quad (2.28)$$

отримаємо

$$\beta = k \cdot \gamma - b. \quad (2.29)$$

Прирівнявши (2.24) і (2.29), отримаємо наступне рівняння

$$(2^{\gamma_2} - 1)(k \cdot \gamma_2 - b) - \gamma_2 = 0, \quad (2.30)$$

Підставивши розв'язок γ_2 у (2.24) або (2.29), отримаємо β_2 .

Довжина відрізка, що сполучає точки (γ_1, β_1) та (γ_2, β_2) , визначається як геометрична відстань між двома точками (2.31).

$$D = \sqrt{(\gamma_2 - \gamma_1)^2 + (\beta_2 - \beta_1)^2}, \quad (2.31)$$

Отримане значення визначає величину узагальненого показника ефективності системи зв'язку.

На Рис. 2.10 наведено спосіб побудови інтегрального показника ефективності для двох безпроводних систем зв'язку при відомих частотній (γ) та енергетичній (β) ефективностях цих систем. Точка 1 ($\gamma_1 = 0.5$, $\beta_1 = 0.6$) відображає першу системи, а точка 6 ($\gamma_2 = 0.6$, $\beta_2 = 0.5$) – другу.

Для порівняння ефективності систем використовуємо величини D_1 та D_2 , які визначаються як модулі векторів (1,5) та (6,10) відповідно. Точки 5 та 10 знаходяться на перетині відрізків 1-4 і 6-9 з кривою межі Шенона. Точки 4 та 9 – це відображення відповідних систем безпроводного зв'язку за межею Шенона.

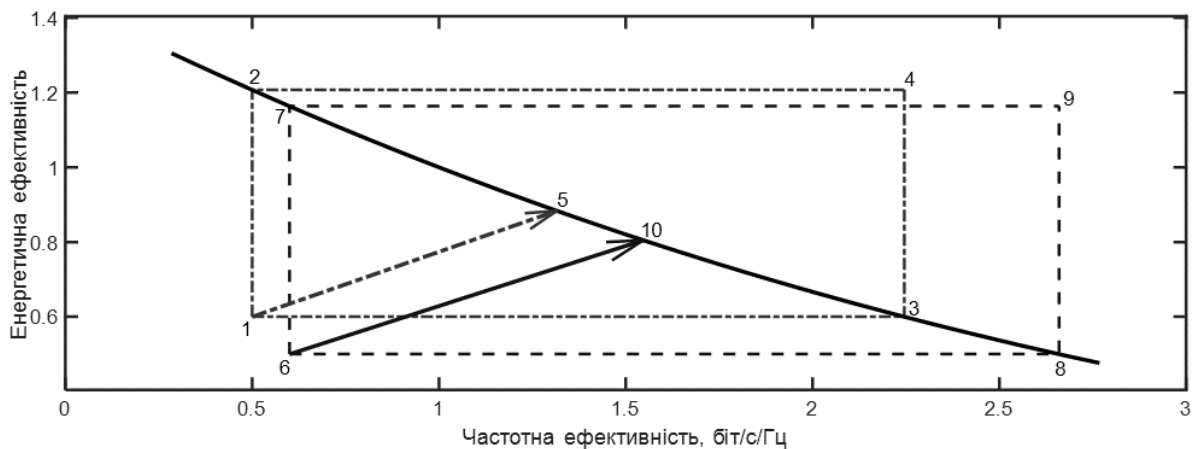


Рис. 2.10. Графічне відображення узагальненого показника ефективності використання каналу зв'язку для двох абонентських терміналів [5, 13]

Координати точки 4 визначаються з абсциси та ординати точок 3 та 2 відповідно. Аналогічно для точки 9 із 8 та 7.

Точки 2 і 3 та 7 і 8 – проекції точок 1 і 6 на криву межі Шенона.

Для розглянутого прикладу, перша система безпроводного зв'язку є ефективнішою, а приріст ефективності першої системи відносно другої становить $\Delta D = 13.2\%$, при ідентичних, на перший погляд, парах значень частотної та енергетичної ефективностей.

2.4. Прогнозування зони перебування активного абонента за допомогою лінійної апроксимації

Для пріоритетних абонентів постачальники послуг завжди намагаються надавати вищу якість обслуговування у порівнянні з іншими абонентами. З цією метою запропоновано метод прогнозування зони перебування активного абонента для уникнення неможливості надання йому телекомунікаційних послуг.

Метод полягає у застосуванні лінійної апроксимації до координат перебування за останні два або більше моментів спостереження, та визначенні вірогідної зони обслуговування. Деталі методу представлені нижче.

Для кожного сектору визначимо коефіцієнт завантаженості:

$$K_{N_{sector}} = \frac{n_{ак}}{n_{max}}, \quad N_{sector} = \overline{1,3 \cdot N_{BC}}, \quad (2.32)$$

де $n_{ак}, n_{max}$ – кількість активних та максимальна кількість абонентів у секторі N_{sector} .

Зв'язок сектору N_{sector} з сусідніми секторами:

$$Z_{N_{sector}} = a + j \cdot b, \quad (2.33)$$

де a та b – номери сусідніх секторів для N_{sector} .

Номери базових станцій з секторами a і b :

$$A = \left\lfloor \frac{\text{Re}(Z_{N_{sector}}) - 1}{3} \right\rfloor, \quad B = \left\lfloor \frac{\text{Im}(Z_{N_{sector}}) - 1}{3} \right\rfloor. \quad (2.34)$$

Умови для вимушеного хендоверу абонента з сектору N_{sector} :

- в сектор a

$$K_a < K_{N_{sector}}, \quad \text{Dist}_{A, n_{a\bar{b}}} < \text{Dist}_{don}, \quad n_{a\bar{b}} = \overline{1, n_{ак}}, \quad (2.35)$$

- в сектор b

$$K_b < K_{N_{sector}}, \quad D_{B, n_{a\bar{b}}} < D_{don}, \quad n_{a\bar{b}} = \overline{1, n_{ак}}, \quad (2.36)$$

де K_a та K_b – коефіцієнти завантаженості секторів a та b ; $D_{дон}$ – допустима відстань обслуговування БС, (м); $D_{A,n_{аб}}$ та $D_{B,n_{аб}}$ – відстані від абонента $n_{аб}$ до БС A та B , (м).

Номер сектору N_{sector} , до якого прямує абонент:

$$N_{sector} = \begin{cases} 3 \cdot B_n + 1, & -\frac{\pi}{3} < \arg Z_n \leq \frac{\pi}{3} \\ 3 \cdot B_n + 2, & \frac{\pi}{3} < \arg Z_n \leq \pi \\ 3 \cdot B_n + 3, & -\pi < \arg Z_n \leq -\frac{\pi}{3} \end{cases}, \quad (2.38)$$

де B_n – номер БС, в напрямку якої рухається абонент, визначається за мінімальним значенням відстані від прогнозованого місцезнаходження абонента до базових станцій $D_{i,n}$ на n -му інтервалі спстереження; Z_n – комплексне число, яке відображає прогнозоване положення абонента відносно БС з номером B_n через інтервал часу t_{a_n} (с).

$$Z_n = (x_{\Omega} - X_{b_n}) + j(y_{\Omega} - Y_{b_n}), \quad (2.39)$$

де X_{b_n}, Y_{b_n} – координати БС з номером B_n ; x_{Ω}, y_{Ω} – прогнозовані координати абонента.

$$x_{\Omega} = \Omega \frac{x_n - x_{n-1}}{r_n} + x_n, \quad y_{\Omega} = \Omega \frac{y_n - y_{n-1}}{r_n} + y_n, \quad (2.40)$$

де x_n, y_n та x_{n-1}, y_{n-1} – поточні та попередні координати абонента; r_n – переміщення абонента між цими координатами.

Відстань $D_{i,n}$ (м) від абонента до i -ї базової станції:

$$D_{i,n} = \sqrt{(x_{\Omega} - X_i)^2 + (y_{\Omega} - Y_i)^2}, \quad i = \overline{1, N_{BC}}, \quad (2.41)$$

де X_i, Y_i – координати i -ї БС.

Орієнтований час перебування в зону дії БС, яка обслуговує абонента, t_{a_n} (с):

$$t_{a_n} = \frac{D'_n}{V_{a\bar{b}}}, \quad (2.42)$$

де D'_n – прогнозована довжина шляху до виходу з комірки, (м).

$$D'_n = \Omega - r_n, \quad (2.43)$$

де r_n – переміщення абонента відносно попереднього місцезнаходження, (м); Ω – позитивний корінь квадратного рівняння:

$$\Omega^2 - \Omega \frac{D_{a_{n-1}}^2 + r_n - D_{a_n}^2}{r_n} - R_{ком}^2 = 0, \quad (2.44)$$

де D_{a_n} та $D_{a_{n-1}}$ – поточна та попередня відстань до БС, яка обслуговує абонента, (м).

Якщо сектор (N_{sector}), в напрямі якого рухається абонент, має або разом з новим абонентом матиме коефіцієнт завантаження більший, за деяке порогове значення, то це є причиною для застосування вимушеного хендоверу з сектору N_{sector} , якщо задовільняються умови (2.35) і/або (2.36). Якщо ж ці умови не задовільняються, то потрібно застосувати метод балансування навантаження, представлений у пункті 2.2.

2.5. Висновки до розділу 2

Запропоновано модель модль 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. Для 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.

Вирішено задачу підвищення доступності послуг зв'язку у коміркових мережах безпроводового доступу в умовах пікових навантажень. Для цього

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.

Запропоновано 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 безпроводного інтерфейсу підсистеми радіомережі і дає змогу визначити оптимальну стратегію планування системи мобільного зв'язку.

Для уникнення неможливості надання телекомунікаційних послуг пріоритетним абонентам запропоновано метод прогнозування зони перебування активного абонента на основі застосування лінійної апроксимації щодо координат перебування абонента.

РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ОБСЛУГОВУВАННЯ АБОНЕНТІВ У КОМІРКОВИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ДОСТУПУ

3.1. 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 комірки представимо у вигляді шестикутників (Рис. 3.1) [1].

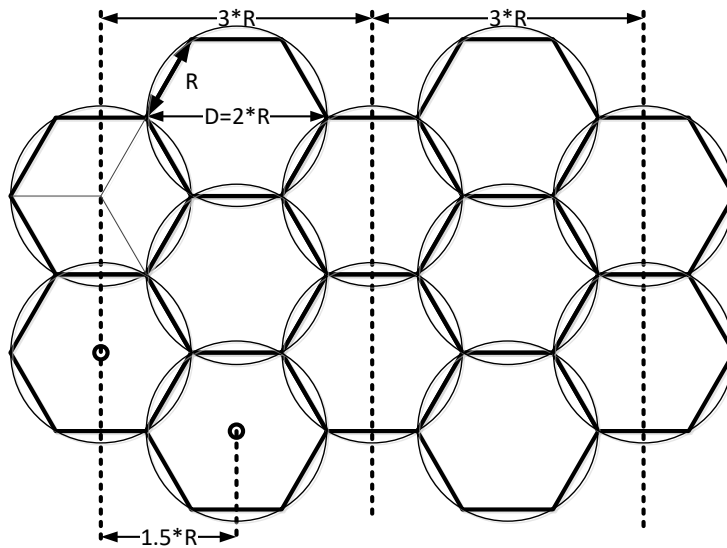


Рис. 3.1. Фрагмент структури мережі коміркового зв'язку

Як видно з Рис. 3.1, такий спосіб розміщення комірок 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:

$$n_x = \left\lfloor \frac{X}{3 \cdot R} \right\rfloor, \quad (3.1)$$

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

$$z_x = \frac{X}{3 \cdot R} - n_x, \quad (3.2)$$

де z_x – залишок періоду.

Якщо $X > R$, то кількість стовпців та координата x базових станцій першого стовпця обчислюють за співвідношеннями (3.3) та (3.4).

$$n_c = \begin{cases} 2 \cdot n_x, & z_x \leq \frac{1}{3} \\ 2 \cdot n_x + 1, & \frac{1}{3} < z_x \leq \frac{5}{6} \\ 2 \cdot n_x + 2, & z_x > \frac{5}{6} \end{cases}, \quad (3.3)$$

де n_c – загальна кількість стовпців.

$$X_1 = \begin{cases} R \cdot \left(1 + 1.5 \cdot \left(z_x - \frac{1}{6} \right) \right), & z_x \leq \frac{1}{3} \\ R \cdot 1.5 \cdot z_x, & \frac{1}{3} < z_x \leq \frac{5}{6} \\ R \cdot \left(1 + 1.5 \cdot \left(z_x - \frac{7}{6} \right) \right), & z_x > \frac{5}{6} \end{cases}, \quad (3.4)$$

де X_1 – координата x базових станцій першого стовпця.

Якщо $X \leq R$, то мають місце наступні твердження:

$$n_c = 1. \quad (3.5)$$

$$X_1 = 1.5 \cdot R \cdot z_x = \frac{X}{2}. \quad (3.6)$$

Для базових станцій кожного наступного стовпця координата x визначається за співвідношенням (3.7).

$$X_n = X_0 + 1.5 \cdot R \cdot (n-1), \quad n = \overrightarrow{2, n_c}, \quad (3.7)$$

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

На Рис. 3.2 наведено геометричні віддалі між сусідніми базовими станціями гексагональної сітки, що знаходяться на різних горизонтальних осях. Це використовується для обчислення ординат базових станцій у процесі формування коміркової структури на заданому периметрі.

Як видно з Рис. 3.2, кількість базових станцій у парних та непарних стовпцях відрізняється на 1.

$$n_y = \left\lceil \frac{Y}{R \cdot \sqrt{3}} \right\rceil, \quad (3.8)$$

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

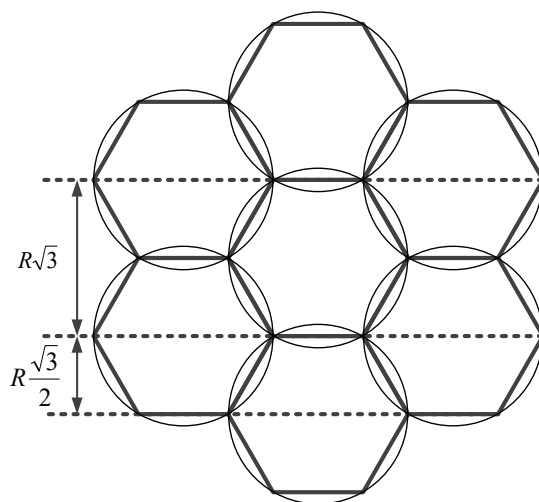


Рис. 3.2. Віддалі між сусідніми базовими станціями на різних горизонтальних осях

$$z_y = n_y - \frac{Y}{R \cdot \sqrt{3}}, \quad (3.9)$$

де z_y – залишок періоду.

Початкова координата y базових станцій у парних стовпцях:

$$Y_{1II} = R \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (1 - z_y). \quad (3.10)$$

Початкова координата y базових станцій у непарних стовпцях:

$$Y_{1H} = R \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot (2 - z_y). \quad (3.11)$$

Координата y для усіх інших базових станцій визначається:

- для парних стовпців

$$Y_{n\Pi} = R \cdot \sqrt{3} \cdot \left(n - \frac{z_y - 1}{2} \right), n = \overline{2, n_y}, \quad (3.12)$$

- для непарних стовпців

$$Y_{nH} = R \cdot \sqrt{3} \cdot \left(n - \frac{z_y}{2} \right), n = \overline{2, (n_y - 1)}, \quad (3.13)$$

де $Y_{n\Pi}, Y_{nH}$ – координати y n -х базових станцій парного ($n\Pi$) та непарного (nH) стовпців, відповідно.

Загальна кількість базових станцій становить:

$$N_{BC} = n_x \cdot n_y - \left\lfloor \frac{n_x}{2} \right\rfloor. \quad (3.14)$$

На Рис. 3.3 представлено 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 – 130 м, що відповідає умовам щільної багатоповерхової міської забудови.

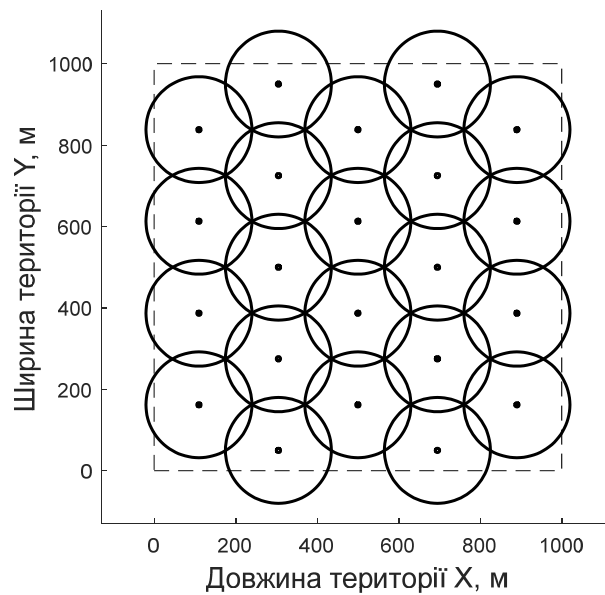


Рис. 3.3. Приклад коміркової структури мережі заданого периметру

Варто відзначити, що на Рис. 3.3 наявні непокриті фрагменти території на границях периметру, що є особливістю запропонованої методики. Вважаємо, що ця територія забезпечена радіопокриттям із сусідніх периметрів.

На основі запропонованого методу автоматизованого формування коміркової структури мережі мобільного зв'язку отримано суцільне гексагональне покриття заданої території з максимальним віддаленням сусідніх базових станцій відносно заданого радіусу 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.

3.2. Моделювання переміщення абонентів

Моделювання руху абонента здійснюється шляхом задання величини переміщення r (м) та кута переміщення ϕ (радіан). Переміщення залежить від швидкості абонента $V_{a\phi}$ (м/с), яка визначається наступним чином [1]:

$$V_{a\phi} = V_{\max} \cdot k, \quad (3.15)$$

де V_{\max} – максимально можлива швидкість переміщення абонента (по замовчуванню $V_{\max} = 120 \text{ км/год}$); k – безрозмірний коефіцієнт, який визначається як добуток K випадкових чисел, згенерованих за допомогою рівномірного закону розподілу на проміжку від 0 до 1.

Середнє значення отриманих швидкостей (Рис. 3.4) прямуватиме значення (3.16)

$$V_{\text{аб_сер}} = \frac{V_{\max}}{2^K}. \quad (3.16)$$

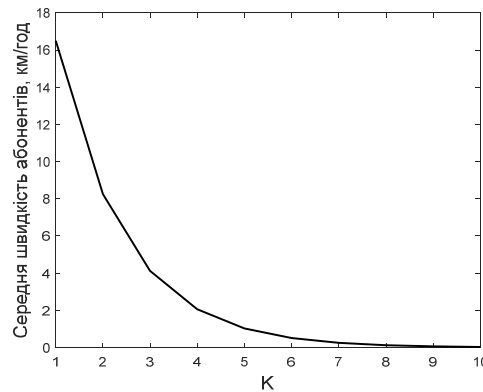


Рис. 3.4. Залежність середнього значення швидкостей переміщення абонентів від параметру K

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

$$\phi = \alpha + \beta \cdot (0.5 - b), \quad (3.17)$$

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

$$\alpha = \pi \cdot (1 - 2 \cdot d), \quad (3.18)$$

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

$$\beta = 2 \cdot \pi \cdot g \cdot \phi_V, \quad (3.19)$$

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

$$\phi_V = \left(1 - \frac{V_{ab}}{V_{\max}}\right)^m, \quad (3.20)$$

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

Переміщення r визначається як:

$$r = \Delta t \cdot V_{ab} \cdot ((1-p) + 2 \cdot p \cdot a), \quad (3.21)$$

де Δt – інтервал часу, закладений у один крок моделювання (с); p – коефіцієнт, що виражає максимальну варіацію швидкості абонента протягом часу Δt (по замовчуванню $p=0,1$, 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 задаються випадковим чином за допомогою рівномірного закону розподілу в межах території покриття.

Наступні координати абонента визначаються на кожному кроці моделювання із значень r та ϕ :

$$X_n = X_{n-1} + r \cdot \cos(\phi). \quad (3.23)$$

$$Y_n = Y_{n-1} + r \cdot \sin(\phi). \quad (3.24)$$

Величини V_{ab} , V_{\max} , k , α , β та ϕ_V визначаються один раз на початку моделювання окремо для кожного абонента, а величини r , ϕ , X_n та Y_n визначаються на кожному кроці моделювання окремо для кожного абонента.

На Рис. 3.5 представлено приклади розподілу швидкостей переміщення (V_{ab} , км/год) абонентів, яких розділено на 8 груп (див. табл. 4.1). Приклади г), г)

і д) найкраще 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. 3.5, г). В інший час, окрім нічного, розподіл абонентів відповідає ситуації на Рис. 3.5, д. У темний період доби спостерігається зменшення динаміки переміщення абонентів (Рис. 3.5, г).

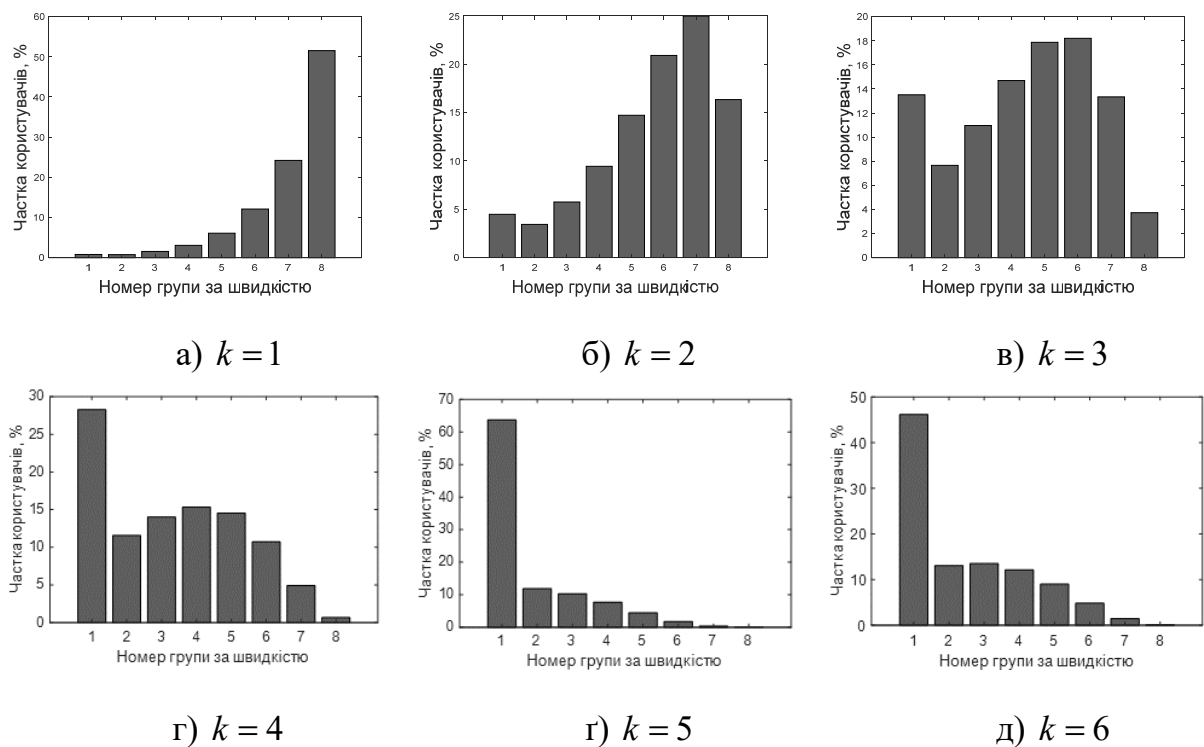


Рис. 3.5. Варіанти розподілу абонентів на групи за швидкістю переміщення для різних значень k

Слід зазначити, що в процесі моделювання руху абонентів не здійснювалась прив'язка до конкретної місцевості. Приклади варіантів траєкторії руху абонентів подано на Рис. 3.6. Незважаючи, що у абонентів з більшою швидкістю спостерігається довша траєкторія переміщення протягом інтервалу моделювання.

На основі моделювання переміщення абонентів отримано набір координат місцезнаходження кожного абонента у кожен момент моделювання,

здійснено розподіл абонентів на групи за швидкостями, що є необхідним 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.

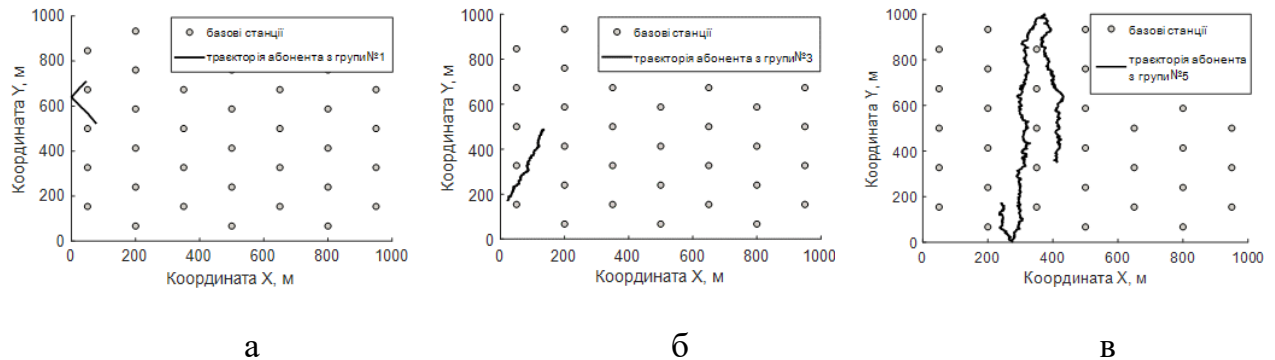


Рис. 3.6. Приклади траєкторії переміщення абонентів на заданому периметрі в процесі моделювання: а) для абонента групи 1; б) для абонента групи 3; в) для абонента групи 5

3.3. Моделювання активності абонентських терміналів

Моделювання активності абонентських терміналів базується на імітаційному статистичному моделюванні процесу надходження та обслуговування запитів на комунікаційні сеанси [1]. 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*-ого сеансу становлять:

$$\begin{aligned} Start_i &= End_{n-1} + Interval_n, & n \in [2; N], \\ End_i &= Start_n + Length_n, & n \in [1; N] \end{aligned} \quad (3.25)$$

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 -ий момент інтервалу моделювання:

$$Start_{nk}^k \equiv i \Rightarrow Arrival_density_i = Arrival_density_i + 1, \quad (3.26)$$

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

Кількість завершених сеансів в i -ий момент інтервалу моделювання визначено як кількість сеансів, моменти завершення яких є рівними i :

$$End_{nk}^k \equiv i \Rightarrow \begin{cases} End_density_i = End_density_i + 1 \\ nk = nk + 1 \\ Load_i = Load_i - 1 \end{cases}, \quad (3.27)$$

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

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

$$Start_{nk}^k \equiv i \Rightarrow \begin{cases} Load_i < Max_Load \Rightarrow \begin{cases} Start_density_i = Start_density_i + 1 \\ Load_i = Load_i + 1 \end{cases} \\ Load_i \equiv Max_Load \Rightarrow \begin{cases} End_{nk}^k = i - 1 \\ nk = nk + 1 \\ Loss_i = Loss_i + 1 \end{cases} \end{cases} \quad (3.28)$$

На початку моделювання, тобто для кроку моделювання $i=1$, початкове значення параметру $Load_i$ приймається рівними 0, а $nk=1$. Для кожного наступного кроку i початкове значення параметру $Load_i$ приймається рівним обчисленому на попередньому кроці значенню $Load_{i-1}$.

Вхідні параметрами моделювання мережної активності абонентів такі:

- середнє значення інтервалу між сеансами, $\lambda = 200$ 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 в системі $Max_Load = 40$;
- тривалість інтервалу моделювання $Time_life = 10000$ с;
- загальна кількість користувачів $N_user = 1000$.

Результати моделювання активності абонентів представлено на Рис. 3.7 та Рис. 3.8.

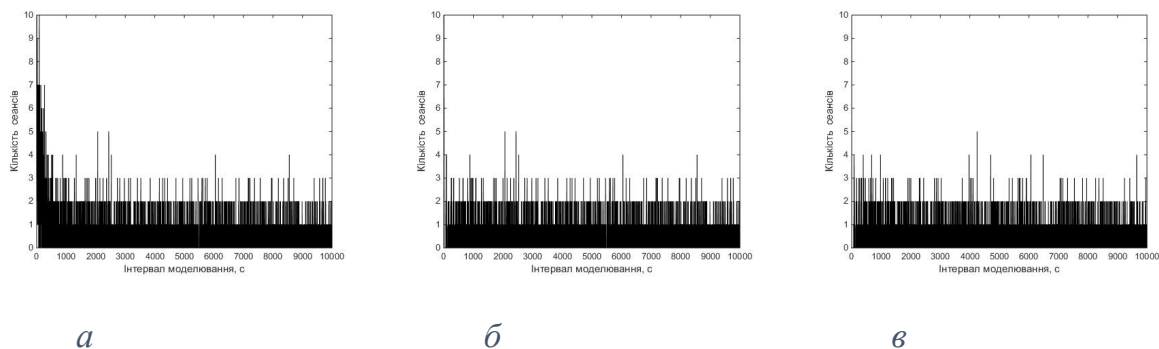


Рис. 3.7. Інтенсивність надходження запитів на встановлення комунікаційних сеансів (а), початку (б) та завершення (в) їх обслуговування

Інтенсивність надходження, початку обслуговування та завершення комунікаційних сеансів наведено на Рис. 3.7, а, б та в, відповідно. Порівнюючи їх значення в певний момент моделювання, визначається кількість активних та втрачених комунікаційних сеансів (Рис. 3.8, а).

На Рис. 3.8, б представлено загальні показники функціонування мережі коміркового зв'язку за комунікаційними сеансами у кожен момент інтервалу моделювання.

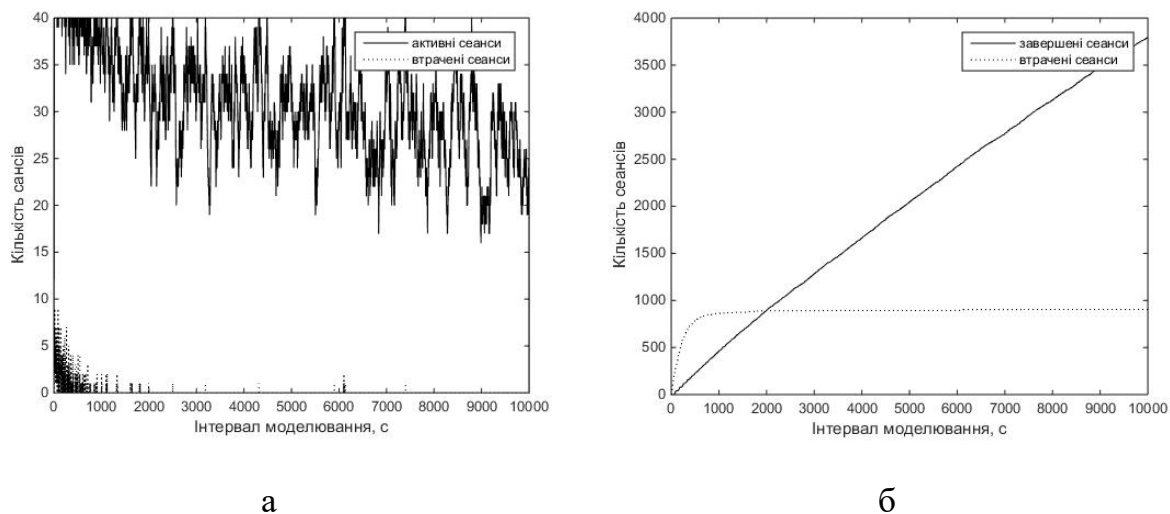


Рис. 3.8. Результати моделювання мережної активності абонентів: а) миттєвої; б) сумарної

У результаті моделювання активності абонентських терміналів на основі даних про початок та завершення комунікаційних сеансів отримано інтенсивності надходження запитів на їх встановлення, а також – початку та завершення їх обслуговування (рис. 3.6). На отриманих характеристиках миттєвих значень завантаження та втрат у системі (Рис. 3.8, а) чітко виражені локальні перевантаження, на подолання яких і спрямовано методи балансування абонентського навантаження, зокрема [3]. На основі сумарних та миттєвих значень завантаження та втрат системи є можливість визначити імовірність втрат сеансів, а також доступність системи, що є важливим для прогнозування її стану.

3.4. Моделювання процесу обслуговування викликів у системі мобільного зв'язку.

Для моделювання функціонування системи мобільного зв'язку було припущено, що 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. І, навпаки, сеанс втрачено, коли він не може розпочатися або закінчився достроково.

Коміркова структура однорідна з трьома секторами (як на Рис. 2.1). Область зони надання послуг має прямокутну форму. Користувачі не залишають задану область у процесі переміщення протягом часу моделювання. Сектор вважається перевантаженим, коли рівень його завантаження перевищує задане порогове значення.

Вхідні параметри для моделювання:

- 3000 користувачів;
- 110 с – середній інтервал між сеансами зв'язку;
- 60 с – середня тривалість сеансу;
- 50 сеансів – максимальна кількість для одного терміналу;
- 24 сеанси – максимально можлива кількість активних сеансів для кожного сектора;
- 1 км – ширина і довжина території;
- 120 км/год – максимальна швидкість руху користувачів;
- 90% – поріг навантаження сектора;
- 2000 секунд – інтервал часу моделювання.

Перед початком моделювання функціонування системи на основі вхідних імітаційна модель генерує:

- індивідуальні траєкторії для кожного користувача;
- заплановану мережеву активність для кожного користувача;
- структуру RAN;

Вхідні дані для двох режимів моделювання:

- звичайний режим, який використовує лише базове навантаження, тобто лише сусіди беруть участь у процесі балансування;

- режим з використанням запропонованого алгоритму балансування навантаження з багатоступеневим вимушеним хендовером.

Суть запропонованого алгоритму балансування навантаження полягає в ітераційному перенесенні частини абонентського навантаження з сектору із завантаженням вище порогового рівня до сектору з меншим рівнем завантаження менше порогового. Це здійснюється шляхом багатоступеневого вимушеного хендоверу, тобто послідовного перенесення частини абонентського навантаження між суміжними секторами в межах спільної зони покриття. Для здійснення вимушеного хендоверу необхідним є виконання двох умов:

- рівень потужності сигналу, що абонент отримує від сусідньої базової станції, рівний або перевищує прийнятне робоче значення;

- переміщення абонента протягом тривалості сеансу зв'язку є незначним у порівнянні з радіусом комірки [14].

У процесі балансування навантаження було враховано розподіл абонентів на групи за швидкістю переміщення (Таблиця 4.1). Оскільки чим нижча швидкість, тим вищий пріоритет для вимушеного хендоверу, то пошук відповідного абонента відбувався, починаючи з групи 1.

На Рис. 3.9 показано кількість активних сеансів у системі протягом двох етапів моделювання: з базовим балансуванням навантаження та з використанням запропонованого методу балансування навантаження.

Оскільки на початку процесу моделювання в системі відсутні активні сеанси, то в діапазоні від 0 с до 100 с їх кількість стрімко зростає. Відповідно, результати на цьому інтервалі є практично ідентичними для обох етапів симуляції, як показано на рис. Рис. 3.9-Рис. 3.11.

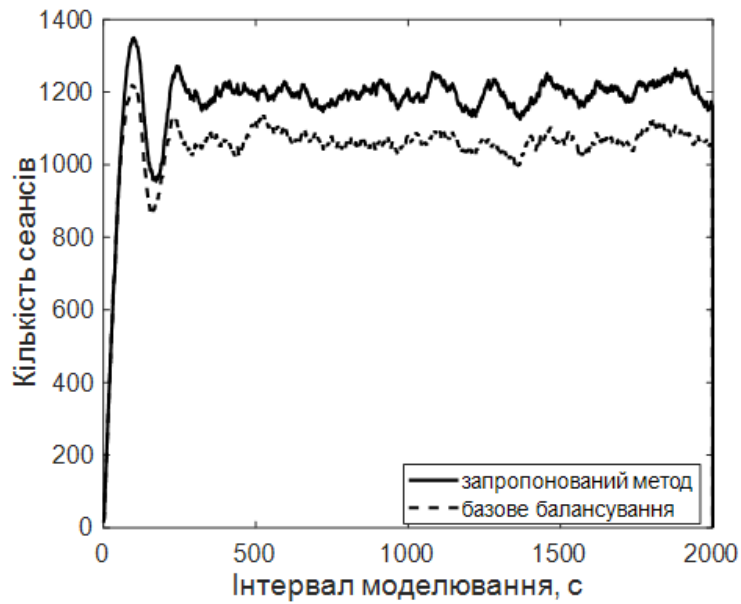


Рис. 3.9. Кількість активних сеансів в системі з базовим балансуванням навантаження та з використання запропонованого методу

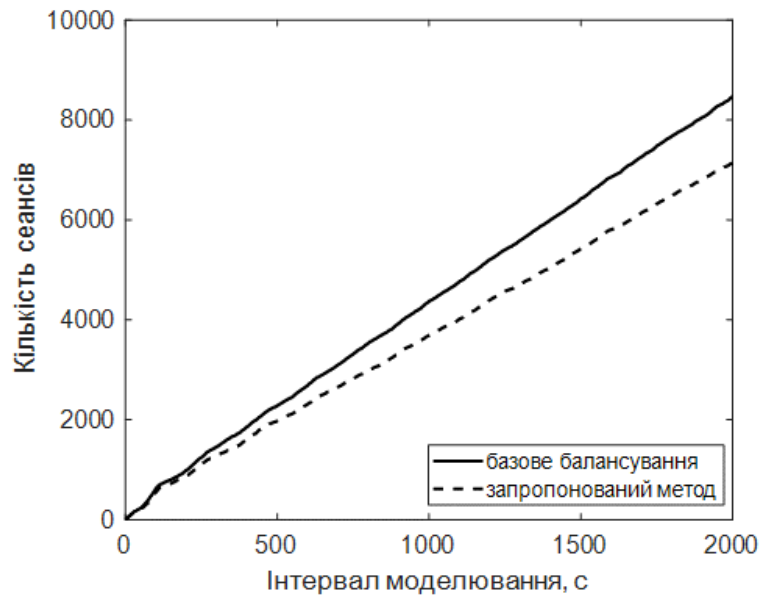


Рис. 3.10. Кількість втрат сеансів для етапу з базовим балансуванням навантаження та з використання запропонованого методу

Далі, починаючи з 200 с, система входить до режиму насичення, і помітно різницю у кількості активних сеансів (Рис. 3.9) та кількості втрат сеансів (Рис. 3.10) для обох режимів роботи. Використання запропонованого методу

балансування навантаження дозволяє зменшити кількість втрачених сеансів зв'язку до 15% в умовах пікових навантажень.

Вивільнення ресурсів у перевантажених секторах за допомогою цього методу супроводжується збільшенням кількості хендверів (Рис. 3.11). В результаті збільшується об'єм службових даних, що може дещо знизити продуктивність мережі.

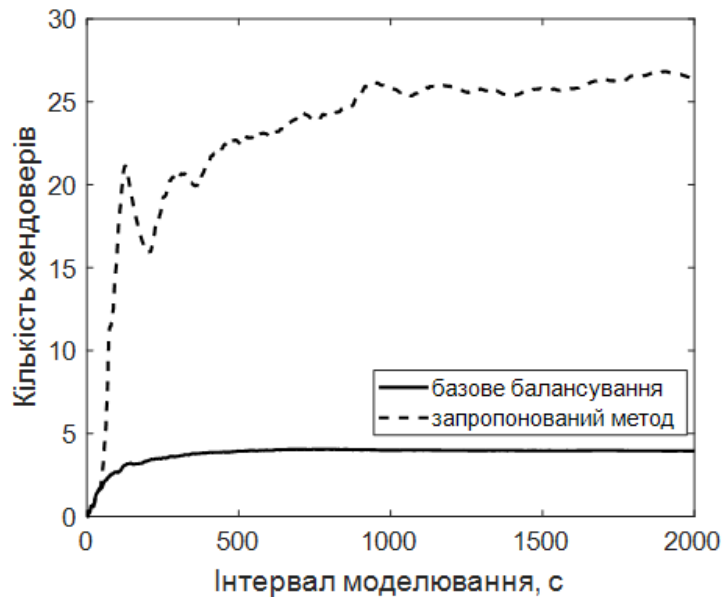


Рис. 3.11. Середня кількість хендверів для двох режимів моделювання

На Рис. 3.12 показано залежності середньої кількості вивільнення навантаження та середньої кількості хендверів, які використовуються лише для балансування навантаження. Якщо тривалість пікового завантаження системи займатиме тривалий час, ці середні кількості досягнуть максимуму і перестануть зростати.

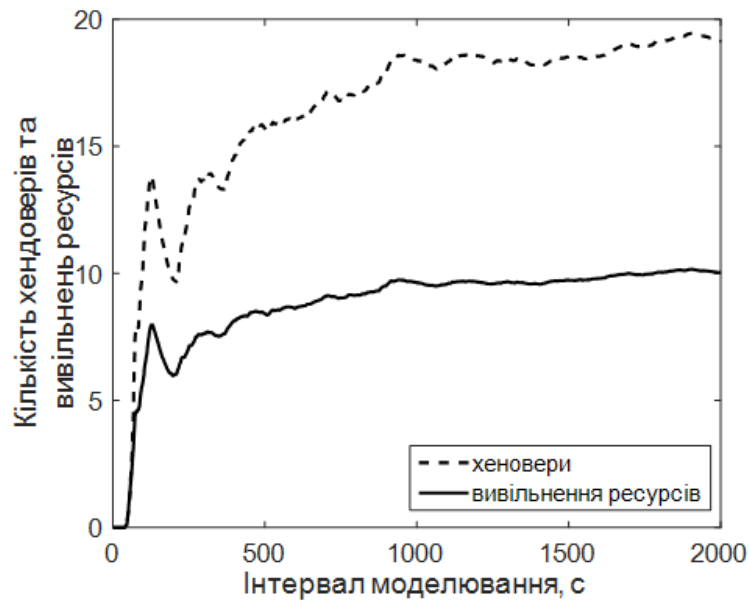


Рис. 3.12. Середні миттєві кількості перенесень навантаження та кількості хендверів, які використовуються для балансування навантаження

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. 3.13 наведено приклад такого графа коміркової структури мережі, який відображає один з миттєвих станів мережі в процесі моделювання. Цей напрямлений граф коміркової структури відображає стан зв'язків сусідніх сегментів згенерованої радіомережі моделювання і є ключовим елементом для пошуку шляхів перенесення абонентського навантаження в моменти пікових навантажень [9].

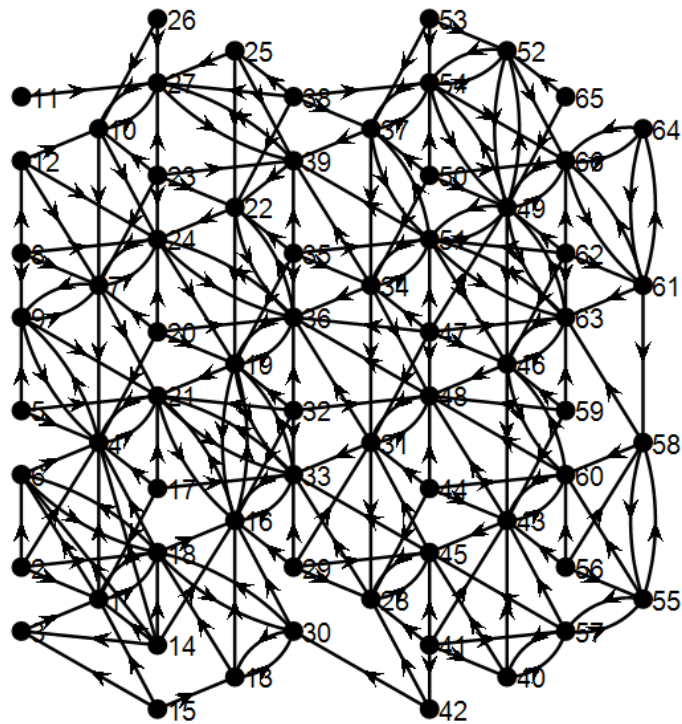


Рис. 3.13. Граф зв'язків вузлів коміркової мережі.

3.5. Висновки до розділу 3

Розроблено імітаційну модель обслуговування викликів у комірковій мережі безпроводового доступу, яка використовує запропонований метод балансування абонентського навантаження, метод оцінки 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 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 та підвищити адекватність моделювання функціонування коміркової мережі безпроводового зв'язку.

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

РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ СТРУКТУРИ КОМІРКОВИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯМ МАКСИМАЛЬНОЇ ДОСТУПНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ ПОСЛУГ

4.1. Система моніторингу стану активних термінальних пристроїв

Для того, щоб обмежити розмірність задачі примусового хендоверу, потрібно запропоновано провести класифікацію активних абонентів за швидкістю переміщення (чим нижча швидкість, тим вищий пріоритет для примусового хендоверу).

Відповідно, запропоновано поділ абонентів на групи за швидкістю переміщення (Таблиця 4.1) [13]:

Таблиця 4.1. 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	$V_{аб} < 1$	$1 < V_{аб} \leq 2$	$2 < V_{аб} \leq 4$	$4 < V_{аб} \leq 8$	$8 < V_{аб} \leq 15$	$15 < V_{аб} \leq 30$	$30 < V_{аб} \leq 60$	$V_{аб} > 60$

Швидкість переміщення абонента визначається за формулою (4.1):

$$V_{аб} = \frac{\sqrt{(x_n - x_{n-1})^2 + (y_n - y_{n-1})^2}}{\Delta t}, \quad (4.1)$$

де $(x_n - x_{n-1}), (y_n - y_{n-1})$ – зміна абсолютного значення прямокутних координат абонента за період Δt , що є інтервалом визначення стану термінального пристрою абонента і обчислюється за співвідношенням (4.2):

$$\Delta t = \frac{R_{ком}}{V_{сп} \cdot k}, \quad (4.2)$$

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 $R_{ком}$. Чим більше значення k , тим вища завантаженість системи моніторингу в цілому, оскільки частіше потрібно визначати координати абонента та параметри його термінального пристрою.

Визначення координат абонентів здійснюється одночасно для в межах однієї групи і окремо для кожної з груп.

Також активних абонентів необхідно розділити на групи стосовно класу сервісу, наприклад:

- трафік реального часу;
- передавання даних, дуже інтерактивний трафік (сигнальна інформація);
- передавання даних, інтерактивний трафік;
- трафік з низькими втратами (дрібні пересилання, великий трафік, відео потоки);
- традиційні додатки IP мереж.

Координати та параметри абонентських пристроїв зберігаються в системі моніторингу у вигляді динамічного масиву даних, у рядках якого записано такі величини:

- 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.

Цей масив система ініціалізує тільки для активних абонентів в момент початку сеансу зв'язку і видаляє після його завершення. Кількість стовпців масиву збільшується на одиницю кожні Δt секунд.

4.2. Метод адаптивного розподілення потужності в мобільній мережі при варіації абонентського навантаження

У зв'язку із розвитком нових користувацьких сервісів та зростанням вимог до радіоінтерфейсу, виникає задача підвищення ефективності функціонування безпроводної системи. Одним з найважливіших аспектів, який відіграє важливу роль в ефективності функціонування радіоінтерфейсу є оптимальний розподіл потужності.

Проблема управління потужністю виникла внаслідок необхідності боротьби з міжканальними завадами які спричиняють абоненти в межах однієї смуги частот. В системах із кодовим розділенням, у порівнянні з системами які використовують частотне розділення каналів, виникає проблема суттєвої різниці в рівнях потужності ближніх мобільних станцій та мобільних станцій які знаходяться на краю комірки. У випадку відсутності алгоритмів управління потужністю базової та мобільної станції обслуговування абонентів які перебувають на межі комірки неможливе [101, 104].

В останні роки запропоновано багато підходів до керування потужністю в радіоканалах мобільних мереж. Всі вони в тій чи іншій мірі спрямовані на вирішення проблеми виникнення шумів між користувачами. В ряді робіт [63, 65, 69, 109-111] запропоновано ефективні рішення для оптимізації управління потужністю у висхідному каналі які базуються на теорії ігор. Для керування потужністю в низхідному каналі було запропоновано рішення [70, 72, 111] яке дозволяє знизити рівень міжканальної інтерференції. Однак дані методи не є адаптивними, і тому не функціонують оптимально при варіації навантаження в мережі.

В цій дисертаційній роботі пропонується рішення для оптимізації політик управління потужністю в радіоінтерфейсі мобільної мережі з кодовим розділенням каналів, яке дозволить зменшити рівень інтерференції, а також покращити просторову локалізацію корисної потужності сигналу у комірці. Розглянуто принципи розподілу сумарної потужності базової станції шляхом розділення зон обслуговування між різними променями діаграми

напрявленості. Запропоновано метод оптимізації розподілу потужності між абонентами які обслуговуються одним променем діаграми спрямованості, а також сумарного розподілу потужності базової станції за критерієм максимізації рівня потужності, який припадає на 1 Ерл абонентського навантаження.

Оптимізація розподілу потужності між абонентами в межах однієї комірки. Визначення оптимальної потужності для всіх користувачів безпроводної системи є багатокритеріальною оптимізаційною задачею, яка вимагає громіздких обчислень. З метою спрощення обчислень, використаємо ітераційний алгоритм управління розподілом потужності в системах з багатопробним діаграмоутворенням [4].

Розглянемо сумарну пропускну здатність комірки, яка поділяється на три сектори:

$$C_{sum} = C_1 + C_2 + C_3, \quad (4.3)$$

де C_{Ai} – сумарна пропускну здатність одного сектора:

$$C = \Delta F \cdot \log_2 \left(1 + \sum_k h_k \right), \quad (4.4)$$

де ΔF – ширина смуги, h_k – співвідношення «сигнал/шум» для k -го користувача. Співвідношення «сигнал/шум» для користувача визначається наступним чином:

$$h = \frac{E_c}{N_0 + I}, \quad (4.5)$$

де E_c – енергія одного чіпа псевдовипадкової послідовності, N_0 – спектральна густина потужності теплового шуму, I – інтерференція яка виникає внаслідок впливу інших абонентів.

Дане співвідношення визначає відношення кількості помилково переданих бітів до їх загальної кількості. Запишемо енергію, яка припадає на один чіп, через потужність:

$$E_c = \frac{P_s}{R}, \quad (4.6)$$

де P_s – потужність сигналу, R – чіпова швидкість.

Формула (4.4) є формулою Шеннона вираженою через співвідношення «сигнал/шум» для окремих користувачів [112]. C_k залежить від розподілу потужності в секторі, рівня теплового шуму, а також інтерференції від інших користувачів, які можуть змінюються в залежності від стану каналу. Якщо спектр сигналу рівномірно розподілений у смузі ΔF , тоді співвідношення «сигнал/шум» для окремого абонента записується наступним чином:

$$h_k = \frac{P_s \cdot \Delta F}{R \cdot \left(\Delta F \cdot \eta_r + \sum_{i=0}^{N-1} P_i \right)}, \quad i \neq k, \quad (4.7)$$

де η_r – рівень теплового шуму приймача, $\sum P_i$ – рівень інтерференції від інших $N-1$ користувачів. Формула (4.9) дозволяє виразити потужність одного абонента через співвідношення кількості помилково переданих бітів до їхньої загальної кількості. Таким чином в політиці управління потужністю абонента будемо використовувати метрику BER (Bit Error Rate). Сумарна політика управління потужністю в межах однієї комірки полягає в оптимальному розподілі радіоресурсів між секторами, пропорційно до кількості абонентів. При цьому кількість секторів може вибиратися довільним чином в залежності від щільності навантаження в комірці. Для спрощення алгоритму визначення оптимальної потужності абонента представимо його координати в полярній системі координат:

$$\begin{aligned} x &= r \cdot \cos \varphi \\ y &= r \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (4.8)$$

Таким чином ми спрощуємо розрахунок потужності абонента по одному сектору, за рахунок обмеження області визначення його координати φ одним сектором.

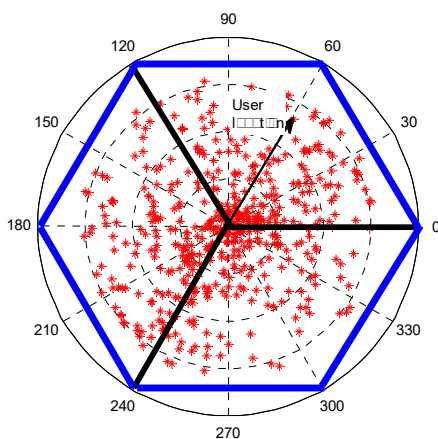


Рис. 4.1. Розподіл абонентів в полярній системі координат та визначення оптимальної потужності для їх обслуговування [4]

Потужність абонента визначається пропорційно до його віддалі від базової станції:

$$P_s = \frac{P_{\max} \sqrt{x^2 + y^2}}{r_{\max}} . \quad (4.9)$$

На Рис. 4.1 представлено розподіл абонентів для типової трьох секторної міської комірки. Вектор показує відстань абонента від базової станції. Для даної випадкової комірки, за формулою (4.9) були розраховані рівні потужності для кожного абонента, та середнє значення потужності в комірці (Рис. 4.2).

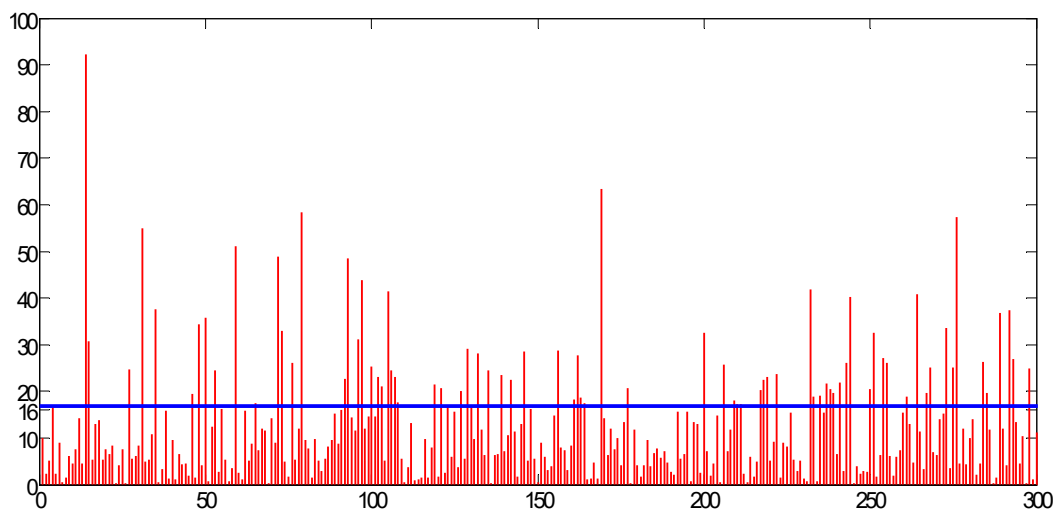


Рис. 4.2. Рівні потужності абонентів у відсотковому відношенні від максимального [4]

На основі даного методу управління потужності в комірці забезпечується оптимальне співвідношення “сигнал/шум”, достатнє для забезпечення вимог до пропускнуї здатності та параметрів якості обслуговування. Запропонований метод дозволяє оптимізувати управління потужністю в комірках мобільної мережі для окремих абонентів, незалежно для різних секторів.

Модель просторово-часової локалізації абонентського навантаження в межах однієї зони обслуговування. Будь-яке управління потужністю в мережі мобільного зв'язку є багатокритеріальною оптимізаційною задачею. Слід зазначити, що дуже важко розробити єдиний алгоритм управління потужністю для мережі в цілому. Для ефективного вирішення даної задачі ми враховуємо не лише вимірювання відстані до мобільної станції на основі метрики BER, але і такий важливий параметр як просторово-часова локалізація абонентського навантаження. Для забезпечення ефективного функціонування механізму управління потужністю в мережі ми пропонуємо модель просторово-часової локалізації абонентського навантаження в комірці (Рис. 4.3. Просторово-часова локалізація абонентського навантаження зони обслуговування протягом однієї доби).

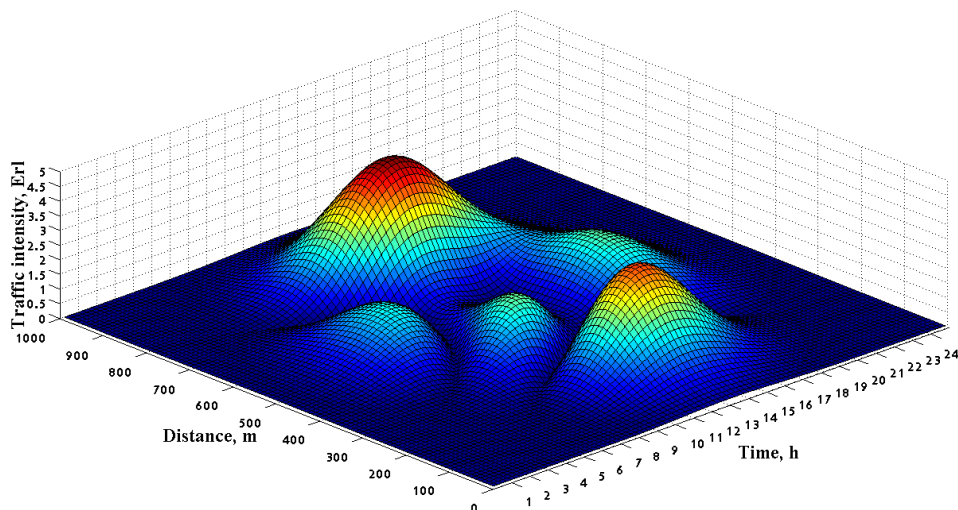


Рис. 4.3. Просторово-часова локалізація абонентського навантаження зони обслуговування протягом однієї доби [4]

Дана модель дозволяє відобразити просторово-часову локалізацію абонентського навантаження комірки протягом доби, і запам'ятовувати статистичні параметри навантаження для комірки.

Врахування даного аспекту є важливим з точки зору оптимізації формування діаграми спрямованості антени базової станції [4, 113] з метою забезпечення більшого запасу потужності у місцях з високим абонентським навантаженням. Таким чином для кожної комірки в мережі формується власна політика управління потужністю, яка дозволить суттєво оптимізувати розподіл ресурсів мережі.

Для оптимального розподілу потужності в межах одного сектора, доцільно застосувати технологію МІМО з використанням механізмів цифрового діаграмоутворення. Технологія МІМО полягає у використанні кількох антен на передавальній та приймальній стороні. Структура типової антенної решітки МІМО, представлена на Рис. 4.4.

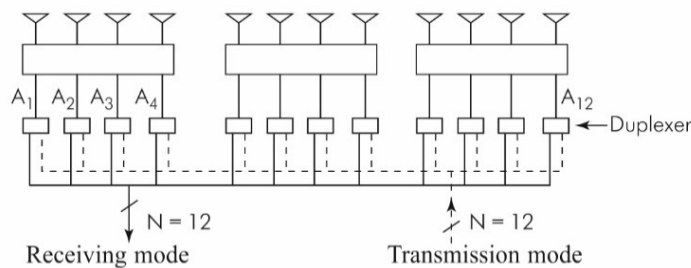


Рис. 4.4. Структура 12-елементної приймально/передавальної антенної решітки

Процес діаграмоутворення зводиться до виконання операції ШПФ над відліками комплексних вихідних напруг приймальних каналів, отриманих в один момент часу. При цьому формується набір просторових характеристик $F_r(\theta)$ [114]:

$$F_r(\theta) = \tan\left(\frac{dR}{\lambda} \sin \theta\right) \cdot \tan r \cdot \frac{\cot r - \cot\left(\frac{dR}{\lambda} \sin \theta\right)}{\tan\left(\frac{dR}{\lambda} \sin \theta\right) - \tan r}, \quad (4.10)$$

де r – номер просторового каналу лінійної еквідистантної антенної решітки. ($r=0,R$), θ – кутова координата. Результат роботи даного методу представлений на рис.5

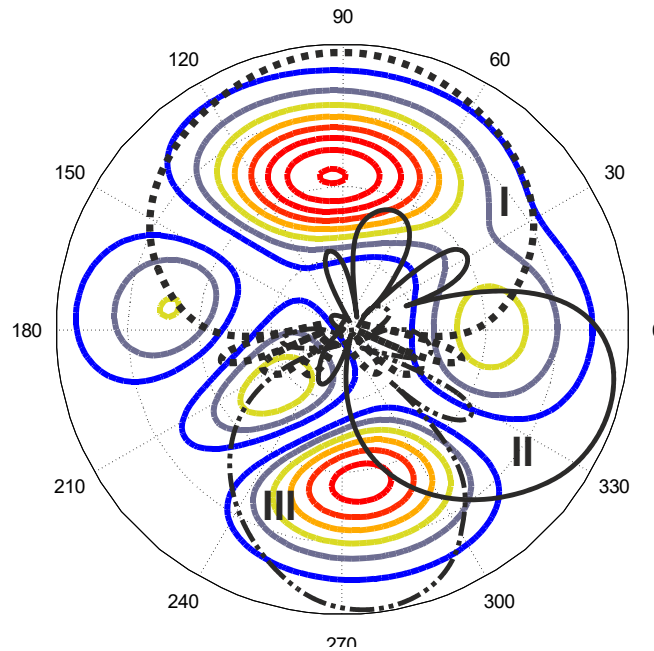


Рис. 4.5. Оптимізація потужності в комірці з використанням методу цифрового діаграмоутворення

Локальні максимуми діаграми напрямленості шукаються з цільової функції $H(\theta)$, за алгоритмом Кейпона [115]:

$$H(\theta) = (F^T(\theta) \cdot K^{-1} \cdot F(\theta))^{-1}, \quad (4.11)$$

де $F(\theta)$ – вектор значень просторової діаграми кожного каналу антенної решітки з елементами $Fr(\theta)$. K – кореляційна матриця, яка визначається [116]:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N U_n \cdot U_n^*, \quad (4.12)$$

де N – кількість часових інтервалів; U – вектор напруг сигналів отриманий в результаті ШПФ над напругами по виходах первинних приймальних каналів антенної решітки [116].

Проте, описаний у цьому розділі метод є доповненням до запропонованого методу абонентського навантаження згідно п. 1 наукової новизни дисертаційної роботи, оскільки в процесі його реалізації можливе виникнення ситуацій, коли корекція діаграм спрямованості антенних ансамблів дає змогу додатково підвищити ефективність балансування навантаження у мережі мобільного зв'язку.

4.3. Оцінювання максимального обсягу навантаження, що може бути переспрямоване у мережі за обраним шляхом

У сучасних телекомунікаційних мережах важливим і складним завданням є аналіз потоків даних для надання послуг кінцевим користувачам. Необхідна швидкість інформаційного потоку залежить від кількості користувачів, які підключені до сегменту локальної мережі, типів послуг та даних, які вони передають. Сучасні телекомунікаційні мережі орієнтовані на контент; отже, важливо, щоб користувачі отримували високоякісні інформаційні та телекомунікаційні послуги. Деяка кількість ресурсів повинна бути розподілена на потоки послуг для надання цих послуг. Отже, управління та розподіл мережних ресурсів мережі мобільного зв'язку між кількома потоками послуг для забезпечення високоякісного надання послуг є актуальним науковим завданням [7].

Вищеописане завдання, насправді, може бути сформульоване як питання: у випадку декількох потоків послуг, скільки пропускної здатності ми можемо виділити для кожного потоку послуг у кожній точці мережної системи?

Необхідно визначити фракції пропускної здатності, що використовуються, коли користувачі отримують доступ до послуг. Деякі дослідники пропонують досить ефективні методи розподілу мережних ресурсів, за винятком впливу процесу маршрутизації та характеристик мультисервісного трафіку. Однак ці статті не враховують впливу логічної структури мережної системи на передачу потоків послуг, що є особливо актуальним для випадку систем мобільного зв'язку.

Дуже важливо вказати на абстракцію проблеми, щоб забезпечити її незалежність від будь-яких мережевих технологій та / або протоколів, оскільки останні, зокрема в межах концепції LTE перебувають у стані постійного розвитку [10].

Аватор провів детальний чисельний аналіз розподілу мережевих ресурсів на потоки послуг, використовуючи представлення проблеми як задачі лінійного програмування. Цей підхід має обмеження у використанні через нелінійний та стохастичний характер мережевих процесів. У будь-якому випадку, це може бути застосовано у випадку, коли потоки послуг є постійними значеннями. Цю ситуацію можна спостерігати лише на дуже коротких часових проміжках. Тому рішення проблеми має тимчасовий ефект і повинно бути перераховане кожного разу, коли змінюються потоки сервісу, чутливого до затримок. Основна перевага запропонованого підходу полягає в простоті операцій і, отже, в тривалості обчислювальної тривалості. Як правило, обчислення для розв'язання проблеми нелінійної оптимізації займає набагато більше часу, навіть якщо його можна застосувати в довгостроковій перспективі. Обчислювальна складність є також набагато вищою. У багатьох випадках дуже важко реалізувати нелінійний розв'язок на практиці. Тому більша частина наукового суспільства намагається перетворити нелінійні проблеми на лінійні, якщо це можливо. Цей процес потребує також спрощення обмежень на розв'язки для лінійних функцій.

4.3.1. Формулювання завдання максимізації інтенсивностей сервісних потоків у системі мобільного зв'язку як завдання лінійного програмування

Мережний ресурс представлений загальною ємністю каналів, що підключають мережні пристрої. Сума ресурсу, що виділяється потоку, залежить від попередньо визначеної структури мережі (топології мережі). Швидкість потоку послуг залежить від пропускної здатності каналу та обмежується іншими потоками між тією ж парою вузлів. Набір всіх маршрутів формує

логічну структуру мережі. Ця логічна структура є граничним фактором, оскільки фізичні ресурси не можуть бути використані повністю після організації логічної структури. Таким чином, процес утворення логічної структури є визначальним фактором максимізації швидкості потоків послуг. Проблема є загальною для всіх типів мереж, які розглядають провідний або бездротовий зв'язок. Різниця виникає лише тоді, коли ми аналізуємо мережеві протоколи, котрі використовують для формування логічної структури. У даному випадку ми будемо аналізувати найбільш поширені протоколи мережного рівня, такі як RIP v.2 та OSPF. У будь-якому випадку, охоплене завдання не обмежується такими протоколами. Його можна розширити за допомогою протоколів розподілу бездротових ресурсів. Загалом, це завдання виникає, коли виконується множинний доступ до спільних мережних ресурсів. Його розв'язання зводиться до максимізації ресурсів, які виділяються конкретному замовнику [7, 10, 53].

Відомо, що формування логічної структури є або статичним (що є дуже рідкісним випадком), або динамічним (за допомогою динамічних протоколів маршрутизації); або поєднанням обох підходів. Динамічна маршрутизація може бути застосована шляхом вибору різних критеріїв маршруту: метрика найнижчої кількості стрибків по маршруту (RIP - Протокол маршрутизації) або умов каналу (OSPF - Open Shortest Path First). Логічні структури, утворені за допомогою кожного з протоколів, зазвичай не є однаковими, і тому частка виділених фізичних ресурсів може бути різною через різне навантаження мережі; отже протокол маршрутизації безпосередньо впливає на бажану швидкість кожного сервісного потоку.

Під потоку ми маємо на увазі трафік інформаційних пакетів між парою вузлів, який передається за допомогою одного маршруту.

Визначаючи потік за маршрутом, проблема розподілу мережевих ресурсів може бути сформульована з точки зору задачі лінійного програмування таким чином: максимізувати швидкість кожного потоку послуг на вході деякого мережевого вузла, що забезпечує одночасне існування та справедливу

конкуренцію потоків і оцінюйте максимальну кількість клієнтів, що користуються послугою, з різними рівнями якості обслуговування.

Телекомунікаційна мережа, представлена графом $G = (V, E)$ з логічною структурою

$$L = \{\mu(1,2); \mu(1,3); \dots; \mu(i, j)\}, \quad (4.13)$$

де $i, j \in V$, утвореною за допомогою алгоритму динамічної маршрутизації. Логічна структура обмежує використання фізичних ресурсів, представлених вектором \vec{x} . Розрахунок елементів цього вектора може бути виконаний шляхом розв'язання завдання лінійного програмування, представленого наступною системою нерівностей [7]:

$$\begin{aligned} & A \times x \leq b \\ \min_x f^T x, & \quad A_{eq} \times x = b_{eq} \\ & eb \leq x \leq ub \end{aligned}, \quad (4.14)$$

де $f(x)$ – цільова функція; A, A_{eq} – коефіцієнти лінійних рівнянь; x – шукана змінна; eb, ub – верхня і нижня межі шуканої змінної.

Запишемо завдання оптимізації у такому вигляді:

$$\min_x f(x), \quad (4.15)$$

де $f(x)$ – лінійна цільова функція, що розраховується як

$$f(x) = - \sum_{(i,j)} x_{i,j}, \quad (4.16)$$

де i, j – номери вузлів, $x_{i,j}$ – змінна, яка визначає швидкість сервісного потоку між парою вузлів. Розв'язок задачі має задовольняти системі обмежувальних умов [7]:

- обмеження продуктивності вузла:

$$\sum_{j \in \mu(i,j)} x_{i,j} + 2 \cdot \sum_{k \in \mu(i,j)} x_{k,j} + \sum_{i \in \mu(i,j)} x_{i,j} \leq \sum_{j \in V} C_{i,j}, \quad (4.17)$$

де $C_{i,j}$ – пропускна здатність каналу (i, j) (в умовних одиницях), $\mu(i, j)$ – маршрут між парою вузлів i, j ;

- обмеження пропускної здатності каналу:

$$\sum_{i,j \in \mu(i,j)} x_{i,j} \leq C_{i,j}, \quad (4.18)$$

- обмеження конкуренції інформаційних потоків:

$$0,5 \cdot \frac{C_{i,j}}{N_{\mu(i,j)}^{\max}} \leq x_{i,j} \leq C_{i,j}, \quad (4.19)$$

де $N_{\mu(i,j)}^{\max}$ – максимальна кількість потоків, що передають у каналі (i, j) , який належить до маршруту $\mu(i, j)$.

Ці умови були встановлені для забезпечення рівної конкуренції між мережними потоками через особливості методів лінійного програмування. Ми зробили висновок, що якщо два або більше потоків передаються в мережний канал, то потік через найкоротший шлях отримує всі ресурси, подавляючи тим самим інші потоки.

4.3.2. Вибір методу розв’язання завдання лінійного програмування

Розв’язання сформульованої проблеми може бути досягнуте за допомогою системи MatLab; її було обрано, оскільки вона включає функції для лінійної оптимізації та дозволяє працювати з графіками. З цією метою використовувалися дві бібліотеки - Bioinformatics Toolbox та Optimization Toolbox. Bioinformatics Toolbox містить методи створення, аналізу, обробки та візуалізації графів. Optimization Toolbox реалізує численні алгоритми лінійної та нелінійної оптимізації. Використовуючи ці методи, розроблено програмну модель телекомунікаційної мережі та роз’язано завдання розподілу мережних ресурсів серед неперіоритетних службових потоків, забезпечуючи максимізацію їх інтенсивностей у підсистемі базових станцій мережі мобільного зв’язку [7, 10].

Використовуючи функцію оптимізації `biograph()`, мережний граф представлений як графовий об'єкт. Використовуючи функцію `shortestpath()`, ми змогли розрахувати найкоротші шляхи між кожною парою вузлів у представленому графі. Отримані маршрути разом із вагами ребер графа є вхідними даними для завдання оптимізації. Оскільки завдання, яке потрібно розв'язати, належить до класу завдань лінійного програмування, ми використовуємо функцію `linprog()` на основі алгоритму Interior point.

Розв'язання завдання розподілу ємності мережної палтформи повинно здійснюватися для конкретної реалізації телекомунікаційної мережі. У нашому випадку її представлено ваговим графом з 9 вершинами і 16 ребрами (Рис. 4.6). На підставі цього графа розраховано маршрути між кожною парою вузлів у двох випадках: використання протоколу маршрутизації RIP та використання протоколу маршрутизації OSPF. Припускаємо, що в мережі використовується тільки одношляхова маршрутизація [7].

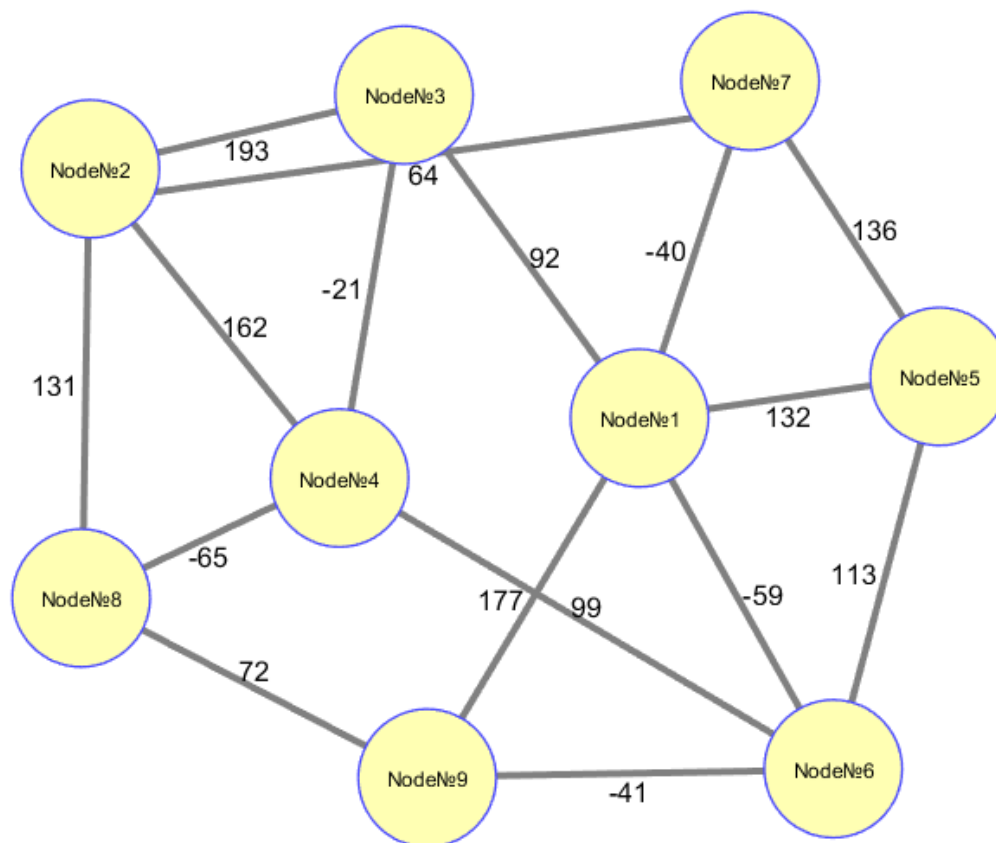


Рис. 4.6. Граф досліджуваної телекомунікаційної мережі [7]

4.3.3. Приклад розв'язання завдання максимізації інтенсивностей сервісних інформаційних потоків у системі мобільного зв'язку

Відповідно до рівнянь (4.17) – (4.19), для цього графа формуються цільова функція та лінійні обмеження. Виходячи з них, розв'язано завдання розподілу ємності мережі між потоками послуг із заданими інтенсивностями, які підлягають максимізації. Ці показники представлені вектором.

Розв'язки завдання оптимізації із застосуванням методу Interior point представлені в таблицях (Таблиця 4.2 і Таблиця 4.3).

Таблиця 4.2. Розв'язок завдання максимізації інтенсивності сервісних потоків у випадку маршрутизації OSPF [7]

Кроки алгоритму	Первинне завдання $A \cdot x - b$	Дуальне завдання $A^T \cdot y + z - f$	Розрив дуальності $x^T \cdot z$	Відносна похибка
Ітерація 0	$9.86 \cdot 10^3$	52.2	$5.91 \cdot 10^4$	$7.20 \cdot 10^3$
Ітерація 1	$9.69 \cdot 10^2$	2.62	$7.60 \cdot 10^3$	$8.93 \cdot 10^{-1}$
Ітерація 2	90.00	$1.03 \cdot 10^{-1}$	$1.38 \cdot 10^3$	$5.35 \cdot 10^{-1}$
Ітерація 3	8.94	$7.51 \cdot 10^{-3}$	$1.78 \cdot 10^2$	$1.61 \cdot 10^{-1}$
Ітерація 4	$6.90 \cdot 10^{-1}$	$1.90 \cdot 10^{-3}$	44.30	$5.25 \cdot 10^{-2}$
Ітерація 5	$2.56 \cdot 10^{-1}$	$3.32 \cdot 10^{-4}$	16.80	$2.01 \cdot 10^{-2}$
Ітерація 6	$5.26 \cdot 10^{-2}$	$2.62 \cdot 10^{-13}$	3.66	$4.36 \cdot 10^{-3}$
Ітерація 7	$2.98 \cdot 10^{-4}$	$1.52 \cdot 10^{-13}$	$3.15 \cdot 10^{-2}$	$3.87 \cdot 10^{-5}$
Ітерація 8	$1.50 \cdot 10^{-8}$	$2.25 \cdot 10^{-14}$	$1.59 \cdot 10^{-6}$	$1.96 \cdot 10^{-9}$
Ітерація 9	$2.19 \cdot 10^{-12}$	$1.64 \cdot 10^{-14}$	$1.59 \cdot 10^{-14}$	$2.01 \cdot 10^{-15}$
Ітерація 10	$1.27 \cdot 10^{-13}$	$9.42 \cdot 10^{-16}$	$3.98 \cdot 10^{-17}$	$1.17 \cdot 10^{-16}$

Оптимальний розв'язок сформульованого завдання лінійного програмування у випадку маршрутизації OSPF досягається при 10 ітераціях.

Таблиця 4.3. Розв'язок завдання максимізації інтенсивності сервісних потоків у випадку маршрутизації RIP [7]

Кроки алгоритму	Первинне завдання $A \cdot x - b$	Дуальне завдання $A' \cdot y + z - f$	Розрив дуальності $x' \cdot z$	Відносна похибка
Ітерація 0	$7.90 \cdot 10^3$	52.80	$6.09 \cdot 10^4$	$7.20 \cdot 10^3$
Ітерація 1	$1.30 \cdot 10^3$	$1.18 \cdot 10^{-14}$	$1.24 \cdot 10^4$	1.17
Ітерація 2	$1.43 \cdot 10^2$	$5.61 \cdot 10^{-14}$	$2.55 \cdot 10^3$	$5.84 \cdot 10^{-1}$
Ітерація 3	26.60	$3.30 \cdot 10^{-14}$	$4.19 \cdot 10^2$	$2.04 \cdot 10^{-1}$
Ітерація 4	1.61	$6.64 \cdot 10^{-14}$	37.70	$2.54 \cdot 10^{-2}$
Ітерація 5	$3.49 \cdot 10^{-1}$	$1.15 \cdot 10^{-13}$	8.93	$5.93 \cdot 10^{-3}$
Ітерація 6	$2.77 \cdot 10^{-4}$	$1.17 \cdot 10^{-14}$	$4.39 \cdot 10^{-2}$	$3.62 \cdot 10^{-5}$
Ітерація 7	$1.51 \cdot 10^{-8}$	$1.21 \cdot 10^{-14}$	$2.26 \cdot 10^{-6}$	$1.86 \cdot 10^{-9}$
Ітерація 8	$3.71 \cdot 10^{-13}$	$1.11 \cdot 10^{-14}$	$1.25 \cdot 10^{-13}$	$1.31 \cdot 10^{-15}$
Ітерація 9	$1.18 \cdot 10^{-13}$	$3.21 \cdot 10^{-15}$	$3.13 \cdot 10^{-16}$	$3.79 \cdot 10^{-16}$

Оптимальний розв'язок представленого завдання лінійного програмування у випадку маршрутизації RIP досягається при 9 ітераціях.

Рішення для протоколу RIP зображено на Рис. 4.7 (двонаправлені потоки, синій відповідає швидкості потоку з вихідної вершини до місця призначення, жовтий – навпаки), а також для протоколу OSPF – на Рис. 4.8.

Представлені результати відображають максимальну швидкість потоку, яка може бути досягнута в мережі, представлений графом на Рис. 4.6 у випадку використання протоколу RIP або OSPF. Ми помічаємо, що величини в кожному конкретному випадку відрізняються. Це означає, що вивчені протоколи формують різні обмеження на використання мережевих ресурсів, як було зазначено вище. Числові результати дають нам краще розуміння процесів оброблення трафіку в мережі.

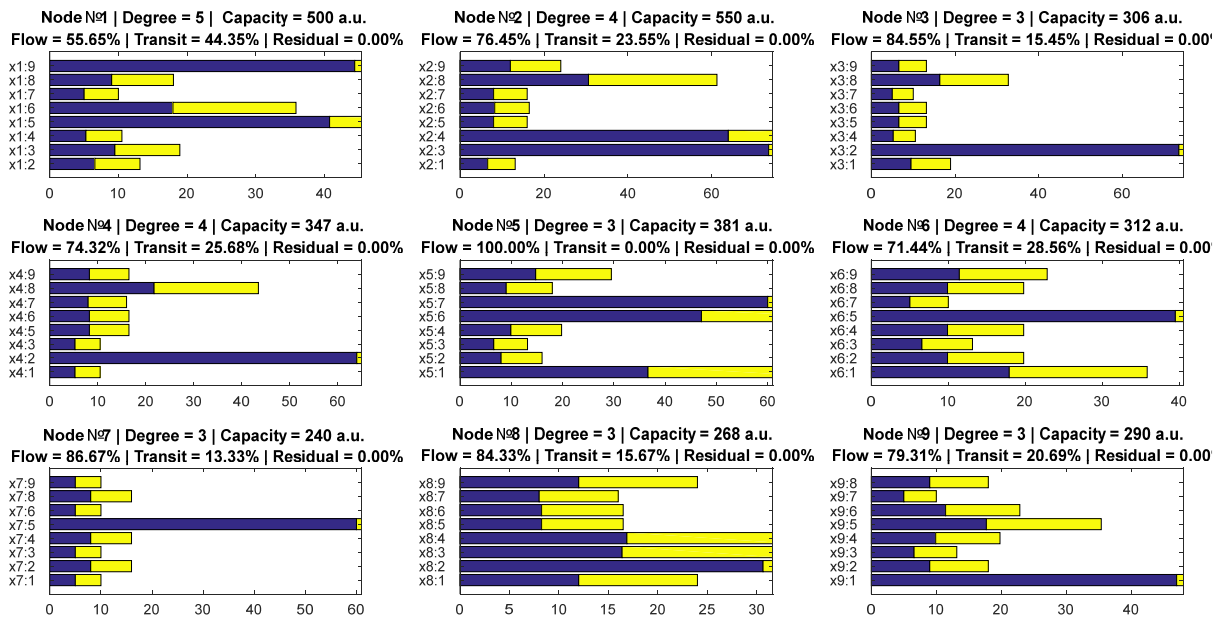


Рис. 4.7. Інтенсивності сервісних потоків між кожною парою вузлів у логічній структурі, утвореній протоколом RIP [7]

Метою визначення максимальних рівнів сервісних потоків, які передаються в мережі мобільного зв'язку, є можливість керувати службами у верхньому шаблоні моделі мережі, щоб відповідати вимогам користувача. Наприклад, якщо загальний попит користувачів набагато вище, ніж досягнута максимальна швидкість потоку сервісу, ми можемо застосувати стратегію визначення пріоритетів, щоб надавати послуги користувачам з високим пріоритетом або маніпулювати якістю, щоб переконатися, що ми можемо обслуговувати необхідну кількість сеансів мережі.

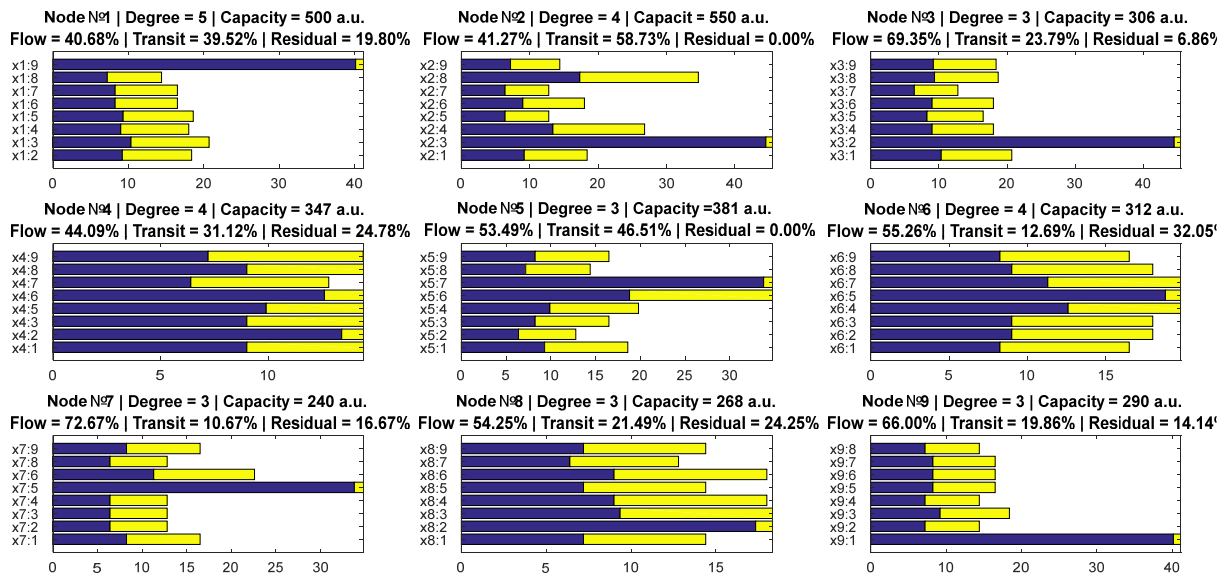


Рис. 4.8. Інтенсивності сервісних потоків між кожною парою вузлів у логічній структурі, утвореній протоколом OSPF [7]

На Рис. 4.9. представлено порівняльний аналіз результатів. Логічним подальшим кроком є визначення причин зазначених відмінностей.

Це може бути викликано особливостями конфігурування як RIP, так і OSPF для розрахунку найкоротших шляхів. У випадку з OSPF ми використовуємо показники, які враховують пропускну здатність каналу, як і в випадку RIP, ми працюємо з числом вузлів. Тому канали (ребра в граф-термінах) з низькою пропускну здатністю можуть не використовуватися в разі логічної структури, сформованої OSPF. Давайте перевіримо це припущення.

Співвіднесемо отримані розв'язки завдання оптимізації із структурою мережі, щоб проаналізувати вплив розрахованих сервісних потоків на використання мережних ресурсів.

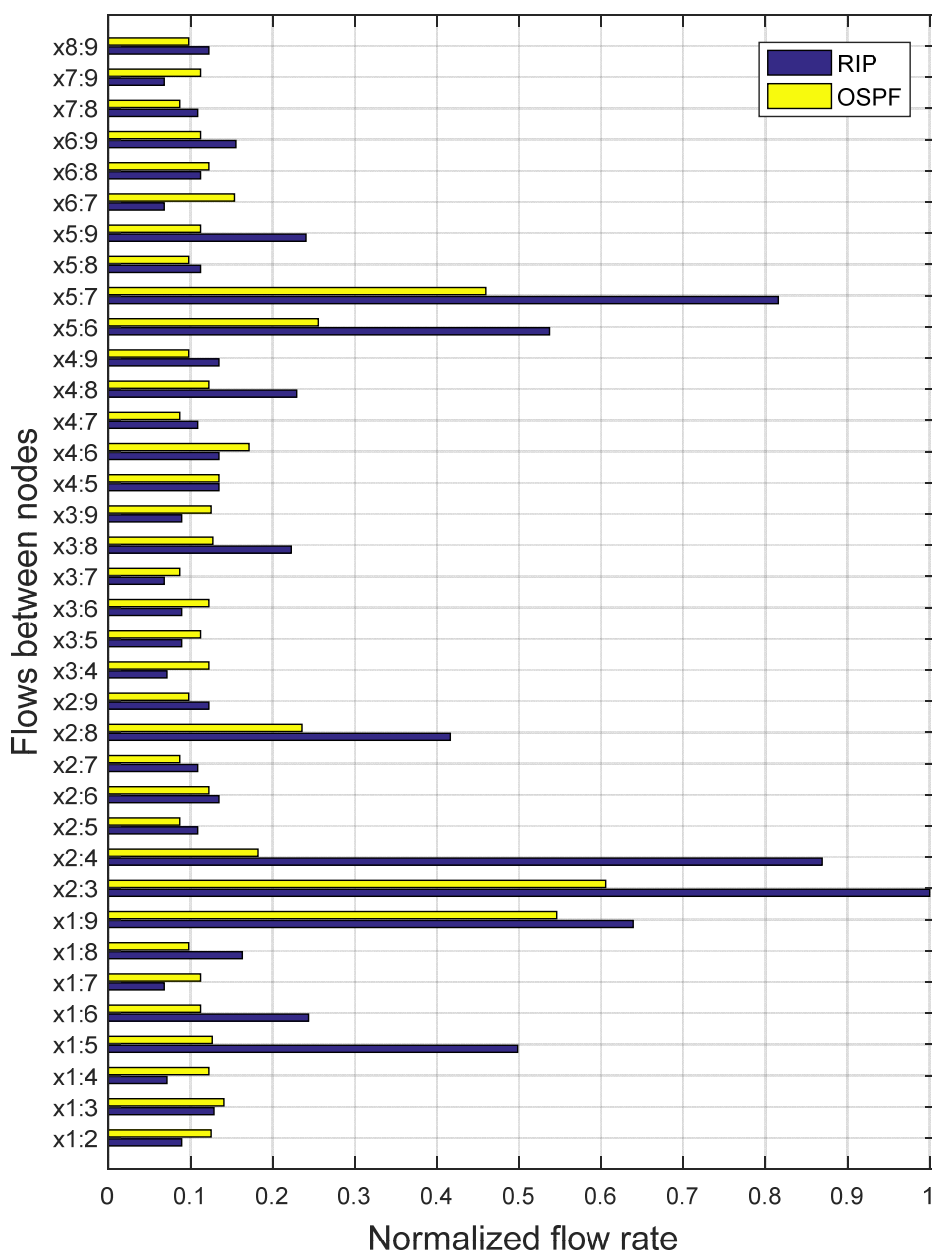
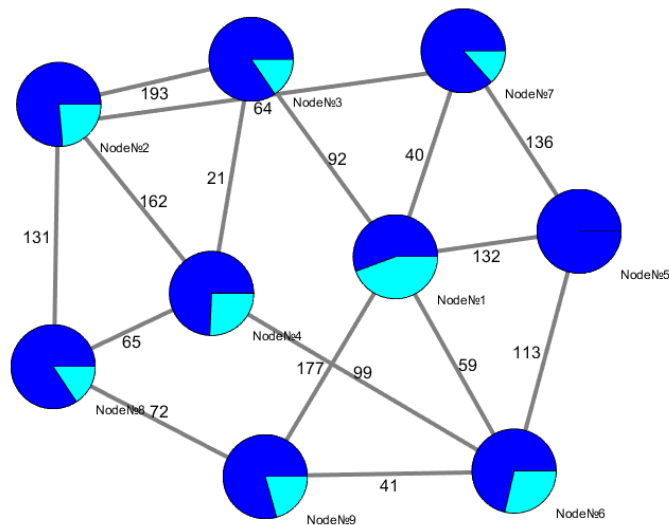


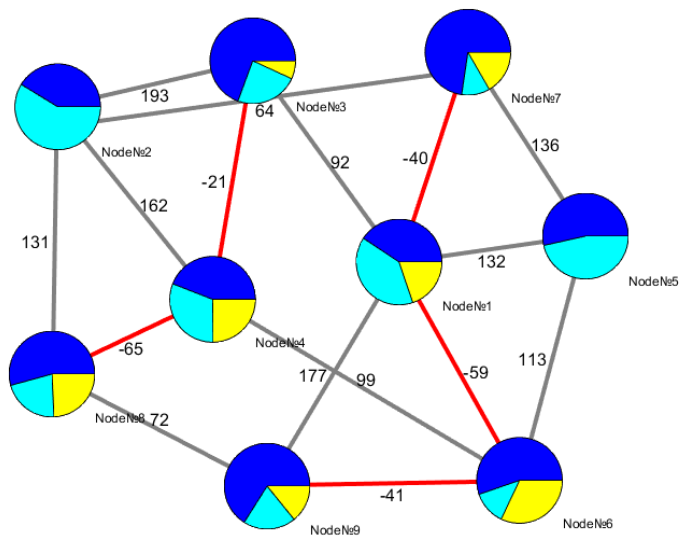
Рис. 4.9. Порівняння результатів для протоколів RIP та OSPF [7]

Передаючи потоки з розрахованими значеннями по досліджуваному фрагменту мережі, в кожному вузлі спостерігається наступне використання ресурсів:

- Ресурси, що використовуються вихідним потоком;
- Ресурси, що використовуються вхідним потоком;
- Ресурси, що використовуються транзитним потоком;
- Незадіяні ресурси.



а)



б)

Рис. 4.10. Розподіл мережних ресурсів у логічній структурі, сформованій а) відповідно до протоколу RIP; б) відповідно до протоколу OSPF (синій - сервісний потік, світло-блакитний - транзитний трафік з інших сервісних потоків)

У процесі передавання потоків через мережу з маршрутизацією RIP, розподіл отриманого ресурсу представлено на Рис. 4.10, а.

Сервісний потік із розрахованими значеннями інтенсивності в логічній структурі, сформованій за протоколом RIP, використовує всі доступні мережні

ресурси (з точки зору пропускної здатності), оскільки вузли не містять невикористаних ресурсів. Як показано на Рис. 4.10, вузол №5 бере участь тільки в передачі трафіку вхідного і вихідного потоків, інші вузли також передають транзитний трафік. Оскільки кожен вузол є ініціатором потоку, наявність транзитного потоку в вузлі обмежує кількість ресурсів, які можна виділити для сервісного потоку у цьому вузлі. Відмітимо, що при збільшенні степені вершини графа частка транзитного трафіку в цьому вузлі також зростає (№1, №4, №6). Це відбувається через особливості роботи протоколу RIP. Він розраховує маршрути за критерієм мінімальної кількості переходів, з максимальним використанням вершин із найвищим ступенем. У такому разі ці вершини (центри тяжіння) можуть стати вузькими місцями; отже, використання отриманого рішення для сформульованого завдання може визначити слабкі сторони при розробленні фізичної структури телекомунікаційної мережі. Рекомендовано в фізичних структурах, що містять вершини з різними ступенями, визначити ті, для яких ступінь максимальна, і забезпечити доступну пропускну здатність сусідніх каналів вищою, ніж інші. Це дає змогу забезпечити резервну пропускну здатність для транзитного трафіку та зменшить його вплив на інтенсивність сервісного потоку, яка формується в цьому вузлі.

Сформульоване завдання також розв'язане для випадку формування логічної структури за протоколом OSPF. Отримані результати відрізняються від описаних вище для протоколу RIP. Як видно на Рис. 4.10, б, майже кожен вузол містить невикористані ресурси.

Детальний аналіз показав, що невикористані ресурси присутні у вузлах, суміжні канали яких мають мінімальні пропускні здатності. Вони відхиляються протоколом OSPF під час відбору за станом каналу, як і очікується (ребра, позначені від'ємними вагами на Рис. 4.10, б). Поясненням є те, що протокол OSPF вибирає маршрути без урахування інших потоків, які передаються на окремих каналах. Крім того, як показано на Рис. 4.10, б, значна частина транзиту проходить через вузли №2 та №5, оскільки їх сусідні канали мають

найбільшу пропускну здатність. Протокол OSPF виявляє зайві канали в фізичній структурі мережі, які можна видалити. З іншого боку, цей результат показує невідповідність фізичної та логічної структури. У цьому випадку рекомендується скористатися зваженою багатошляховою маршрутизацією для максимального використання фізичних ресурсів системи мобільного зв'язку.

Таким чином, ми спостерігаємо логічну структуру, сформовану протоколом маршрутизації, що накладає значні обмеження на наявність фізичних ресурсів для передавання потоків сервісів [7].

4.4. Вплив балансування сервісних потоків на тривалість очікування надання послуг у системах мобільного зв'язку

Низька вартість трансляції через Інтернет та доступність Інтернет-трансляції у порівнянні з звичайними передавачами та обладнанням трансляцій зробили сервіс IPTV вибором багатьох постачальників в даний час.

Як правило, IPTV – це термін, який застосовується до постачання традиційних телевізійних каналів, фільмів та відеозапису за запитом у приватній або загальнодоступній мережі. З точки зору кінцевого користувача, IPTV повинна виглядати і працювати так само, як стандартне обслуговування платного телебачення з додаванням нових функцій та послуг [117].

Як правило, IPTV-сервери реалізують потік онлайн каналів шляхом багатоадресного передавання трафіку підключеними клієнтами, щоб мінімізувати навантаження на сервери під час потокового передавання на велику кількість клієнтів одночасно, тим самим, передаючи відповідальність за передачу пакетів в мережну інфраструктуру. У випадку "Відео за запитом" (VoD), для передавання запитуваного відео необхідно встановити односпрямоване з'єднання між клієнтом та сервером. Це призводить до висновку, що завантаження сервера прямо пропорційно кількості підключених клієнтів VoD. Тому необхідний набір серверів VoD, які повинні працювати одночасно для відповіді на запити клієнтів, слід оцінювати статистично з урахуванням числа підписників, а також механізму, який забезпечує

балансування запитів клієнтів на VoD-сервери та забезпечує уникнення відмов і має велике значення для IPTV.

В даний час існує лише кілька механізмів балансування трафіку. Для того, щоб визначити відповідь системи, яка реалізує певний механізм балансування, по-перше, необхідно розробити модель трафіку IPTV. Ця модель повинна бути простою для її програмної реалізації і близькою до реального джерела IPTV.

Моделі для механізмів балансування трафіку також необхідні для математичного аналізу відповідей цих систем, коли вхідним впливом є трафік IPTV.

Як правило, контент високої чіткості (HD) кодується за допомогою MPEG-4 (H.264), що має високий коефіцієнт стиснення та призводить до дуже змінних темпів передавання даних (VBR) для стиснутого відео.

Основним завданням стиснення відео є видалення просторової та часової надлишковості в межах кожного кадру та між послідовними кадрами для ефективного використання пропускну здатності. Безперервне потокове відео перетворюється на послідовність кадрів на вході кодера. Після кодування кадри передаються періодично, і формують GoP. Кожна GoP містить I фрейм і певну кількість P та B фреймів. Наприклад, з кодеком MPEG GoP набуває вигляду $I B1 B2 P1 B3 B4 P2 B5 B6 P3 B7 B8$. Перший фрейм у кожній GoP – це I фрейм, який внутрішньо закодований без посилання на будь-які інші фрейми. Наступні P фрейми як внутрішньо-закодовані, так і кодовані по відношенню до попереднього P або I фрейму. Решта B фрейми також внутрішньо закодовані та закодовані між собою, і вони використовують як попередні, так і наступні P або I фрейми як основу [118].

Для цілей дослідження використовується дворівнева марківська модель трафіку. Модель розглядає як просторову, так і часову кореляцію в послідовностях, кодованих у форматі MPEG, тому вона може імітувати сильно змінні швидкості передавання даних (VBR) джерел IPTV. Модель містить ланцюг Маркова на рівні групи зображень (GoP) та ланцюг Маркова на рівні

кадрів, тому він може фіксувати як внутригрупові, так і міжгрупові GoP-кореляції [118].

Розмір кадру залежить від складності текстури та рухової складності відеоконтенту або його просторових та часових доменних кореляцій.

У просторових та часових областях ми класифікуємо відео на декілька рівнів, S і T , відповідно. Таким чином, можемо оперувати $S \times T$ станами для відображення кореляції в обох областях. Оскільки тривалість GoP менша за півсекунди, ми припускаємо, що просторові та часові співвідношення джерела відеозапису в кожному GoP залишаються на тому ж рівні або в тому ж стані. Тому ми можемо побудувати дискретний ланцюг Маркова рівня GoP, в якому кожен стан представляє часові та просторові кореляції відео в межах цього GoP.

Зі збільшенням кількості станів (збільшенням S і T), модель стає більш точною, але збільшується обчислювальна складність формування та використання моделі. З емпіричних досліджень відомо, що вибір $S = 3$ і $T = 3$ забезпечує прийнятний компроміс між точністю та складністю моделі. Три рівні відображають стани з низькою (L), середньою (M) та високою (H) кореляцією.

Межі між станами повинні бути встановлені належним чином, щоб обмежене число станів можна було використовувати для точного збору статистики відео. Відповідно до експериментальних результатів з кількома відеопотоками, рівномірний розподіл кадрів в кожному стані дає досить хороші результати. Тому, імовірність перебування у стані $\Pr(S_i) = 1/N$, де S_i є одним із станів, і $N = S \times T$ – загальна кількість станів [8].

В просторовій області, з урахуванням того, що тільки I фрейми незалежно внутрішньо-закодовані, розмір I фрейму використовується для визначення текстурної складності цілої GoP. У часовій області співвідношення розмірів першого P фрейму до розміру I фрейму в цій же GoP використовується для визначення часової кореляції, що представлено нижче. Фрейм $P1$ одночасно внутрішньо і міжфреймово закодований з єдиним

посиланням на I фрейм. Розмір фрейму $P1$ визначається як $P1 = P1t \times \Delta\varphi$, де $\Delta\varphi$ представляє вектор переміщення від фрейму I до фрейму $P1$ в одній GoP, а $P1t$ – інформація про текстуру, що міститься у фреймі $P1$, яка майже повністю співпадає з інформацією про текстуру, закладену в I фреймі тієї ж GoP. Таким чином, відношення між розміром першого P фрейму та розміром I фрейму в межах однієї і тієї ж GoP, φ , показує кореляцію в часовій області $\varphi = \frac{P1}{I} = \Delta\varphi$. Збільшення $\Delta\varphi$ означає збільшення швидкості руху відео, і зменшення кореляції в часовій області.

Поєднання трьох станів у просторовій області з трьома станами у часовій області дає дев'ять станів для кожного GoP, як представлено на Рис. 4.11. Наприклад, стан LM представляє GoP з низькою кореляцією в просторовій області і з середньою кореляцією в часовій області. Будь-які два стани поєднані між собою. Імовірність переходу між двома станами визначається часовою та просторовою ймовірностями переходу. Оскільки часові та просторові процеси незалежні, то ймовірність переходу від стану LM до стану MM , наприклад, визначається як $\Pr\{LM \rightarrow MM\} = \Pr_s\{L \rightarrow M\} \times \Pr_t\{M \rightarrow M\}$, де $\Pr_s\{L \rightarrow M\}$ і $\Pr_t\{M \rightarrow M\}$ визначає ймовірність просторового переходу від стану L до M , та ймовірність переходу в часовому домені від стану M до M , відповідно. Кожна ймовірність \Pr_t і \Pr_s отримана шляхом підрахунку кількості переходів між двома пов'язаними станами [119].

Оскільки модель на рівні GoP не покриває сплескову природу інтенсивності надходження трафіку в межах GoP, модель слід розширити для урахування різних типів фреймів всередині кожної GoP.

Часовий крок для моделі Маркова на рівні фреймів відповідає тривалості відеофрейму. Для відео MPEG кожен стан на рівні GoP відповідає 12-елементному ланцюгу Маркова на рівні кадрів, як показано на Рис. 4.11.

Це являє собою 12 кадрів у GoP. Імовірність переходу між станами в межах GoP має детерміновану природу. Кожен стан відповідає іншому типу

фрейму з іншою швидкістю надходження. Враховуючи обмежену кількість станів, велика кількість кадрів з широким діапазоном розмірів кадрів належить до одного стану. Отже, критична проблема полягає в тому, як пов'язати розміри кадрів зі станами.

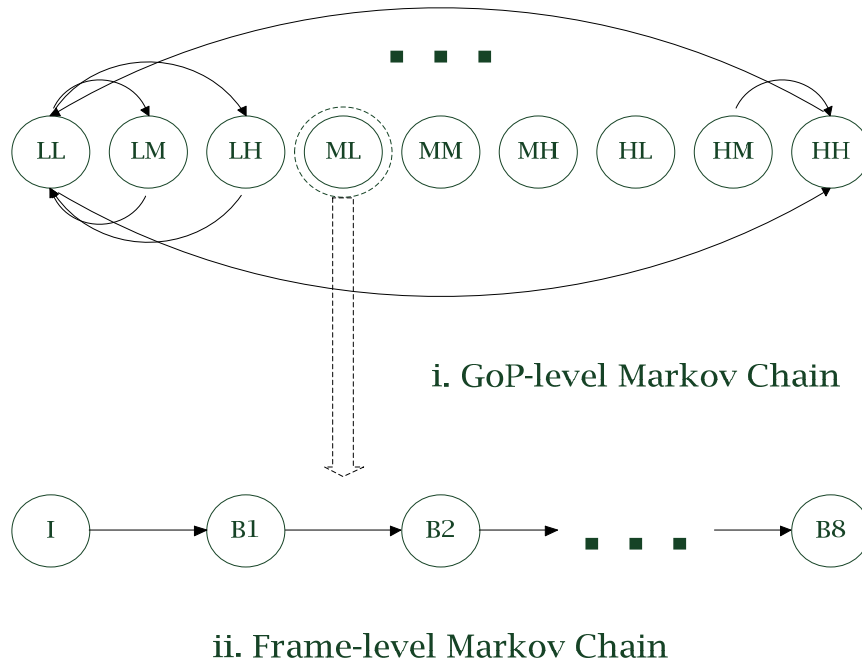


Рис. 4.11. Запропонована модель трафіку IPTV [8]

Розмір I фрейму визначається тільки кореляцією у просторовій області. Тому, розмір I фрейму у станах XL , XM та XH однаковий для $X = L, M, H$ в просторовій області. Найпростіший спосіб визначити розмір фрейму у кожному стані – це усереднити розмір всіх фреймів I , які належать до одного стану

$$\bar{I}^X = \sum_{I_j \in \{\text{state } XL, XM, XH\}} \frac{I_j}{N^X} \quad (4.20)$$

де N^X – кількість I фреймів у станах XL , XM та XH , а I_j є розміром фрейму I у j -ій GoP. \bar{I}^X в (1) є середнім розміром фрейму I у станах XL , XM та XH , що може бути використано для подання розміру фрейму I у відповідних станах. Відповідно, розмір фрейму $P1$ може бути визначений для кожного із станів шляхом усереднення.

Для решти B та P фреймів, оцінимо спершу кореляцію всередині GoP. Коефіцієнт кореляції двох послідовностей i та j визначається як

$$R(i, j) = \frac{\text{CoV}(i, j)}{\sqrt{\text{CoV}(i, i)\text{CoV}(j, j)}}, \text{ де } \text{CoV} \text{ визначає коваріацію. Величина } R \text{ між}$$

B/P фреймами та $P1$ у одній GoP підлягає оцінці. Величина R меншою мірою залежить від відеоконтенту, схеми компресії тощо.

Зазвичай, є значна кореляція між фреймами всередині GoP. Тому розміри решти P/B фреймів генеруються на підставі розміру фрейму $P1$ з використанням лінійного рівняння

$$\overline{F}_T^K = \infty_T^K \overline{P}_1^K, \text{ for } T \in \{B_1, B_2, \dots, B_8, P_2, P_3\}, \quad (4.21)$$

де \overline{F}_T^K визначає усереднений розмір фрейму конкретного типу, і розраховується подібно до (4.32), а K визначає три стани в часовій області. На відміну від підходу, де використовуються усереднені розміри фреймів P та B в GoP для представлення всіх фреймів P/B в одному і тому ж GoP, ми розрізняємо розміри фреймів P та B в різних розташуваннях. Це викликано тим, що HD відео має значно більші розміри фреймів, ніж відеодані, досліджені раніше. Навіть з урахуванням того, що значення ∞_T^K для різних типів фреймів P/B можуть бути близькими, після множення в (4.33) з суттєвим розкидом розмірів фрейму I розбіжність буде значною.

Однією з найпоширеніших реалізацій балансування навантаження за допомогою DNS є Berkeley Internet Name Domain (BIND). Це дозволяє дублювати адресні записи (A записи) для певного хоста з різними IP-адресами. Сервер іменування по черзі перетворює адреси на будь-яке ім'я, що має декілька записів A, і відомий як DNS round robin.

Як правило, коли клієнтський комп'ютер хоче ініціювати підключення до певного сервісу, він робить запит на розв'язання імені постачальника послуг. Цей запит буде оброблений DNS-сервером, який у випадку Round Robin DNS буде виконувати роль контролера розподілу навантаження. Замість того, щоб повертати фіксовану адресу, сервер DNS повертає адресу пулу доступних адрес

сервера. DNS-сервер проходить через всі адреси в пулі один за одним і рівномірно розподіляє запити серед усіх доступних постачальників послуг.

На Рис. 4.12 показана спрощена модель механізму розподілу навантаження Round Robin DNS.

Щоб створити модель для цього механізму, нам доведеться зробити деякі припущення:

1. Маршрутизація пакетів від джерела до пункту призначення по всій мережі відбувається миттєво.

2. Розмір запитів DNS та розмір відповідей DNS фіксуються для всього сценарію.

3. Всі черги мають нескінченні розміри. Практично, запити та відповіді DNS відносно невеликі, якщо порівнювати їх із обсягом оперативної пам'яті.

4. Весь трафік має однаковий пріоритет у чергах, не застосовується зважене чергування.

Метою є визначення того, скільки запитів можна обробити, перш ніж з'являтиметься тайм-аут запиту, скільки часу потрібно для завершення запиту DNS.

Припускаючи, що час, необхідний для отримання та обробки запиту, перевищує час, необхідний для відправки відповіді, загальний час, необхідний для завершення запиту, - це загальний час, необхідний для отримання та обробки всіх попередніх запитів у черзі на сервері, плюс час, необхідний для відправки відповіді клієнту. Ця формула повинна бути придатною відповідно до попереднього припущення:

$$T = (N + 1) * \left(P + \frac{S_Q}{BW_1 * C_1} \right) + \frac{S_R}{BW_2 * C_2}, \quad (4.22)$$

де T час (у мілісекундах), необхідний для завершення запиту DNS, N це кількість запитів DNS, що передують розглянутому запиту в серверній черзі, P це час (в мілісекундах), необхідний серверу для обробки певного запиту, S_Q це розмір (у кілобайтах) запиту DNS, BW_1 це пропускна здатність каналу зв'язку (в

Мбіт / с) від клієнтів до DNS-сервера, BW_2 це пропускна здатність каналу зв'язку (в Мбіт) від DNS-сервера до клієнтів, C_1 це завантаженість каналу від клієнтів до сервер DNS (значення від 0 до 1), C_2 це завантаженість каналу від DNS-сервера до клієнтів (значення від 0 до 1).

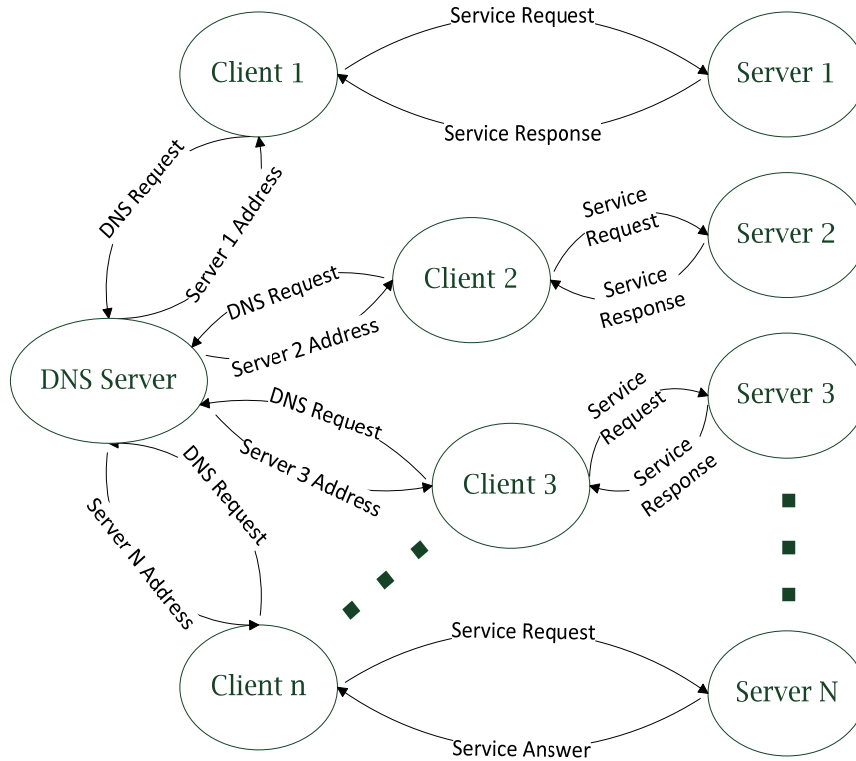


Рис. 4.12. Механізм балансування Round-robin DNS [8]

У попередній формулі не розглядаються перевантаження, спричинені розміщеними запитами DNS. Для підрахунку перевантажень, спричинених запитами DNS, завантаженість повинна бути отримана як:

$$C' = \frac{N_T * S}{BW} + C, \quad (4.23)$$

де N_T це загальна кількість запитів / відповідей у черзі сервера DNS, S це розмір запиту / відповіді, а BW це пропускна здатність каналу.

Тепер, застосовуючи вираз перевантаження в попередній формулі, ми отримуємо:

$$T = (N + 1) * \left[P + \frac{S_Q}{BW_1 * \left(\frac{N * S_Q}{BW_1} + C_1 \right)} \right] + \frac{S_R}{BW_2 * C_2}$$

$$T = (N + 1) * \left[P + \frac{S_Q}{(N * S_Q + BW_1 * C_1)} \right] + \frac{S_R}{BW_2 * C_2}, \quad (4.24)$$

Формула (4.36) дає змогу обчислити час, необхідний для завершення запиту DNS, але вона не розглядає черги, які можуть бути викликана DNS-відповідями, зробленими сервером. У цій формулі ми припускаємо, що час, необхідний для отримання та обробки запиту DNS, перевищує час відправки відповіді клієнту [8].

Якщо час, необхідний для відправки відповіді DNS, перевищує час, необхідний для отримання та обробки запиту, то загальний час, необхідний для завершення запиту, буде час, необхідний для відправки DNS-відповідей, плюс час, необхідний для отримання і обробки першого запиту. Таким чином, відповідна формула для обчислення загального часу від початку запиту до закінчення буде:

$$T = P + \frac{S_Q}{BW_1 * C_1} + \frac{(N + 1) S_R}{BW_2 * \left(\frac{N * S_R}{BW_2} + C_2 \right)}, \quad (4.25)$$

де T час (у мілісекундах), необхідний для завершення запиту DNS, N це кількість запитів DNS, що передують розглянутому запиту в серверній черзі, P це час (в мілісекундах), необхідний серверу для обробки певного запиту, S_Q це розмір (у кілобайтах) запиту DNS, BW_1 це пропускна здатність каналу зв'язку (в Мбіт/с) від клієнтів до DNS-сервера, BW_2 це пропускна здатність каналу зв'язку (в Мбіт/с) від DNS-сервера до клієнтів, C_1 це завантаженість каналу від клієнтів на сервер DNS (величина між 0 та 1), C_2 це завантаженість каналу з DNS-сервера до клієнтів (величина між 0 та 1).

З використанням співвідношень (4.24) та (4.25), можемо визначити максимальну кількість DNS запитів, які можуть бути оброблені до появи тайм-аутів.

Коли час, необхідний для отримання та обробки запиту на сервері, перевищує час, необхідний для відправлення відповіді клієнту, максимальна кількість запитів клієнта, доступних до того, як DNS-запити почнуть затримуватися, становитиме

$$N_{total} = -\frac{C_2 * S_Q + BW_1 * C_1 * S_R}{S_R * (S_Q + BW_1 * C_1 + BW_1 * C_1 * P - BW_1 * C_1 * T_{timeout})} + \frac{BW_1 * C_1 * C_2 * P - BW_1 * C_1 * C_2 * T_{timeout}}{S_R * (S_Q + BW_1 * C_1 + BW_1 * C_1 * P - BW_1 * C_1 * T_{timeout})}.$$

Повертаючись до співвідношення (4.23), ми можемо зобразити графік, який відобразатиме час, необхідний для виконання запиту за різних обставин. Для наших цілей, зафіксуємо величини $S_Q = S_R = 512 \text{ bytes}$, $P = 0.04 \text{ sec}$, які є середніми значеннями для типового запиту DNS. Припустимо, що $BW_1 = BW_2$ і підставимо значення 100 Мбіт/с та 1 Гбіт/с. Підставляючи ці значення у формулу вище, ми отримуємо:

$$T = \frac{512 * N + 512}{12500000 * C_2 + 512 * N} + \frac{16}{390625 * C_1} + \frac{1}{25} \text{ (100 Мбіт/с)}$$

і,

$$T = \frac{512 * N + 512}{125000000 * C_2 + 512 * N} + \frac{8}{1953125 * C_1} + \frac{1}{25} \text{ (1 Гбіт/с)}$$

У графіках ми будемо використовувати той самий діапазон значень (0 ~1) для C_1 та C_2 і позначимо їх через C . Використаємо діапазон значень (0 ~10000) для N .

Порівнюючи графіки на Рис. 4.13 а та б, очевидно, що використання каналу з більш високою пропускнуою здатністю зменшить час обробки запиту приблизно на 47% у випадку найгіршого сценарію – де перевантаження знаходиться на піку, а кількість запитів у черзі сервера – 10000.

Ці результати з точки зору користувача дуже хороші, оскільки час простою 0,901 секунди ледве помітний. Але існують два серйозних аспекти, які ми не розглядали, – це кешування DNS на клієнтському комп'ютері, а також той факт, що у випадку виникнення помилки, "новий" сервер, до якого був переключений певний клієнт, не має можливості знати, де починати обробку.

Перша проблема може призвести до простою до 5 хвилин, якщо кеш DNS не був примусово оновлений. Друга проблема призведе до збою, і користувачеві доведеться переходити назад до місця, де завершився невдалий сеанс. Обидві ці проблеми можуть бути вирішені шляхом впровадження механізму зв'язку між клієнтами та серверами для оновлення стану серверів динамічно. Ця функція недоступна в загальному алгоритмі балансування навантаження Round Robin DNS.

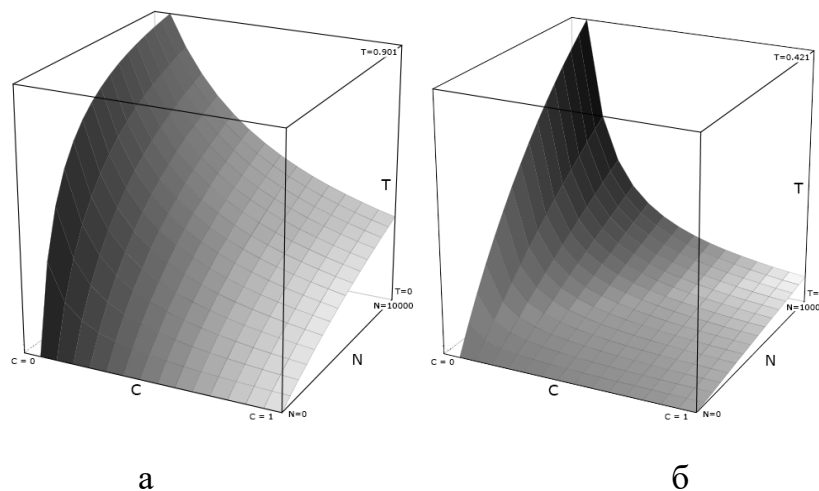


Рис. 4.13. Відношення часу, необхідного для завершення запиту, до кількості запитів в черзі та завантаженості каналу, використовуючи (а) канал 100 Мбіт/с та (б) канал 1 Гбіт/с [8]

4.5. Метод призначення базових станцій в мережах 5 покоління

Для мобільних мережі п'ятого покоління характерне використання частот в міліметровому діапазоні та щільне розташування базових станцій. Дослідження показують, що 80% користувачів концентруються на 20% радіопокриття [59, 61, 62]. Відповідно, доцільним є впровадження малих

комірок, оскільки призначення базових станцій ближче до користувача знижує наскрізну (end-to-end) затримку та підвищує кількість доступних ресурсів для окремого користувача [11, 57, 64, 71, 92, 93].

Використання малих комірок дає змогу проводити оптимізацію радіопокриття. При цьому основним завданням є мінімізація кількості макро- і мікро- БС (базові станції) в мережі при задоволенні наступних обмежень:

- 1) Для усіх користувачів повинні задовольнятися вимоги по SINR.
- 2) Всі користувачі повинні отримувати потужність сигналу, що перевищує заданий пороговий рівень.
- 3) Користувач k може обслуговуватись БС i , тільки якщо БС i є активною в даний момент.
- 4) Кожен користувач може обслуговуватись як мінімум однією БС.
- 5) Кожна БС може обслуговувати певну кількість користувачів на основі доступних піднесучих і типу обслуговуючої БС (макро-, мікро-).

Підхід до розв'язання завдання призначення базових станцій заснований на послідовному виключенні базових станцій [11]. Запропонований метод оптимізує кількість і аналізує розташування базових станцій у мережі і виводить набір базових станцій для їх призначення.

Розрахунок відстані між користувачами і БС базується на основі зваженого розбиття Вороного [60], при якому 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. Алгоритм складається з шести основних кроків.

Крок 1. Вилучення БС i з мережі. Створення зваженого розбиття Вороного та розрахунок відстаней між усіма взаємодіючими БС після вилучення БС i .

Крок 2. Перевірка вимог щодо SINR для усіх користувачів в мережі.

Крок 3. Перевірка кількості користувачів, що обслуговуються кожною з БС i та порівняння з гранично допустимими значеннями для базових станцій макро- та мікрорівнів.

Крок 4. Перевірка вимог прийнятої потужності для кожного користувача.

Крок 5. Призначення базової станції. Якщо існує певна кількість користувачів, що за поточних умов залишаються поза межами обслуговування (не відповідність вимогам SINR або прийнятого рівня потужності), тоді БС i належить до незмінного масиву I .

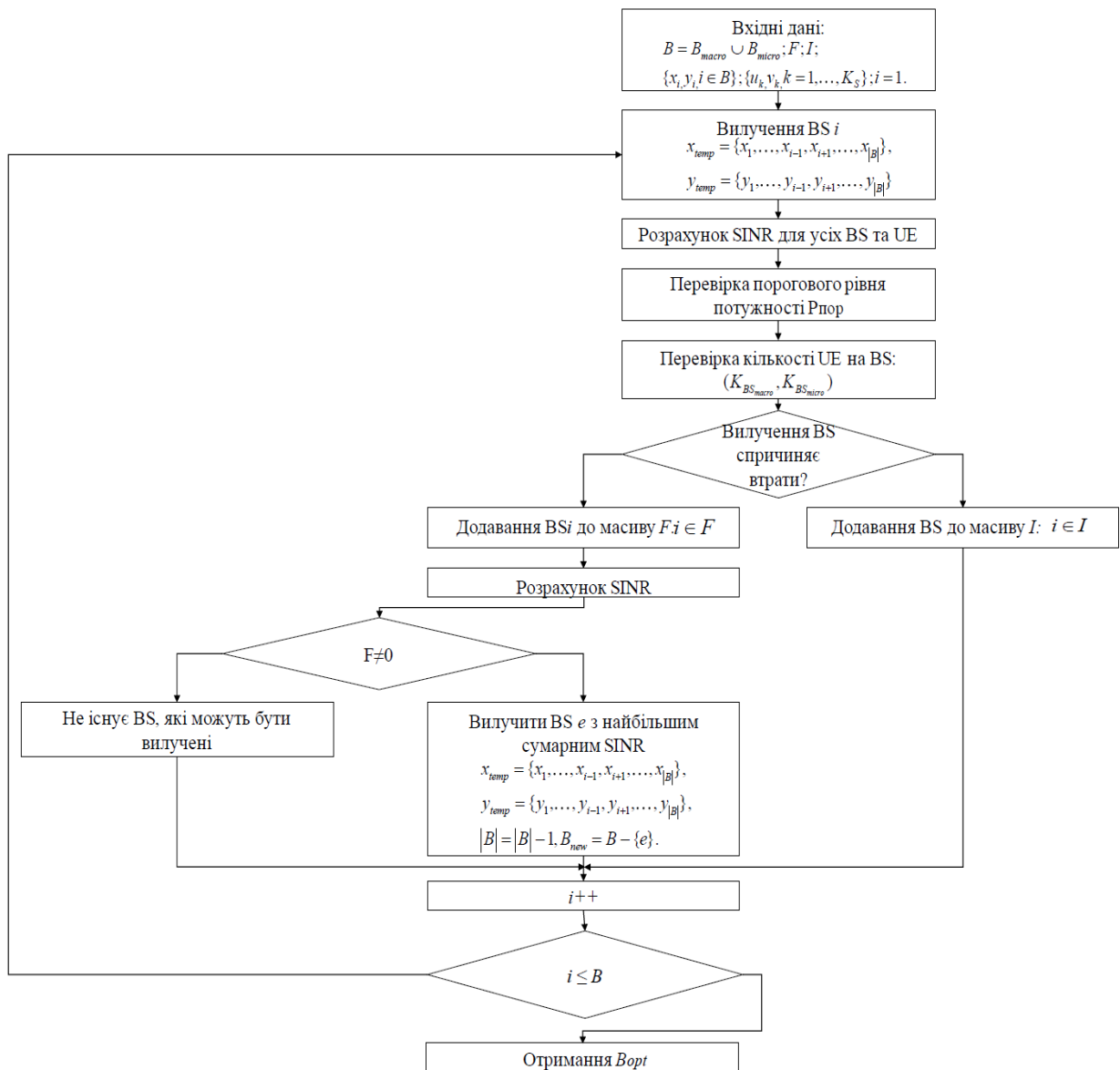


Рис. 4.14. Блок-схема алгоритму призначення базових станцій [11]

В іншому випадку, БС i належить до доступного масиву F . Тоді, обраховується SINR у всій мережі. F відображає доступний набір базових станцій, що можуть бути вилучені без перевищення цільової імовірності знаходження користувача поза межами обслуговування. I відображає недоступний до вилучення набір базових станцій.

Крок 6. Якщо $F \neq 0$, БС з вищим значенням SINR повинна бути вилучена з мережі, а доступна множина БС зменшується на одиницю. В іншому випадку алгоритм завершує свою роботу, адже ні одна з БС не може бути вилучена з мережі без втрат. Ці кроки повторюються допоки ні одна з БС не зможе бути вилученою з мережі без спричинення втрат обслуговування.

Модель мережі радіодоступу складається з множини базових станцій, що сформована з базових станцій макро- та мікро- рівнів. Макро- та мікро- БС розподіляються по території випадковим чином з різними рівнями потужності. Області концентрованого користувацького навантаження накладаються поверх рівномірного розподілу користувачів. Для наявних в даний момент активних користувачів необхідно знайти мінімально необхідну кількість базових станцій, що забезпечує вимоги щодо радіопокриття та ємності. Приймаємо, що інтерференція залежить лише від міжкоміркової інтерференції, так як піднесучі є ортогональними в комірках в мережі, що базується на OFDMA (припускаємо ідеальну ортогональність). Для обслуговуваного UE необхідно, щоб рівень SINR не перевищував деякого порогового значення $SINR_{thr}$ [84]. Вираз для SINR може бути записаний наступним чином:

$$SINR_k = \frac{P_{k,b(k)}}{\sigma^2 + \sum_{i=1, i \neq b(k)}^{N_B} c_i P_{k,i}} \geq SINR_{thr}, \quad (4.26)$$

де c_i відображає, яка БС $_i$ активна в даний момент. Сума $\sum_{i=1, i \neq b(k)}^{N_B} c_i P_{k,i}$ представляє інтерференційну потужність, отриману від сусідніх БС терміналом UE $_k$.

Результати моделювання показують, що для більшості сценаріїв навантаження запропонований алгоритм дає змогу вилучити близько 40 % від загальної кількості БС при збереженні гарантованої якості обслуговування. Як правило, зони з високою щільністю користувацького навантаження покриваються великою кількістю малих комірок для забезпечення QoS.

Частка відключених користувачів (не обслуговуються ні одною БС) є 1.5%, а середня потужність прийнятого сигналу на одного користувача становить – 73.2 дБм. Обидва значення знаходяться в допустимих межах.

Отримані результати характеризують основні особливості мобільних мереж наступного покоління. Малі комірки широко застосовуються для забезпечення ємності при високій концентрації користувачів, в той час як впровадження макрокомірок дає змогу покрити області з низькою щільністю користувачів.

4.6. Проектування мережі C-RAN за критерієм наскрізної затримки

Розділення функцій базової станції дає змогу проектувати нові та вдосконалювати існуючі мобільні мережі, забезпечуючи при цьому достатній рівень ефективності керування та не потребуючи повної зміни її функціональних частин [6, 55, 56, 58, 66, 67]. При розділенні функцій базової станції необхідно враховувати вплив додатково внесеної затримки, що може суттєво впливати на ефективність функціонування мережі в цілому. Таким чином затримка є одним із ключових показників продуктивності сучасних систем зв'язку [66, 67, 74, 75].

Аналіз затримки в C-RAN. Затримка може бути виміряна часом, що необхідний для двосторонньої передачі IP-пакета від терміналу через мобільну мережу до сервера. Час кругової передачі (RTT – Round-Trip Time), суттєво впливає на якість сприйняття послуг (QoE) у порівнянні з затримкою в одну сторону (OWD – One-Way Delay) [96]. Для спрощення приймається, що RTT розраховується за формулою:

$$\tau_{RTT} = 2 * \tau_{OWD} \text{ мс}, \quad (4.27)$$

де: τ_{OWD} – одностороння затримка.

Значення для найкращого та найгіршого випадків кругової затримки наведено нижче (Таблиця 4.4) [2]. RTT складається із затримки, що вносять наступні підсистеми: мережа радіодоступу (RAN), транспортна підсистема, яка в свою чергу складається з двох частин (fronthaul – від RRH до BBU та backhaul – від BBU до ядра мережі), ядро мережі (EPC), магістральні лінії та кінцеві сервери обробки даних. Для спрощення в магістральних лініях враховуємо тільки затримку поширення.

$$\tau_{ETE} = \tau_{RAN} + \tau_{BH} + \tau_{EPC} + \tau_{BB} + \tau_S, \quad (4.28)$$

де: τ_{RAN} – RTT в RAN, τ_{BH} – RTT в ВН, τ_{EPC} – затримка в ядрі мережі, τ_{BB} – RTT в магістральній мережі, τ_S – затримка сервера.

Таблиця 4.4. Компоненти кругової затримки з кінця в кінець

τ , мс	RAN	ВН	EPC	IP Backbone	Сервери	RTT
Мін.	7	2	1	30	1	41
Макс.	10	12	4	300	4	330

Зазначимо, що затримка EPC та серверів обробки даних може суттєво змінюватись в залежності від кількості та типу сесій і запитів, що обробляються. При використанні зв'язування мережевих послуг NSC (Network Service Chaining), деякі пакети можуть отримувати додаткову затримку, особливо ті, що ще не були включені в потокові таблиці OpenFlow. Цей факт веде до необхідності врахування ще однієї компоненти при обчисленні загальної кругової затримки з кінця в кінець [2].

$$\tau_{ETE}^{NSC} = \tau_{ETE} + \tau_{NSC}^{MC}, \quad (4.29)$$

де τ_{ETE} – загальна кругова затримка з кінця в кінець без врахування NSC, τ_{NSC} – затримка, що пов'язана з NSC.

Також необхідно врахувати додаткову затримку, що пов'язана з розділенням eNodeB (Рис. 4.15):

$$\tau_{eNB} = \tau_{RRH} + \tau_{FH} + \tau_{BBUP}, \quad (4.30)$$

де τ_{RRH} – затримка при обробці в RRH, τ_{FH} – RTT в FH, τ_{BBUP} – затримка при обробці в BBU.



Рис. 4.15. Компоненти затримки в C-RAN

Фіксоване значення затримки в транспортній підсистемі визначає необхідність зменшення часу обчислень на стороні BBU.

Моделювання процесу функціонування C-RAN. Розроблена модель (Рис. 4.16) дає змогу оцінити ефективність позиціонування структурних елементів RAN, затримку та кількісні характеристик мережевих ресурсів (канал FH, BBUP, канали ВН та ядра).

Зазначимо, що розміщення RRH є статичним, але їх під'єднання до того чи іншого BBUP може змінюватись. Позиціонування BBUP як вхідних даних для визначення вузлів, береться за умови найбільшої із можливих затримок FH, що використовується при визначенні RAN.

Першим кроком при визначенні структури RAN є позиціонування більшості BBUP. Другим кроком потрібно знайти RRH, що можуть бути підключені до одного із сусідніх BBUP. Третім кроком є створення та розміщення додаткових BBUP для RRH, які залишились не підключеними. Останнім кроком є підрахунок загальної ємності, яка необхідна у кожному із BBUP. Визначення транспортних вузлів проводиться за аналогічним алгоритмом, але із врахуванням затримки ВН.

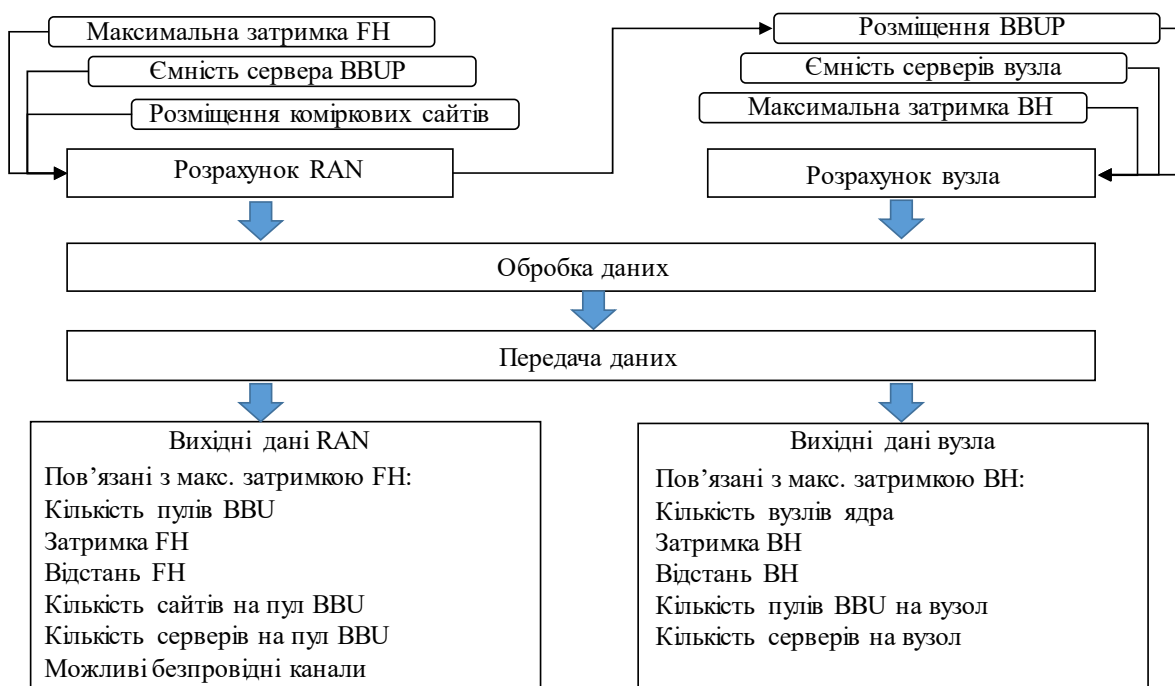


Рис. 4.16. Модель визначення структури C-RAN та дослідження затримки [2]

Блок обробки даних відповідає за аналіз даних за параметрами затримки, відстані і пропускну здатності, обчислення максимальних обмежень затримки в FH і ВН, обчислення кількості необхідних серверів в BBUP. Блок передачі даних відповідає за узгодження отриманих даних з відповідними математичними моделями.

Етап обробки даних приймає результати отримані на етапах розміщення RAN та вузлів ядра і на їх основі обраховує результат. Затримка каналів FH, відстань між BBUP та їх комірковими сайтами, вимоги щодо продуктивності каналу FH аналізуються для отримання відповідних статистичних даних (максимальне, мінімальне та середнє значення, а також стандартне відхилення від загального випадку). Результатом роботи моделі є визначення наступних параметрів:

- кількість необхідних BBUP/вузлів;
- затримка та відстань FH/ВН;
- частку BBUP/вузлів, що обслуговують єдиний сайт;

- кількість сайтів та необхідна кількість серверів на ВВUP при різних значеннях обмеження максимальної затримки FH;
- кількість ВВUP та необхідна кількість серверів на кожен вузол при різних значеннях обмеження затримки ВН.

Фаза упакування даних здійснюється за допомогою використання бібліотеки Curve Fitting Tool в Matlab, з урахуванням математичних моделей наведених нижче (Таблиця 4.5).

У роботі вважається, що модель із значенням коефіцієнта кореляції $R^2 > 0,95$ є доволі точною, для опису даних що досліджуються. Якщо кілька моделей мають близьке значення R^2 і ЗСКП, то обирається та модель, яка більше підходить з теоретичної точки зору.

Таблиця 4.5. Математичні моделі, що використовують для опису експериментальних даних

Назва моделі	Вираз
Раціональна	$f(x) = \frac{a}{x+b}, a, b \in \mathbf{R}$
Лінійна	$f(x) = a * x + b, a, b \in \mathbf{R}$
Квадратична	$f(x) = a * x^2 + b * x + c, a, b, c \in \mathbf{R}$
Експоненційна	$f(x) = a * e^{bx}, a, b \in \mathbf{R}$

Проведено аналіз вплив зміни максимальної затримки FH на такі величини: загальна кількість ВВUP ($N_{\text{ВВUP}}$), середня затримка FH ($\mu_{\delta \text{ FH}}$), середня довжина FH ($\mu_{\delta \text{ FH}}$), можлива частка безпроводних підключень ($N_{\text{mw канали}}$), середня кількість сайтів на ВВUP ($\mu_{N_{\text{сайтів/ВВUP}}}$) та середня кількість серверів на ВВUP ($\mu_{N_{\text{сервера/ВВUP}}}$). Результати подано в Таблиця 4.6.

Таблиця 4.6. Вплив максимальної затримки на параметри RAN

Змінна	Максимальна затримка FH [μс]						Очікуваний результат	Перевірка
	75	100	125	150	175	200		
NBBUP	11,00	68,00	52,00	37,00	29,00	22,00	Спадання	+
μδ FH[μс]	31,84	41,86	54,01	62,20	76,31	75,43	Зростання	+
μδ FH[км]	6,36	8,37	10,80	12,40	15,26	15,08	Зростання	+
Nmw канали[%]	8,46	6,53	2,71	2,15	0,66	1,60	Спадання	+
μNсайтів/BBUP	16,00	27,00	35,00	49,00	63,00	83,00	Зростання	+
μNсервера/BBUP	29,00	50,00	65,00	91,00	116,00	153,00	Зростання	+

На Рис. 4.17 зображено залежність кількості необхідних BBUP в залежності від обмеження максимальної затримки.

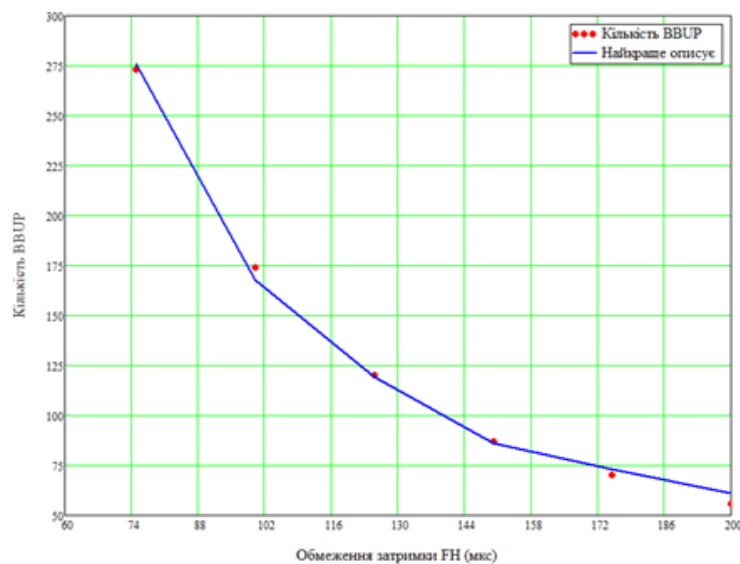


Рис. 4.17. Залежність кількості BBUP від обмеження максимальної затримки FH

Очевидно, що зі збільшенням максимальної затримки FH, збільшується також довжина FH. Це призводить до збільшення площі покриття окремими BBUP, що при покритті однакової площі дає змогу зменшити необхідну кількість BBUP (56 BBUP для $\tau_{max} = 200$ мкс та 273 BBUP для $\tau_{max} = 75$ мкс. Для опису залежності обрано нормальну модель (Таблиця 4.5). Незважаючи на те, що квадратична та експоненційна моделі мають схоже значення кореляції у порівнянні з нормальною (<0,98), її було обрано, тому, що вона монотонно спадає, на відміну від квадратичної моделі, а також середньоквадратичне відхилення майже на половину менше від експоненційної [2, 67].

Іншим важливим параметром є кількість ВВUP, що обслуговують лише один сайт. Кількість таких, в ідеальному випадку, повинна становити 0, саме в такому випадку у повній мірі використовуються можливості мультиплексування у С-RAN, а також підвищується енергоефективність. У Таблиця 4.7 наведено кількість ВВUP, що обслуговують один сайт у залежності від обмеження максимальної затримки.

На Рис. 4.18 наведено відсоток ВВUP, що обслуговують лише один сайт у відношенні до загальної кількості ВВUP.

Частка ВВUP, що обслуговують лише один сайт, спадає до значення затримки 150 мкс, а далі зростає внаслідок зменшення загальної кількості ВВUP. Результати, зображені на Рис. 4.18, підтверджують ефективність запропонованого методу, оскільки лише при обмеженні максимальної затримки 75 мкс існує більше 10% ВВUP від загальної кількості, що обслуговують лише один сайт. Отримані результати також дають змогу стверджувати про широкі можливості застосування мультиплексування у С-RAN.

Таблиця 4.7. Кількість ВВU пулів, що обслуговують лише один сайт

Максимальна затримка FH	75	100	125	150	175	200
Кількість ВВUP	32	14	7	3	3	4

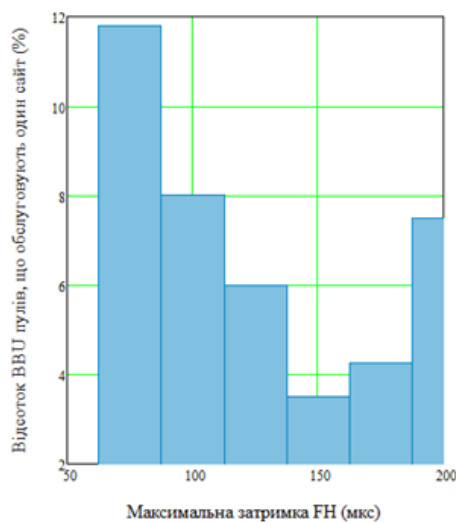


Рис. 4.18. Частка ВВUP, що обслуговують лише один сайт

При збільшенні обмеження максимальної затримки очікується зростання середнього значення затримки FH (Рис. 4.19).

Середня затримка суттєво менша ніж межа максимальної затримки (наприклад, при обмеженні 200мкс, середня складає всього 80 мкс). При збільшенні обмеження максимальної затримки спостерігається також збільшення стандартного відхилення, що очевидно, оскільки ВВUP забезпечує з'єднання як до ближніх так і до дальніх сайтів, що є причиною розкиду результатів. Для опису результатів використовується лінійна модель.

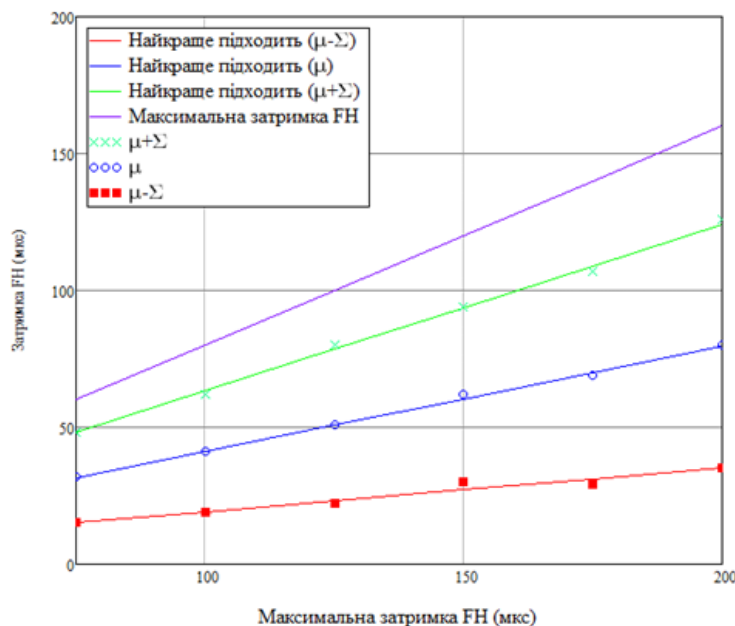


Рис. 4.19. Відношення середньої до обмеження максимальної затримки FH

На основі наведених значень максимальної та мінімальної затримки для різних значень обмеження максимальної затримки (Таблиця 4.8) можна переконатись, що максимальна затримка FH завжди менша від обмежуючого значення.

Таблиця 4.8. Максимальні та мінімальні затримки FH для заданих обмежень

Обмеження максимальної затримки FH, мкс	75	100	125	150	175	200
Максимальна затримка FH, мкс	74.62	99.91	124.78	149.92	174.79	199.98
Мінімальна затримка FH, мкс	0					

Запропонована модель добре справляється із поставленими задачами проектування C-RAN, та надає достовірні дані для дослідження затримки при різних конфігураціях мережі.

Сьогодні популярним є проектування мереж із використанням нано- та пікокомірок, тому необхідні подальші дослідження із врахуванням різних типів об'єднання та з'єднання таких комірок з іншими елементами мережі.

Проведені дослідження затримки в C-RAN та розроблено модель розрахунку затримки для подальших досліджень. Вдосконалено метод побудови мережі радіодоступу при впровадженні C-RAN, що дає змогу розміщувати BBUP та вузли ядра, враховуючи максимальне обмеження затримки транспортної підсистеми. Такий підхід підвищує ефективність використання ресурсів BBUP.

Проведено дослідження та моделювання середньої затримки в каналі транспортної підсистеми в залежності від обмежень максимальної затримки. Отримані експериментальні дані дають змогу описувати математичними моделями очікувану поведінку мережі при розгортанні мереж наступних поколінь. На основі очікуваного навантаження та значення допустимої затримки оператори мають змогу спрогнозувати витрати на проекти із модернізації мобільних мереж.

4.7. Висновки до розділу 4

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.

Запропоновано метод оптимізації політики керування потужністю в радіоінтерфейсах мережі мобільного зв'язку. Даний метод дозволяє знизити рівень інтерференції в комірках та підвищити ефективність керування радіоресурсами в мережі. Запропонований метод дозволяє незалежно оптимізувати управління потужністю в комірках мережі мобільного зв'язку для окремих користувачів у різних секторах і підвищити рівень потужності, який припадає на 1 Ерл абонентського навантаження

Для аналізу затримок обслуговування запитів на мультисервісні послуги у розподіленій системі з використанням балансування навантаження відповідно до наведеного методу запропоновано модель пересилання запитів між вузлами та виведено співвідношення для можливості оцінки затримки для каналів зі змінною пропускнуою здатністю.

Запропоновано алгоритм призначення базових станцій у мережах 5G, який дає змогу зменшити кількість активних макро- і мікро- БС у мережі шляхом послідовного виключенні базових станцій та призначенням обслуговуючих БС до окремих користувачів на основі обчислення зваженої віддалі між обраним користувачем і усіма БС в мережі. Розроблений алгоритм дає змогу зменшити від 30% до 40 % кількість активних БС із збереженням достатньої якості обслуговування для більшості сценаріїв абонентського навантаження.

Проведено дослідження та моделювання середньої затримки в каналі транспортної підсистеми в залежності від обмежень максимальної затримки. Отримані експериментальні дані дають змогу описувати математичними моделями очікувану поведінку мережі при розгортанні мереж наступних поколінь. На основі очікуваного навантаження та значення допустимої затримки оператори мають змогу спрогнозувати витрати на проекти із модернізації мобільних мереж.

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 сформуванню 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 ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

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 ICI, 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 ICI, 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 ICI, ISSN 0321-0499)
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, “Графо-аналітичний 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)
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))

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.

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.

15. 3GPP TR 36.902 V1.0.0, "Self-configuring and self-optimising network use cases and solutions (Release 8)," December 2008.
16. 3GPP TS 36.314 V10.0.0, "Layer 2 - measurements (Release 10)," December 2010.
17. 3GPP TS 36.104 V13.5.0, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception overall description (Release 13)," October 2016.
18. 3GPP TS 36.331 V11.1.0, "Radio resource control (RRC) protocol specification (Release 11)," September 2012.
19. Yue Chen, "Soft handover issues in radio resource management for 3G WCDMA networks," PhD Thesis, Queen Mary, University of London, UK, September 2003.
20. Joel S. Engel and Martin M. Peritsky, "Statistically-optimum dynamic server assignment in systems with interfering servers," IEEE Transactions on Communications, vol.21, no.11, pp.1287-1293, November 1973.
21. Minghai Feng, Xiaoming She, Lan Chen, and Yoshihisa Kishiyama, "Enhanced dynamic cell selection with muting scheme for DL CoMP in LTE-A," IEEE Vehicular Technology Conference-Spring (VTC-Spring), pp.1-5, May 2010.
22. Harri Holma and Antti Toskala, "LTE for UMTS - OFDMA and SC-FDMA based radio access," John Wiley & Sons, 2009.
23. Thomas Jansen, Irina Balan, John Turk, Ingrid Moerman, and Thomas Kurner, "Handover parameter optimization in LTE self-organizing networks," IEEE Vehicular Technology Conference-Fall (VTC-Fall), pp.1-5, September 2010.
24. Hua Jiang and Stephen S. Rappaport, "Prioritized channel borrowing without locking: a channel sharing strategy for cellular communications," IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), vol.1, pp.276-280, December 1993.
25. Hua Jiang and Stephen S. Rappaport, "CBWL: a new channel assignment and sharing method for cellular communication systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.43, no.2, pp.313-322, May 1994.

26. Raymond Kwan, Rob Arnott, R. Paterson, Riccardo Trivisonno, and Mitsuhiro Kubota, "On mobility load balancing for LTE systems," IEEE Vehicular Technology Conference-Fall (VTC-Fall), pp.1-5, September 2010.
27. Tomson Joe Kahwa and Nicolaos D. Georganas, "A hybrid channel assignment scheme in large-scale, cellular-structured mobile communication systems," IEEE Transactions on Communications, vol.26, no.4, pp.432-438, April 1978.
28. Yevgeni Koucheryavy, Giovanni Giambene, Dirk Staehle, Francisco Barcelo-Arroyo, Torsten Braun, and Vasilios Siris, "Traffic and QoS management in wireless multimedia networks: COST 290 Final Report," Springer, 2009.
29. Ridha Nasri and Zwi Altman, "Handover adaptation for dynamic load balancing in 3GPP long term evolution systems," International Conference on Advances in Mobile Computing and Multimedia (MoMM), pp.145-154, December 2007.
30. P. Nahi, C.G. Parini, S. Papadopoulos, Lin Du, John Bigham, and Laurie Cuthbert, "A semi-smart antenna concept using real-time synthesis for use in a distributed load balancing scheme for cellular networks," International Conference on Antennas and Propagation (ICAP), vol.1, pp.168-171, April. 2003.
31. Mahmudur Rahman and Halim Yanikomeroglu, "Enhancing cell-edge performance a downlink dynamic interference avoidance scheme with inter-cell coordination," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol.9, no.4, pp.1414-1425, April 2010.
32. Mamoru Sawahashi, Yoshihisa Kishiyama, Akihito Morimoto, Datsuke Nishikawa, Motohiro Tanno, "Coordinated multipoint transmission/reception techniques for LTE-Advanced," IEEE Wireless Communications, vol.17, no. 3, pp.26-34 June 2010.
33. INFOSOC-ICT216284 FP7 SOCRATES, "Final report on self-organization and its implications in wireless access networks," D5.9, v1.0, December 2010, <http://www.fp7-socrates.org/files/Publications/>

34. Ozan K. Tonguz and Evsen Yanmaz, "On the theory of dynamic load balancing," IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM), vol.7, pp.3626–3630, December 2003.
35. Ying Wang and Ping Zhang, "Radio resource management," Beijing University of posts and telecommunication Press, May 2005.
36. Lin Xiao, "Radio resource allocation in relay based OFDMA cellular networks," PhD Thesis, Queen Mary University of London, 2010 January.
37. Na Yao, "A CBR approach for radiation pattern control in WCDMA networks," PhD Thesis, Queen Mary University of London, January 2007.
38. Ying Yang, Pengfei Li, Xiaohui Chen, and Weidong Wang, "A High-efficient algorithm of mobile load balancing in LTE system," IEEE Vehicular Technology Conference-Fall (VTC-Fall), pp.1-5, September 2012.
39. Ming Zhang and Tak-Shing P. Yum, "Comparisons of channel-assignment strategies in cellular mobile telephone systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol.38, no.4, pp.211-215, November 1989.
40. Y. Wang, K. I. Pedersen, T. B. Sorensen and P. E. Mogensen, "Carrier load balancing and packet scheduling for multi-carrier systems," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 9, no. 5, pp. 1780-1789, May 2010.
41. Y. Wang, K. I. Pedersen, P. E. Mogensen and T. B. Sørensen, "Carrier load balancing methods with bursty traffic for LTE-Advanced systems," 2009 IEEE 20th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, Tokyo, 2009, pp. 22-26.
42. G. Xinyu, J. Shucong, L. Wenyu and Z. Lin, "Energy efficient load balancing in LTE self-organization networks," 2013 IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC Workshops), London, 2013, pp. 96-100.
43. W. Li, X. Duan, S. Jia, L. Zhang, Y. Liu and J. Lin, "A Dynamic Hysteresis-Adjusting Algorithm in LTE Self-Organization Networks," 2012 IEEE 75th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Yokohama, 2012, pp. 1-5.

44. Y. Khan, B. Sayrac and E. Moulines, "Centralized self-optimization of pilot powers for load balancing in LTE," 2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), London, 2013, pp. 3039-3043.
45. Z. Altman, S. Sallem, R. Nasri, B. Sayrac and M. Clerc, "Particle swarm optimization for Mobility Load Balancing SON in LTE networks," 2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), Istanbul, 2014, pp. 172-177.
46. W. Weidong et al., "A call admission control algorithm based on inter-link load balance in heterogeneous networks," 2009 2nd IEEE International Conference on Broadband Network & Multimedia Technology, Beijing, 2009, pp. 356-360.
47. Alatishe S. Adeyem. Review of Load Balancing Techniques in 3GPP LTE System / Alatishe S. Adeyem, Dike U. Ike // International Journal of Computer Science Engineering (IJCSE). – July 2013. – Vol. 2 No.04. – pp. 112-116.
48. Tonguz O. K. The mathematical theory of dynamic load balancing in cellular networks / Tonguz O. K., Yanmaz E. // IEEE Trans. on Mobile Computing. – Dec 2008. – vol. 7, no. 12. – pp. 1504-1518.
49. Bu T. Generalized proportional fair scheduling in third generation wireless data networks / Bu T., Li L., Ramjee R. // IEEE Proc. INFOCOM. – Apr. 2006.
50. Son K. 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. – pp. 3566-3576.
51. Omar Altrad. Load Balancing Based on Clustering Methods for LTE Networks / Omar Altrad, Sami Muhaidat // Cyber Journals: Multidisciplinary Journals in Science and Technology, Journal of Selected Areas in Telecommunications (JSAT). – February Edition, 2013. – Volume 3, Issue 2.

52. Wang H. 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.

53. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology 2015–2020, White Paper, 2016.

54. T. Maksymyuk Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks/ T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo // 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, 2016, pp. 953-956. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452235

55. Bhushan N. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G / N. Bhushan, Li Junyi, D. Malladi et al. // IEEE Communications Magazine.– USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014 – vol. 52, no. 2 – P.82-89.

56. Insoo N. A Holistic View on Hyper-Dense Heterogeneous and Small Cell Networks / H. Insoo, S. Bongyong, S.S. Soliman // IEEE Communications MagazineUSA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013 – vol. 51 – no. 6 – P.20-27.

57. Т.А. Максимюк. Оптимізація параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі /Т.А. Максимюк, М. В. Брич, М. М. Климаш // Наукові записки УНДІЗ, Київ, 2015. – № 4 (38), С. 5-16.

58. M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739637

59. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks // T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masyuk // Proceedings of IEEE International Conference on Problems of Infocommunications, Science and

Technology (IEEE PIC S&T 2015), (Kharkiv, Ukraine, October 13-15, 2015) – pp. 69-72.

60. Maksymyuk T. Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok // Smart Computing Review, 2015. – vol. 5, №2, P. 89-101

61. X.Ge, S. Tu, G. Mao, C.Wang, T. Han, “5G Ultra-Dense Cellular Networks”, IEEE Wireless Communications, Vol. 23, No. 1, pp. 72-79, Feb. 2016

62. B. Stryhalyuk. Performance increasing method of wireless system based on determining time-frequency localization properties of OFDM signal / B.Stryhalyuk, O.Yaremko, T.Maksymyuk, O.Melnyk // ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes, Krakow, 2012. – vol. 1, №3, P. 49-54.

63. O. Yaremko. The optimal power control method in multiuser cellular networks / O. Yaremko, B. Stryhalyuk, T. Maksymyuk, O. Lavriv, D. Kozhurov // An International Quarterly Journal on Economics in Technology, New Technologies and Modelling Processes. Vol. 2, No 1. Lublin – Cracow – 2013. P. 63-67.

64. Максимюк Т.А. Моделі стохастичної геометрії для гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління/ Т.А. Максимюк, Р.А. Бурачок, І.Б. Чайковський, М.В. Брич// Комп'ютерні технології друкарства, Львів, 2015. – № 33, С. 112-119.

65. Maksymyuk T., The LTE channel transmission rate increasing // T. Maksymyuk, V. Pelishok // IEEE International Conference on “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” TCSET'2012, (Lviv, Ukraine, 21-24 February, 2012) – pp. 251-252.

66. Klymash M., Smart Backhauling Subsystem for 5G Heterogeneous Network // M. Klymash, P. Huskov, I. Kahalo T. Maksymyuk // Proceedings of the IEEE International Conference on “Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” CADSM'2015, (Polyana-Svalyava, Ukraine, 24-27 February, 2015) – pp. 481-483.

67. P. Huskov, O. Lavriv, and M. Klymash, "The concept of services assurance in heterogeneous service-oriented systems," in 2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), 2016, pp. 24–26.

68. T. Maksymyuk, M. Kyryk and M. Jo, "Comprehensive Spectrum Management for Heterogeneous Networks in LTE-U," in IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 6, pp. 8-15, December 2016. doi: 10.1109/MWC.2016.1600042WC

69. M. Jo, D. Araújo, T. Maksymyuk, A.L.F. de Almeida, T. F. Maciel, J. Mota "Massive MIMO: Survey and Future Research Topics", IET Communications, vol. 10, no.5, 2016, pp. 1938-1946.

70. T. Maksymyuk. Quasi-quadrature Modulation Method for Power Efficient Video Transmission over LTE Networks / T. Maksymyuk, L. Han, X. Ge, H. Chen, M. Jo // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014. – vol. 63, №5, P. 2083- 2092.

71. П. О. Гуськов. Метод динамічного формування структури рівня радіодоступу / Т. А. Максимюк, М. М. Климаш// Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації, Львів, 2015. – № 818, С. 220-230.

72. М.М. Климаш. Покращення параметрів радіоінтерфейсу LTE/HSOPA / М.М. Климаш, О.А. Лаврів, І.О. Кагало, Б.В. Коваль, Т.А. Максимюк // Комп'ютерні технології друкарства, Львів, 2011. – № 26. - С. 130-137

73. M. Jo. Device-to-Device (D2D) Based Heterogeneous Radio Access Network Architecture for Mobile Cloud Computing / M. Jo, T. Maksymyuk, B. Strykhalyuk, C. Cho // IEEE Wireless Communications, 2015. – vol. 12, №3.

74. Т. А. Максимюк. Моделі конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління на основі технології D2D /Т. А. Максимюк, О. М. Яремко, М. В. Піцик // Телекомунікаційні та інформаційні технології, Київ, ДУТ, 2015. – № 3, С. 91-102.

75. M. Jo. A Survey of Converging Solutions for Heterogeneous Mobile Networks/ M. Jo, T. Maksymyuk, R.L. Batista, T.F. Maciel, A.L.F. de Almeida, M. Klymash // IEEE Wireless Communications, 2014. – vol. 21, №8, P. 54-62.
76. Parkvall S. Evolution of LTE toward IMT-advanced / S. Parkvall, A. Furuskär, E. Dahlman // Communications Magazine, IEEE, 2011 – 49(2) – P. 84-91.
77. T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria, M. Jo, An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks, ACM 11th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ACM IMCOM'2017), Jan. 5-7, 2017, Beppu, Japan, #105.
78. Klymash M., Spectral Efficiency Increasing of Cognitive Radio Networks // M. Klymash, M. Jo, T. Maksymyuk, I. Beliaiev / Proceedings of IEEE International Conference on “Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” CADSM'2013 (Polyana-Svalyava, February 19-23, 2013) – pp. 169-171.
79. Maksymyuk T. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands / T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo. // Smart Computing Review, 2015. – vol. 5 - №4 - P. 346-355.
80. Максимюк Т.А. Дослідження способів підвищення швидкості передавання в нисхідному каналі мобільної мережі LTE / Т.А. Максимюк, М.О. Селюченко // Комп'ютерні технології друкарства, Львів, 2012. – № 27, С. 160-169.
81. T. Maksymyuk. Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network/ T.Maksymyuk, M.Brych, M. Klymash, M. Jo // 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), (Lviv, Ukraine, July 4-7, 2017) – Lviv Polytechnic Publishing House, 2017. – P.197-200.
82. Maksymyuk T. Game Theoretical Framework for Multi-Operator Spectrum Sharing in 5G Heterogeneous Networks/ T. Maksymyuk, M. Brych, Y. Klymash, M. Kyryk, M. Klymash // Proceedings of international conference IEEE

International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2017), (Kharkiv, October 10-13, 2017). – Kharkiv, Ukraine, 2017.

83. Максимюк Т.А. Метод адаптивного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мереж LTE // Т.А. Максимюк, С.С. Думич, М.В. Брич, О.М. Яремко // Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. - 2018. – Том 29(68). - № 2. - С. 58-63.

84. Damnjanovic A. A Survey on 3GPP Heterogeneous Networks / A. Damnjanovic, J. Montojo, Y. Wei et al. // IEEE Wireless Communications – USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011 – vol. 18 – no. 3 – P.10-21.

85. <http://jak.magey.com.ua/articles/vnutrishnosistemnij-hendover-lte-intra-system.html> 3.02%

86. André Perez. LTE and LTE Advanced: 4G Network Radio Interface. John Wiley & Sons, Inc. 2015. Print ISBN:9781848218444.

87. Stefania Sesia, Issam Toufik, Matthew Baker. LTE – The UMTS Long Term Evolution. From Theory to Practice. Second Edition. John Wiley & Sons Ltd, 2011

88. Теория передачи сигналов: Учебник для ВУЗов / Зюко А. Г., Кловский Д. Д., Назаров М. В., Финк Л. М. -М.: Связь, 1980.

89. Лаврів О.А. Методи та моделі надання послуг в гетерогенних розподілених інформаційно-телекомунікаційних системах : дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук : 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі / Орест Андрійович Лаврів; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2018. – 402 с.

90. Яремко О.М. Моделі та алгоритми управління параметрами радіоканалу в системах мобільного зв'язку з урахуванням локалізації абонентського навантаження : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі /

Орест Миколайович Яремко; Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2015. – 158 с.

91. Про Основні засади розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки //Відомості Верховної Ради України (ВВР). – 2007. – Т. 1. – №. 1. – С. 12.

92. Nakamura T. Trends in small cell enhancements in LTE advanced / T. Nakamura, S. Nagata, A. Benjebbour et al. // IEEE Communications MagazineUSA – Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013 – vol. 51 — no. 2 – P.98-105.

93. Hu R.Q. Resource Management for Heterogeneous Networks in LTE Systems: tutorial. / R.Q. Hu, Y. Qian // SpringerBriefs in Electrical and Computer Engineering – USA: Springer, 2014. – 93 p.

94. Lee I. Improved Resource Allocation Scheme in LTE Femtocell Systems based on Fractional Frequency Reuse / I. Lee, J. Hwang, S. Jang and J. Kim // KSII Trans. Internet Inform. Syst., 2012 – Vol. 6. – no. 9. – P. 2153 – 2169.

95. Guskov P. Methods and techniques of spectrum refarming for LTE network deployment/P. Guskov, R. Kozlovskiy, T. Maksymyuk, M. Klymash// IEEE Int. Conf. on Microwave and Telecommunication Technology, Ukraine, pp. 474-475, Sep. 2013.

96. Klymash M. Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning/ M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko, T. Maksymyuk// IEEE Int. Conf. on Advanced Information and Communication Technologies, Ukraine, pp. 209-212, July, 2017.

97. Yu Y. Performance analysis of soft frequency reuse for inter-cell interference coordination in LTE networks / Y. Yu, E. Dutkiewicz, X. Huang, M. Mueck, G. Fang // IEEE International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT), Tokyo, Japan, October, 2010 – P. 504-509.

98. Khan J. Cellular Handover approaches in 2.5 G to 5G Technology/ Khan J., Abbas A., Khan K.// International Journal of Computer Applications, 2011. – 21(2). – P. 28-37.

99. Osa V. Implementing opportunistic spectrum access in LTE-advanced, / V. Osa, C. Herranz, J. F. Monserrat and X. Gelabert // EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, 2012 – no.1 – pp. 1-17.
100. 3GPP TS 36.104 version 12.1.0, “EUTRA; Base Station Radio Transmission and Reception.”
101. 3GPP TR 25.813 Evolved Universal Terrestrial Radio Access and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN), Release 7, V7.1.0, 2006.
102. Cao J. Seamless Roaming over Heterogeneous Wireless Networks / J. Cao and C. Zhang // In Seamless and Secure Communications over Heterogeneous Wireless Networks, Springer New York, 2014 – pp. 27-62.
103. Fekade B. Probabilistic Recovery of Incomplete Sensed Data in IoT/ B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo//IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, 2017.
104. Maksymyuk T. Increasing of energy efficiency of a cognitive radio network/ T. Maksymyuk, M. Klymash, M. Jo// IEEE Int. Conf. on Microwave and Telecommunication Technology, Ukraine, pp. 277-278, Sep. 2013.
105. Lopez-Perez D. Mobility management challenges in 3GPP heterogeneous networks/ Lopez-Perez D., Güvenc İ., Chu X. // IEEE Communications Magazine, 2012 – 50(12), P. 70-78.
106. Guidolin F. Context-aware handover in HetNets. / Guidolin F., Pappalardo I., Zanella A., Zorzi M. // IEEE European Conference on Networks and Communications (EuCNC), June , 2014– P. 1-5.
107. X. Zhou et al., «Human mobility patterns in cellular networks», IEEE Commun. Lett., vol. 17, no. 10, pp. 1877–1880, Oct. 2013.
108. C. Song, T. Koren, P. Wang, and A. L. Barabási, «Modelling the scaling properties of human mobility», Nature Phys., vol. 6, no. 10, pp. 818–823, Sep. 2010.
109. D. J. Goodman and N. B. Mandayam, “Power control for wireless data,” IEEE Pers. Commun., vol. 7, pp. 48–54, Apr. 2000.

110. H. Ji and C.-Y. Huang, "Non-cooperative uplink power control in cellular radio systems," *Wireless Netw.*, vol. 4, pp. 233–240, Apr. 1998.
111. R. D. Yates. A framework for uplink power control in cellular radio systems. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 13(7):1341–1347, September 1995.
112. T.-H. Lee, J.-C. Lin, T.S. Yu, Downlink power control algorithms for cellular radio systems. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 44(1), 89–94 (1995).
113. O.Yaremko. Efficiency Increase of Information Services in 3G and 4G Networks, Using MIMO-Systems. *Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET): Proc. Int. Conf TCSET'2012*. - Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic, 2012. - pp. 249-250.
114. O. Kaya and S. Ulukus Power control for fading multiple access channels with user cooperation. In *Proc. IEEE International Conference on Wireless Networks, Communications, and Mobile Computing*, Maui, Hawaii, June 2005.
115. J. Litva, T. Kwok-Yeung Lo, *Digital Beamforming in Wireless Communications*, Artech House, Norwood, MA, 1996.
116. A. M. Sayeed, "Deconstructing multi-antenna fading channels," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 50, no. 10, pp. 2563–2579, Oct. 2002.
117. V. Boyun, "Directions of development of intelligent real time video systems," *2016 Int. Conf. Radio Electron. Info Commun.*, pp. 1–7, 2016.
118. Y. Hayali, M. Klymash, and O. Lavriv, "Analysis of IPTV VoD Traffic Balancing Mechanisms," in *12 International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, 2013, pp. 140–142.
119. Y. Liang, "Real-Time VBR Video Traffic Prediction for Dynamic Bandwidth Allocation," *IEEE Trans. Syst.*, vol. 34, no. 1, pp. 32–47, 2004.
120. L. Beril Toktay and R. Uzsoy, "A Capacity Allocation Problem with Integer Side Constraints", *European Journal of Operational Research*, Volume 109, Issue 1, pp. 170-182, 1998.

121. M. Klymash , O. Lavriv , B. Buhyl , Y. Danik, “Service quality oriented method of multiservice telecommunication networks design,” in Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET), 2012 International Conference on, 2012.

ДОДАТОК 1. ПРОГРАМНИЙ КОД ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ВИКЛИКІВ У МЕРЕЖІ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ

```
function Set_Parameters

    global N_of_Users V_ab_max X_min X_max Y_min Y_max R_cell N_sel_sector
    N_s_rf N_channel N_s_chmax Time_life Ruh_x Ruh_y LoadLimit S_max_Load N_BTS
    N_sector N_session delta_fi delta_fi_LB D_limit D_limit_HO D_limit_LB

    global i_load End_density S_uBusy User_Busy

    global N_of_BTS Load Loss Q_HO Arrival_density Start_density Hop_Quantity
    maxDist MIN_DIST Q_Transfers Path_use_stat

    X_min = 0; X_max = 1000;           %загальна кількість користувачів
    Y_min = 0; Y_max = 1000;           %максимальна швидкість абонента
    R_cell = 130;                       %радіус комірки, м.
    N_sel_sector = 3;                   %кількість секторів у комірці
    N_s_rf = 3;                         %кількість радіочастот у секторі
    N_channel = 8;                      %кількість елементарних каналів на одну
частоту
    N_s_chmax = N_s_rf * N_channel;     %кількість каналів на сектор
    N_of_Users = 3000;                 %загальна кількість користувачів
    V_ab_max = 33;                     %максимальна швидкість абонента
    Time_life = 2000;                  %час проведення моделювання, кількість
фіксацій місцезнаходження абонента
    Ruh_x = zeros(N_of_Users, Time_life); %масив координат X
    Ruh_y = zeros(N_of_Users, Time_life); %масив координат Y
    LoadLimit = 0.9;                  %коефіцієнт допустимого максимального
завантаження сектору (~90%)
    S_max_Load = floor(LoadLimit*N_s_chmax); %поріг завантаженості сектору
    N_BTS = 0;                        %кількість БС
    N_sector = 0;                      %кількість секторів

    N_session = 50;                   %кількість викликів для кожного абонента
```

```

i_load = 0; % завантаженість системи загалом в конкретний
момент часу
Load = zeros(1,Time_life); % сумарна завантаженість системи

User_Busy = zeros(1,N_of_Users); % масив стану абонентів (1 -
активний, 0 - пасивний)
N_of_BTS = zeros(1,N_of_Users); % номери БС обслуговування для
активних абонентів
S_uBusy = zeros(1,N_of_Users); % номери секторів обслуговування
для активних абонентів
%S_uBusy_old = zeros(1,N_of_Users); % номери попередніх секторів
обслуговування для активних абонентів
% !!!! Ch_uBusy ще не використовується
%Ch_uBusy = zeros(1,N_of_Users); % номери каналів у секторі
обслуговування для активних абонентів
% !!!! Sector_Ch_uLoad ще не використовується
%Sector_Ch_uLoad = zeros(N_sector,N_s_chmax); % номери активних
абонентів у зайнятих каналах
Loss = zeros(1,Time_life); % сумарні втрати викликів в моменти
часу

Q_NO = zeros(1,Time_life); % кількість хендоверів
Arrival_density = zeros(1,Time_life); %Інтенсивність надходження
викликів
Start_density = zeros(1,Time_life); %Інтенсивність обслуговування
викликів
End_density = zeros(1,Time_life); %Інтенсивність завершення сеансів

MIN_DIST = zeros(1,Time_life); % сума довжин шляхів трансферу в
кожному інтервалі моделювання
Q_Transfers = zeros(1,Time_life); % кількість трансферів в кожному
інтервалі моделювання
Path_use_stat = 0; % статистика кількості маршрутів за
переходами
Hop_Quantity = 0; % кількість процедур переміщення
навантаження

```



```

maxDist = 0; % максимальна кількість секторів в одному
перенесенні доступності
delta_fi = pi*8/180; % кутовий запас ширини сектору
delta_fi_LB = 0.9 * delta_fi; % кутовий запас ширини сектору для LB
D_limit_HO = R_cell * 1.4; % допустима дальність зв'язку без спроби
схендоверити ;)))
D_limit = R_cell * 1.5; % допустима дальність зв'язку ;
D_limit_LB = 1.4 * R_cell; % допустма дальність зв'язку для участі у
балансуванні навантаження
end

function End_Call(user,time)
%End_Call Summary of this function goes here
global End End_density Next_session K_session S_uBusy Sector_Load S_iload
User_Busy N_of_BTS
% Sector_Ch_uoload Ch_uBusy

End_density(time) = End_density(time) + 1; %Інтенсивність завершення
сеансів

% Sector_Ch_uoload(S_uBusy(user),Ch_uBusy(user)) = 0; % звільнення
каналу в секторі
% Ch_uBusy(user) = 0; % -----
Sector_Load(S_uBusy(user)) = Sector_Load(S_uBusy(user)) - 1; % зменшення
завантаження сектору на 1
S_iload(S_uBusy(user)) = S_iload(S_uBusy(user)) - 1;
User_Busy(user) = 0; % позначення терміналу
неактивним (перехід в режим режим очікування)
S_uBusy(user) = 0;
N_of_BTS(user) = 0;

if End(user,Next_session(user)) > time
add_Loss(user, time);
else
Next_session(user) = Next_session(user) + 1; % визначення номеру
наступного виклику

```

```

    if Next_session(user) > K_session(user)
        Next_session(user) = 0;
    end
end
end

close all force;
clc;
clear all;

global N_of_Users V_ab_max X_min X_max Y_min Y_max R_cell N_sel_sector
N_s_rf N_channel N_s_chmax ...
    Time_life Ruh_x Ruh_y LoadLimit S_max_Load N_BTS N_sector N_session
delta_fi delta_fi_LB D_limit D_limit_HO D_limit_LB ...
    i_load Start_density End_density S_uBusy User_Busy Cell_position_x
Cell_position_y ...
    N_of_BTS Load Loss Q_HO Arrival_density Sector_Load S_load S_iloat
K_session Start End End_copy Next_session Next_session_copy Hop_Quantity maxDist
MIN_DIST Q_Transfers Path_use_stat ...
    Arrival_density_noLB Start_density_noLB End_density_noLB Load_noLB
Loss_noLB Q_HO_noLB S_load_noLB End_noLB Hop_Quantity_noLB Capacity_Matrix
s_A_M...
    Arrival_density_LB_1 Start_density_LB_1 End_density_LB_1 Load_LB_1
Loss_LB_1 Q_HO_LB_1 S_load_LB_1 End_LB_1 Hop_Quantity_LB_1 % сюди будуть
збережені результати (noLB)

```

```
Function []=Main()
```

```
tic
```

```
%%
```

```
%-----вхідні параметри-----
```

```
Set_Parameters;
```

```
%%
```

```
%-----генерування викликів-----
```

```

Set_Calls_Start_End;
%%
%-----визначення радіусу-----
%find_Radius_of_cell
%%
%-----задання координат переміщення абонентів-----
Set_Users_Coordinates;
%%
%-----автозадання координат базових станцій-----
Set_BS_Coordinates;
%%
%-----system management-----
%reset_Global_Var;
Next_session_copy = Next_session;      % копія масиву номерів наступного
виклику для абонентів до початку роботи системи
End_copy = End;                        % копія масиву моментів завершення викликів

S_load = zeros(N_sector,Time_life); % кількість активних абонентів у кожному
секторі протягом моделювання
S_iloading = zeros(1,N_sector);      % кількість активних абонентів у секторі на i-
му кроці моделювання (1 крок = 1 секунда)
Sector_Load = zeros(1,N_sector);     % завантаження сектору (кількість зайнятих
каналів (елементарних частотних ресурсів) у секторі)
%Capacity_Matrix = zeros(N_sector,N_sector); % матриця пропускних
здатностей

%User_Busy_old = zeros(1,N_of_Users); % масив попереднього стану
абонентів (1 - активний, 0 - пасивний)
tsum = 0;
tsum1 = 0;
laps = 100;                          % кількість циклів між інтервалами виводу в
КОНСОЛЬ
%% without balancing
for i_time = 1:Time_life
    tStart = tic; % TIC, pair 2
    %-----

```

```

check_End_Calls(i_time);          % перевірка завершення викликів
%-----
activ_Call_Management(i_time);    % перевірка активних сеансів на
потребу у хендовері
Dead_calls2 = find(User_Busy==2); % номери абонентів, сеанси яких зараз
обірвуться
N_dead2 = length(Dead_calls2);    % кількість таких абонентів
for user = 1:N_dead2
    End_Call(Dead_calls2(user),i_time);
end
%-----
find_Calls(i_time);              % пошук нових викликів

Dead_calls3 = find(User_Busy==3); % номери абонентів, сеанси яких зараз
закінчаняться не розпочавшись))
N_dead3 = length(Dead_calls3);    % кількість таких абонентів
for user = 1:N_dead3
    add_Loss(Dead_calls3(user),i_time);
end

%% LOAD BALANCING
% check_Max_Load( i_time );

%% system stability check!)
active_users = find(User_Busy == 1);
active_users_amount = length(active_users);

for sector = 1:N_sector
    S_load(sector,i_time) = S_iloading(sector);
end

Load(i_time) = sum(Sector_Load); % сумарна завантаженість системи

if Load(i_time)~= active_users_amount
    fprintf('на %d-й секунді завантаження системи не відповідає кількості
активних абонентів (noLB)',i_time);

```

```

end
tElapsed = toc(tStart); % TOC, pair 2
tsum = tsum + tElapsed;
if 0==mod(i_time,laps)
    tsum1 = tsum - tsum1;
    fprintf('noLB lap #%.f of %.f, %.f laps in %.3f
seconds\n',i_time,Time_life,laps,tsum1);
    tsum1=tsum;
end
%S_uBusy_old = S_uBusy;
end

f_Loss_noLB=figure('Name','Втрати комунікаційних сеансів без
балансування','NumberTitle','off'); plot(Loss); xlabel('Час моделювання, с');
ylabel('Кількість сеансів');

%% with balancing

save_Results; % копіює результати, щоб повторно використати
глобальні змінні без втрати отриманих даних
reset_Global_Var; % переводить до початкового стану глобальні змінні
tsum = 0;
tsum1 = 0;
for i_time = 1:Time_life
    tStart = tic; % TIC, pair 2
    %-----
    check_End_Calls(i_time); % перевірка завершення викликів
    %-----
    activ_Call_Management(i_time); % перевірка активних сеансів на
потребу у хендовері
    %-----
    find_Calls(i_time); % пошук нових викликів

%% LOAD BALANCING
check_Max_Load( i_time );

```

```

%% Check one more time

Dead_calls2 = find(User_Busy==2); % номери абонентів, сеанси яких зараз
обірвуться
N_dead2 = length(Dead_calls2); % кількість таких абонентів
for user = 1:N_dead2
    temp = check_one_more_time(Dead_calls2(user),i_time);
    if temp == -1
        End_Call(Dead_calls2(user),i_time);
    end
end

Dead_calls3 = find(User_Busy==3); % номери абонентів, сеанси яких зараз
закінчанчатся не розпочавшись))
N_dead3 = length(Dead_calls3); % кількість таких абонентів
for user = 1:N_dead3
    temp = try_to_start_one_more_time(Dead_calls3(user),i_time);
    if temp < 0
        add_Loss(Dead_calls3(user),i_time);
    end
end

%% system stability check!
active_users = find(User_Busy == 1);
active_users_amount = length(active_users);
for sector = 1:N_sector
    S_load(sector,i_time) = S_iloading(sector);
end

Load(i_time) = sum(Sector_Load); % сумарна завантаженість системи

if Load(i_time)~= active_users_amount
    fprintf('на %d-й секунді завантаження системи не відповідає кількості
активних абонентів (withLB)',i_time);
end

tElapsed = toc(tStart); % TOC, pair 2

```

```

tsum = tsum + tElapsed;
if 0==mod(i_time,laps)
    tsum1 = tsum - tsum1;
    fprintf('withLB lap #%.f of %.f, %.f laps in %.3f
seconds\n',i_time,Time_life,laps,tsum1);
    tsum1 = tsum;
end
%S_uBusy_old = S_uBusy;
end
%% displaying rezults
f_Loss1=figure('Name','Втрати комунікаційних сеансів з
балансуванням','NumberTitle','off'); plot(Loss); xlabel('Час моделювання, с');
ylabel('Кількість сеансів');
f_Loss_diff=figure('Name','Різниця втрат комунікаційних сеансів (без -
з)','NumberTitle','off'); plot(Loss_noLB - Loss); xlabel('Час моделювання, с');
ylabel('Кількість сеансів');

Efficiency_LB1 = (sum(Loss_noLB) - sum(Loss))/sum(Loss_noLB)*100; %
покращення за рахунок використання алгоритму
fprintf('%.1f%% відсотків - ефективність з одним LB\n',Efficiency_LB1);
Sum_Loss_noLB = zeros(1,Time_life); % сума втрат викликів за час
Sum_Loss = zeros(1,Time_life); % сума втрат викликів за час
Sum_Loss_noLB(1) = Loss_noLB(1); % сума втрат викликів за час
Sum_Loss(1) = Loss(1); % сума втрат викликів за час
for i=2:Time_life
    Sum_Loss_noLB(i) = Sum_Loss_noLB(i-1) + Loss_noLB(i);
    Sum_Loss(i) = Sum_Loss(i-1) + Loss(i);
end

f_total_Loss_diff=figure('Name','Різниця сумарних втрат комунікаційних сеансів
(без - з) за попередній час','NumberTitle','off'); plot(Sum_Loss_noLB - Sum_Loss,'k');
xlabel('Час моделювання, с'); ylabel('Кількість сеансів');

f_total_Loss=figure('Name','Сумарних втрати комунікаційних сеансів без та з
балансуванням','NumberTitle','off');

```

```

p_total_Loss = plot(1:Time_life,Sum_Loss_noLB,'k-
o',1:Time_life,Sum_Loss,'k','MarkerIndices',1:200:length(Load_noLB));
xlabel('Modelling time, seconds','FontSize',15); ylabel('Number of
sessions','FontSize',15);
p_total_Loss(1).LineWidth = 1.5; p_total_Loss(2).LineWidth = 1.5;
lgd_Loss = legend('Normal mode','with LB','Location','northwest');
%title(lgd_Loss,'My Legend Title')
lgd_Loss.FontSize = 13;
lgd_Loss.TextColor = 'black';

```

```

f_total_Load=figure('Name','Завантаження системи протягом
модельювання','NumberTitle','off');
p_total_Load=plot(1:Time_life,Load_noLB,'k--
o',1:Time_life,Load,'k','MarkerIndices',1:100:length(Load_noLB));
xlabel('Modelling time, seconds','FontSize',15); ylabel('Number of
sessions','FontSize',15);
p_total_Load(1).LineWidth = 1.1; p_total_Load(2).LineWidth = 1.5;
lgd_TLoad = legend('Normal mode','with LB','Location','southeast');
%title(lgd_TLoad,'My Legend Title')
lgd_TLoad.FontSize = 13;
lgd_TLoad.TextColor = 'black';

```

```

f_total_HO=figure('Name','Кількість хендверів протягом
модельювання','NumberTitle','off');
p_total_HO=plot(1:Time_life,Q_HO_noLB,'k--
o',1:Time_life,Q_HO,'k','MarkerIndices',1:100:length(Load_noLB));
xlabel('Modelling time, seconds','FontSize',15); ylabel('Number of
handovers','FontSize',15);
p_total_HO(1).LineWidth = 1.1; p_total_HO(2).LineWidth = 1.5;
lgd_THO = legend('Normal mode','with LB','Location','northeast');
%title(lgd_TLoad,'My Legend Title')
lgd_THO.FontSize = 13;
lgd_THO.TextColor = 'black';

```

```

Qm_HO_noLB = zeros(1,Time_life); %Середнє миттєве значення кількості
хендверів

```



```

    Qm_HO_LB = zeros(1,Time_life);      %Середнє миттєве значення кількості
хендоверів
    for i=1:Time_life
        Qm_HO_noLB(i) = mean(Q_HO_noLB(1:i));
        Qm_HO_LB(i) = mean(Q_HO(1:i));
    end

    f_mean_HO=figure('Name','Середнє миттєве значення кількості
хендоверів','NumberTitle','off');
    p_mean_HO=plot(1:Time_life,Qm_HO_noLB,'k--
o',1:Time_life,Qm_HO_LB,'k','MarkerIndices',1:100:length(Load_noLB));
    xlabel('Modelling time, seconds','FontSize',15);    ylabel('Number of
handovers','FontSize',15);
    p_mean_HO(1).LineWidth = 1.1; p_mean_HO(2).LineWidth = 1.5;
    lgd_mHO = legend('Normal mode','with LB','Location','northwest');
    %title(lgd_TLoad,'My Legend Title')
    lgd_mHO.FontSize = 13;
    lgd_mHO.TextColor = 'black';

    %побудова графа
    Sector_X = zeros(1,N_sector);    % умовні координати вузлів/секторів
    Sector_Y = zeros(1,N_sector);    % умовні координати вузлів/секторів
    for i=1:N_BTS
        k = (i-1)*3;
        Sector_X(k+1) = round(Cell_position_x(i) + 0.5 * R_cell);
        Sector_Y(k+1) = round(Cell_position_y(i));
        Sector_X(k+2) = round(Cell_position_x(i) + 0.5 * R_cell * cos(0.75*pi));
        Sector_Y(k+2) = round(Cell_position_y(i) + 0.5 * R_cell * sin(0.75*pi));
        Sector_X(k+3) = round(Cell_position_x(i) + 0.5 * R_cell * cos(-0.75*pi));
        Sector_Y(k+3) = round(Cell_position_y(i) + 0.5 * R_cell * sin(-0.75*pi));
    end
    G=digraph(s_A_M);
    f_G = figure('Name','Граф системи на останній секунді модельного
часу','NumberTitle','off');

```

```

p_G =
plot(G,'XData',Sector_X,'YData',Sector_Y,'EdgeColor','k','NodeColor','k','MarkerSize',5,'LineWidth',1);
daspect([1 1 1]);

Qm_HOP = zeros(1,Time_life); %Середнє миттєве значення кількості
переходів в процесі балансування
Qm_TR = zeros(1,Time_life); %Середнє миттєве значення кількості
хендоверів
for i=1:Time_life
    Qm_HOP(i) = mean(MIN_DIST(1:i));
    Qm_TR(i) = mean(Q_Transfers(1:i));
end

f_mean_HOP=figure('Name','Середнє миттєве значення кількості переходів для
перенесення доступності на один сеанс','NumberTitle','off');
p_mean_HOP=plot(1:Time_life,Qm_HOP,'k-
o',1:Time_life,Qm_TR,'k','MarkerIndices',1:100:length(Load_noLB));
xlabel('Modelling time, seconds','FontSize',13); ylabel('Number of handovers and
transferrings','FontSize',13);
p_mean_HOP(1).LineWidth = 1.1; p_mean_HOP(2).LineWidth = 1.5;
lgd_mHOP = legend('handovers','transferrings','Location','southeast');
%title(lgd_TLoad,'My Legend Title')
lgd_mHOP.FontSize = 11;
lgd_mHOP.TextColor = 'black';

BOO = figure('Name','Залежність середнього миттєвого значення кількості
переходів для перенесення доступності від кількості активних
сеансів','NumberTitle','off');
plot(Qm_HOP(1:Time_life-1),Load(1:Time_life-1));
xlabel('Number of handovers and transferrings','FontSize',13); ylabel('Number of
sessions','FontSize',13);

toc

function d = distanceToShannonEdge(a,b)

```

```

% distanceToShennonEdge returns the closest point to point (a,b) on the Shennon
edge
% Detailed explanation goes here
syms f(x)
f(x) = (x-b*2^x + b) * (2*x - 1 - x*2^x*log(2)) - (2^x - 1)^3 * (a - x);
sol = vpasolve(f,x,'random',true);
while(sol<a || sol>1)
    sol = vpasolve(f,x,'random',true);
end
x1 = sol; y1 = x1/(2^x1 - 1);    % [x1,y1] is the closest point to [a,b]
d = sqrt((x1-a)^2 + (y1 - b)^2); % distance to Shennon edge from [a,b]
end

function Set_Users_Coordinates
global N_of_Users V_ab_max X_min X_max Y_min Y_max Time_life Ruh_x
Ruh_y R_cell
k = 0;
n = 3;
%-----задання координат руху абонентів-----
for i_user = 1:N_of_Users

    X_Min = X_min + k*R_cell;
    X_Max = X_max - k*R_cell;
    Y_Min = Y_min + k*R_cell;
    Y_Max = Y_max - k*R_cell;

    if mod(i_user,n) == 2                % обмеження території переміщення для
кожного n-го абонентів
        X_Min = X_min + (X_max - X_min)/(2.1+10*rand);
        X_Max = X_max - (X_max - X_min)/(2.1+10*rand);
        Y_Min = Y_min + (Y_max - Y_min)/(2.1+10*rand);
        Y_Max = Y_max - (Y_max - Y_min)/(2.1+10*rand);
    end

    delta_fi = 2 * pi * (1 - 2 * rand); %діапазон зміни кута
переміщення

```

```

fi_add = pi * (1 - 2 * rand); %початкова фаза
V_ab = V_ab_max * rand * rand * rand * rand * rand;
fi_V = (1 - V_ab / V_ab_max)^2;
if rand < 0.5
    znak_add = -1;
else
    znak_add = 1;
end
Ruh_x(i_user,1) = X_Min + rand * (X_Max - X_Min);
%генерування початкових координатів абонентів
Ruh_y(i_user,1) = Y_Min + rand * (Y_Max - Y_Min);
for i_time = 2:Time_life
    r = V_ab * (0.9 + 0.2 * rand);
    fi = delta_fi * (1 + fi_V * (0.5 - rand)) + fi_add;
    x_add = r * cos(fi) * znak_add;
    y_add = r * sin(fi) * znak_add;

    if (Ruh_x(i_user, i_time-1) + x_add) > X_Max % умови
        znak_add = -znak_add; % невиходу
    end % за межі
    if (Ruh_x(i_user, i_time-1) + x_add) < X_Min % території
        znak_add = -znak_add; %
    end %
    if (Ruh_y(i_user, i_time-1) + y_add) > Y_Max %
        znak_add = -znak_add; %
    end %
    if (Ruh_y(i_user, i_time-1) + y_add) < Y_Min %
        znak_add = -znak_add; %
    end %
    Ruh_x(i_user, i_time) = Ruh_x(i_user, i_time-1) + r * cos(fi) * znak_add;
    Ruh_y(i_user, i_time) = Ruh_y(i_user, i_time-1) + r * sin(fi) * znak_add;
end
end

Ruh_x(Ruh_x < 0)=0;
Ruh_y(Ruh_y < 0)=0;

```

```

end

function activ_Call_Management(time)

global N_of_BTS User_Busy Next_session D_limit

Active_User = find(User_Busy == 1);      %номери активних абонентів
N_UBo = length(Active_User);           %кількість активних абонентів

for i = 1:N_UBo
    if Next_session(Active_User(i)) > 0 % додаткова страхівка
        D = dist_BS(Active_User(i),time,N_of_BTS(Active_User(i))); %відстань від
usera до BS

        if (D < D_limit)
            % перевірка виходу за межі сектору

            sector = check_Sector(Active_User(i),time);

            %якщо ж у комірці дл яабонента не залишилося місця, то...

            if sector == -1

                sector = find_BS(Active_User(i),time); %пошук нової БС

                if sector == -2 %
                    End_Call(Active_User(i),time); %функція завершення
сеансу
                end
            end
        else
            % вихід за межі дальності зв'язку комірки (за пивом)
            sector = find_BS(Active_User(i),time); % пошук хача б якоїсь БС та
секору з вільним каналом
            if sector == -2

```

```

        End_Call(Active_User(i),time);           % функція завершення
сеансу
    end
end
if sector == -1
    User_Busy(Active_User(i)) = 2;             % перевід в режим
очікування/паузи обслуговування
end
end
end
end

function hop_Users(dist, path, capacity, time)
%hop_Users пошук користувачів для LB і НО
% hop_Users(dist, path, capacity, time)
global Hop_Quantity MIN_DIST Q_Transfers Path_use_stat maxDist
Hop_Quantity = Hop_Quantity + 1;
MIN_DIST(time) = MIN_DIST(time) + dist;      % кількість здійснених переходів
Q_Transfers(time) = Q_Transfers(time) + 1;    % кількість використаних
маршрутів
Path_use_stat(dist) = Path_use_stat(dist) + 1; % статистика кількості маршрутів
за переходами

if dist > maxDist
    maxDist = dist;
end

for i = 1:dist
    for k = 1:capacity
        user = find_LB_USER(path(dist-i+1),path(dist-i+2),time); % пошук
користувача для LB
        change_Capacity_Matrix(user,time,-1); % забираємо борги
        HandOver(user,time,path(dist-i+2));
        change_Capacity_Matrix(user,time,1); % забираємо борги
    end
end

```

```

end
end

function sector = find_BS(user,time)    %пошук ближніж БС

global D_limit N_BTS

sector = -1;                          % відсутність доступних секторів
D_user_BTS = zeros(1,N_BTS);          % масив відстаней абонента до БС

for i = 1:N_BTS                        %визначення відстаней до усіх БС
    D_user_BTS(i) = dist_BS(user,time,i);
end
set_of_BTS = find(D_user_BTS < D_limit);    % номери досяжних БС, до
яких відстань менша за D
len = length(set_of_BTS);              % кількість досяжних БС
if len == 0                            % відсутність доступної БС

% End_Call(user,time);                %функція завершення сеансу
sector = -2;

elseif len == 1
    sector = find_sector(user,time, set_of_BTS(1)); % визначення секору
    if sector > 0
        HandOver(user,time,sector); %хендовер;)
    end

elseif len > 1
    for k = 1:(len-1)                  % сортування номерів досяжних БС від найближчих
до найвіддаленіших
        if sector == -1
            for i = 1:(len-k)
                if D_user_BTS(set_of_BTS(len-i)) < D_user_BTS(set_of_BTS(len-i+1))
                    swap_1 = set_of_BTS(len-i);

```

```

        set_of_BTS(len-i) = set_of_BTS(len-i+1);
        set_of_BTS(len-i+1) = swap_1;
    end
end
sector = find_sector(user, time, set_of_BTS(k));    % пошук доступного
сектору
    if sector > 0
        HandOver(user,time,sector); % хендовер;)
    end
end
end
end
end

function sector = check_Sector(user,time) % перевірка виходу за межі сектору

global S_uBusy N_of_BTS delta_fi Sector_Load N_s_chmax

BS = N_of_BTS(user);
sector = -1;
delta_fi_HO = delta_fi;

fi = find_Phase(user,time,BS);

if (fi < ( delta_fi_HO - pi/3)) || (fi > (pi - delta_fi_HO))
    s = 3 * BS;          % 3-й сектор
    if s == S_uBusy(user)
        sector = s;
    end
end

if (fi > (pi/3 - delta_fi_HO)) || (fi < (delta_fi_HO - pi))
    s = 3 * BS - 1;      % 2-й сектор
    if s == S_uBusy(user)
        sector = s;
    end
end

```



```

    end
end

if abs(fi) < (pi/3 + delta_fi_HO)
    s = 3 * BS - 2;          % 1-й сектор
    if s == S_uBusy(user)
        sector = s;
    end
end

if sector == -1
    if fi <= -pi/3
        s = 3 * BS;          % 3-й сектор
    elseif fi >= pi/3
        s = 3 * BS - 1;      % 2-й сектор
    else
        s = 3 * BS - 2;      % 1-й сектор
    end

    if Sector_Load(s) < N_s_chmax
        sector = s;
        HandOver(user,time,sector);
    end
end
end

function sector = check_one_more_time( user, time )
%check_second_time повторний пошук нового пристанища
global N_of_BTS D_limit

if dist_BS(user,time,N_of_BTS(user)) < D_limit          % якщо в межах зони
обслуговування комірки
    % перевірка виходу за межі сектору
    sector = check_Sector(user,time);
else
    % вихід за межі зони досяжності комірки

```

```

    sector = find_BS(user,time);    %пошук нової БС
end
end

function targetSector = find_sector(user, time, BS)    % пошук доступного
сектору

global Sector_Load N_s_chmax delta_fi

yes = 0;    % індикатор наявності хоча б одного вільного
каналу
targetSector = -1;
a = [10 10 10];
fi = find_Phase(user, time, BS);
s = [3 * BS - 2 3 * BS - 1 3 * BS];    % номери секторів комірки BS

if (fi < ( delta_fi - pi/3)) || (fi > (pi - delta_fi))
    s(3) = 3 * BS;    % 3-й сектор
    if Sector_Load(s) < N_s_chmax
        yes = yes + 1;
        if fi < 0
            a(3) = abs(2/3*pi + fi);    %відхилення від центру сектору
        else
            a(3) = pi/3 + (pi - fi);
        end
    end
end

if (fi > (pi/3 - delta_fi)) || (fi < (delta_fi - pi))
    s(2) = 3 * BS - 1;    % 2-й сектор
    if Sector_Load(s) < N_s_chmax
        yes = yes + 1;
        if fi > 0
            a(2) = abs(2/3*pi - fi);    %відхилення від центру сектору
        else
            a(2) = pi/3 + (pi + fi);
        end
    end
end
end

```

```

        end
    end
end
if abs(fi) < (pi/3 + delta_fi)
    s(1) = 3 * BS - 2;    % 1-й сектор
    if Sector_Load(s) < N_s_chmax
        yes = yes + 1;
        a(1) = abs(fi);    %відхилення від центру сектору
    end
end

% вибір сектору за найменшим відхиленням від його центру
if yes > 0
    targetSector = s(find(a==min(a)));
end
end

function HandOver(user,time,sector)    % хендовер

global S_uBusy Sector_Load S_iloat N_of_BTS Q_HO User_Busy
Q_HO(time) = Q_HO(time) + 1;    % підраховує кількість хендоверів

% Sector_Ch_uloat(S_uBusy(i_user),Ch_uBusy(i_user)) = 0;    % звільнення
каналу в секторі
% Ch_uBusy(i_user) = 0;    % -----
% Sector_Load(S_uBusy(i_user)) = Sector_Load(S_uBusy(i_user)) - 1;    %
зменшення завантаження сектору на 1

Sector_Load(S_uBusy(user)) = Sector_Load(S_uBusy(user)) - 1;    % зменшення
завантаження сектору на 1
S_iloat(S_uBusy(user)) = S_iloat(S_uBusy(user)) - 1;

% зміна сектору і БС

BS = ceil(sector/3);

```

```

N_of_BTS(user) = BS;           % номер БС для i_user
S_uBusy(user) = sector;       % номер сектору для i_user
Sector_Load(sector) = Sector_Load(sector) + 1; % зменшення завантаження
сектору на 1
S_iloading(sector) = S_iloading(sector) + 1;
User_Busy(user) = 1;

End

```

```

function LB_user = find_LB_USER(FROM,TO,time) % пошук користувача для
HO FROM -> TO

```

```

%find_LB_USER(FROM,TO); % пошук користувача для LB
% FROM - sector number, user will be handovered from this sector to
% sector TO
global S_uBusy

```

```

Sheeps = find (S_uBusy == FROM); % номери активних абонентів у секторі
FROM

```

```

len = length(Sheeps);

```

```

f_BS = ceil(FROM/3);

```

```

t_BS = ceil(TO/3);

```

```

if f_BS ~= t_BS

```

```

    u_to_BS_dist = zeros(1,len);

```

```

    for i = 1:len

```

```

        u_to_BS_dist(i) = dist_BS(Sheeps(i),time,t_BS);

```

```

    end

```

```

    temp = find(u_to_BS_dist == min(u_to_BS_dist));

```

```

    LB_user = Sheeps(temp(1));

```

```

else

```

```

    u_to_BS_phase = zeros(1,len);

```

```

    for i = 1:len

```

```

        u_to_BS_phase(i) = find_Phase(Sheeps(i),time,t_BS);

```

```

    end

```

```

    from = FROM - 3*(f_BS-1);    % номер сектору в межах комірки (від 1 до 3)
    to = TO - 3*(t_BS-1);        % номер сектору в межах комірки (від 1 до 3)
    sheep = best_Pase_User(u_to_BS_phase,from,to);
    LB_user = Sheeps(sheep);
end
end

```

```

function reset_Global_Var

```

```

%reset_Global_Var переводить до початкового стану глобальні змінні

```

```

global i_load Start_density End_density S_uBusy User_Busy N_of_BTS ...
    Load Loss Q_HO Arrival_density Sector_Load S_load S_iloading ...
    End End_copy Next_session Next_session_copy Hop_Quantity MIN_DIST ...
    Q_Transfers Path_use_stat maxDist Time_life N_sector

```

```

i_load = i_load * 0;
Start_density = Start_density * 0;
End_density = End_density * 0;
S_uBusy = S_uBusy * 0;
User_Busy = User_Busy * 0;
N_of_BTS = N_of_BTS * 0;
Load = Load * 0;
Loss = Loss * 0;
Q_HO = Q_HO * 0;
Arrival_density = Arrival_density * 0;
Sector_Load = Sector_Load * 0;
S_load = S_load * 0;
S_iloading = S_iloading * 0;
End = End_copy;
Next_session = Next_session_copy;
Hop_Quantity = Hop_Quantity * 0;

```

```

    MIN_DIST = zeros(1,Time_life);    % сума довжин шляхів трансферу в
кожному інтервалі моделювання

```

```

    Q_Transfers = zeros(1,Time_life);           % кількість трансферів в кожному
інтервалі моделювання
    Path_use_stat = zeros(1,N_sector);         % статистика кількості
маршрутів за переходами
    maxDist = 0;                               % максимальна кількість секторів в одному
перенесенні доступності

```

```

end

```

```

function check_Max_Load( time )

```

```

%check_Max_Load Summary of this function goes here

```

```

global N_of_Users S_max_Load N_sector

```

```

global User_Busy S_iloal Capacity_Matrix s_A_M

```

```

% -----балансування навантаження-----

```

```

Capacity_Matrix = zeros(N_sector,N_sector);

```

```

Loaded_Sectors = find(S_iloal > S_max_Load);

```

```

Length_Loaded = length(Loaded_Sectors);

```

```

if (Length_Loaded > 0) && (Length_Loaded < N_sector)

```

```

    for user = 1:N_of_Users                       % розрахунок матриці пропускних
здатностей

```

```

        if (User_Busy(user) == 1) %|| (User_Busy(user) == 2)

```

```

            change_Capacity_Matrix(user, time, 1); % заповнення/зміна матриці
пропускних здатностей

```

```

        end

```

```

    end

```

```

    %% балансування навантаження ;)

```

```

    for L_sector = 1:Length_Loaded                %

```

```

%% перебір кожного сектору, що завантажений вище порогу

n_S_max = Loaded_Sectors(L_sector);
delta_load = S_iloading(n_S_max) - (S_max_Load - 1);
min_distance = 1900;          % страхівка
for res = 1:delta_load
    %% спроби перекинути один ресурс за ітерацію;)
    if min_distance < 2000
        Adjacency_Matrix = Capacity_Matrix & 1;          % формування
матриці суміжності ;)

        for i_node = 1:N_sector                          % обнулення головної
діагоналі, про всяк випадок
            Adjacency_Matrix(i_node,i_node) = 0;
        end

        min_load = find(S_iloading < S_max_Load);        %номери секторів, які
МОЖУТЬ ПРИЙНЯТИ ВИГНАНЦІВ
        length_m_l = length(min_load);

        min_distance = 2000;          % страхівка
        s_A_M = sparse(Adjacency_Matrix);
        Dist = graphallshortestpaths(s_A_M);              % матриця
найкоротших шляхів
        for i_sml=1:length_m_l          % пошук найближчого
сектору (T_sector) з завантаженням S_iloading<=(S_max_Load-delta_load)
            if min_distance > Dist(n_S_max,min_load(i_sml))
                min_distance = Dist(n_S_max,min_load(i_sml));
                T_sector = min_load(i_sml);
            end
        end
    end

    if (min_distance < 2000) && (min_distance > 0)
        [min_dist,path,~] = graphshortestpath(s_A_M,n_S_max,T_sector);
    end
end

```

```

sh_p_capacity = 1; % величина ресурсу, що переноситься за одну
ітерацію

hop_Users(min_dist, path, sh_p_capacity, time); % пошук
користувача для LB і зразу НО
end
end
end
end

end
% і завершилась вся суть балансування

end

```

```

function Set_Calls_Start_End
global N_of_Users Time_life K_session Start End Next_session lambda T

%-----генерування викликів-----

N_session = 50; % Кількість викликів для кожного
абонента
lambda = 100; % Середнє значення інтервалу між
викликами, с
T = 110; % Середнє значення тривалості викликів, с
Start = zeros(N_of_Users,N_session) - 1; % Монументи надходження
викликів, с
End = zeros(N_of_Users,N_session) - 1; % Монументи закінчення
викликів, с
Interval = round(exprnd(lambda,N_of_Users,N_session)); % Інтервали між
викликами - по експоненційному закону
Interval = Interval +1;
Length = poissrnd(T,N_of_Users,N_session)+1; % Тривалості викликів -
по закону Пуассона

```



```

K_session = zeros(1,N_of_Users) - 1;           % кількість викликів для абонента
протягом моделювання

Average_User_load_planned = T*(3600/(T+lambda))/3600;
fprintf('Average_User_load_planned = %f\n',Average_User_load_planned);

%формування масивів монументів надходження та закінчення викликів
for user = 1:N_of_Users
    %Ivkl(i_user,1) = Ivkl(i_user,1) + round(rand * 900);           % розподілення
початку перших викликів проягом кількох перших хвилин
    if Interval(user,1) < Time_life
        Start(user,1) = Interval(user,1);
        End(user,1) = Start(user,1) + Length(user,1);
        if End(user,1) >= Time_life
            End(user,1) = Time_life;

        else

            for i_vkl = 2:N_session
                if (End(user,i_vkl-1) + Interval(user,i_vkl)) < Time_life

                    Start(user,i_vkl) = End(user,i_vkl-1) + Interval(user,i_vkl);           %
Монументи надходження викликів
                    End(user,i_vkl) = Start(user,i_vkl) + Length(user,i_vkl);           %
Монументи закінчення викликів
                    if End(user,i_vkl) > Time_life
                        End(user,i_vkl) = Time_life;
                        break;
                    end
                end
            end
        end
    end
end
end
end
end

for user = 1:N_of_Users

```

```

for i_vkl = 1:N_session
    if Start(user,i_vkl) == -1
        K_session(user) = i_vkl - 1;
        break
    end
end
if Start(user,N_session) ~= -1
    K_session(user) = N_session;
end

end

Next_session = zeros(1,N_of_Users)+1;           % номери наступного або
незавершеного виклику (+1 -- задання номеру першого викику для всіх абонентів)
Next_session(Next_session>K_session)=0;         % виявлення абонентів без
сеансів зв'язку протягом усього моделювання

Talk_time = 0; %сумарна тривалість планованих викликів
for user = 1:N_of_Users
    for session = 1:K_session(user)
        Talk_time = Talk_time + (End(user,session)-Start(user,session));
    end
end

fprintf('Talk_time = %f\n',Talk_time);
Average_User_load = Talk_time / Time_life /N_of_Users;
fprintf('Everage_User_load = %f\n',Average_User_load);

end

function find_Radius_of_cell
%finds cell radius based on user activity
global Time_life N_of_Users X_min X_max Y_min Y_max R_cell N_s_rf
N_sel_sector N_channel K_session Start End D_limit D_limit_LB lambda T

Talk_time = 0; %сумарна тривалість планованих викликів

```

```

for user = 1:N_of_Users
    for session = 1:K_session(user)
        Talk_time = Talk_time + (End(user,session)-Start(user,session));
    end
end
AY = Talk_time / Time_life; %сумарне абонентське навантаження
fprintf('AY = %f\n',AY);

fprintf('Talk_time = %f\n',Talk_time);

Average_User_load = Talk_time / Time_life /N_of_Users;
fprintf('Average_User_load = %f\n',Average_User_load);
%AY = Average_User_load * N_of_Users;
S = (X_max - X_min)* (Y_max - Y_min); %Площа території кв.м.
pr = 0.08; %Допустимі втрати
%-----
ay = Average_User_load;
C = N_channel * N_s_rf * N_sel_sector; %кількість каналів в комірці
%---обчислення кількості користувачів в комірці-----
Y = ay;
delta = 0;
E = 0;
while pr > E
    Y = Y + ay;
    delta = delta + 1;
    drib = 1;
    Suma = 0;
    for i_kanal = 1:C
        drib = drib * (Y/i_kanal);
        Suma = Suma + drib;
    end
    E = drib / Suma;
end
%-----
Wk = delta; %кількість абонентів в комірці
Kk = ceil(N_of_Users/Wk); %кількість комірок

```

```

fprintf('кількість комірок = %f\n',Kk);
Nk = ceil(N_of_Users / Kk);
Y = Nk * ay;
drib = 1;
Suma = 0;
    for i_kanal = 1:C
        drib = drib * (Y/i_kanal);
        Suma = Suma + drib;
    end
E = drib / Suma;
fprintf('Pb = %f',E);
Sk = S/Kk;    % площа комірки
R_cell = floor(sqrt(2/(3*sqrt(3))*Sk) * 1.20);    %радіус комірки
D_limit = R_cell * 1.4;    % допустима дальність зв'язку ;)
D_limit_LB = 1.38 * R_cell;    % допустма дальність зв'язку для участі у
балансуванні навантаження

```

End

```

function Talk_time_rezult
%Talk_time_rezult shows total Talk_time of sessions

global N_of_Users K_session Talk_time_planned Talk_time_noLB Talk_time_LB...
    End_copy End_noLB End Start Time_life
Talk_time_planned = 0; %сумарна тривалість планованих викликів
Talk_time_noLB = 0;
Talk_time_LB = 0;
for user = 1:N_of_Users
    for session = 1:K_session(user)
        Talk_time_planned = Talk_time_planned + (End_copy(user,session)-
Start(user,session));
        Talk_time_noLB = Talk_time_noLB + (End_noLB(user,session)-
Start(user,session));
        Talk_time_LB = Talk_time_LB + (End(user,session)-Start(user,session));
    end
end

```

end

Talk_time_planned

Talk_time_noLB

Talk_time_LB

Talk_time_LB/Talk_time_planned

Talk_time_noLB/Talk_time_planned

Talk_time_LB/Talk_time_noLB

Everage_User_load = Talk_time_LB / Time_life /N_of_Users;

Everage_User_load

end

function Set_BS_Coordinates

global X_max Y_max R_cell N_sel_sector N_BTS N_sector Cell_position_x
Cell_position_y

%-----автозадания координат базових станцій-----

n_x = 2 * floor(X_max / (3 * R_cell));

z = X_max / (3 * R_cell) - n_x/2;

if z > 5/6

 n_x = n_x + 2;

 X0 = round(R_cell * (1 - 1.5 * (7/6 - z)));

elseif z > 1/3

 n_x = n_x + 1;

 X0 = round(R_cell * 1.5 * z);

elseif z > 1/6

 X0 = round(R_cell * (1 + 1.5 * (z - 1/6)));

else

 X0 = round(R_cell * (1 - 1.5 * (1/6 - z)));

end

if n_x == 0

 if z <= 1/3

 X0 = round(1.5 * R_cell * z);

```

    n_x = 1;
end
end

n_y = ceil(Y_max / (sqrt(3) * R_cell));
z = n_y - Y_max / (sqrt(3) * R_cell);

Y0 = (1-z) * sqrt(3) * R_cell / 2;

N_BTS = n_x*n_y - ceil(n_x/2);           %кількість БС
Cell_position_x = zeros(1,N_BTS);       %масив абсцис базових станцій
Cell_position_y = zeros(1,N_BTS);       %масив ординат базових станцій
Cell_number = zeros(n_y,n_x);          %масив номерів базових станцій
Cell_index = 0;
x_add = 1.5 * R_cell;
y_add = sqrt(3) * R_cell;
for i = 1:n_x
    if mod(i,2)==0
        R_y = 0 + Y0;
        j0 = 1;
    else
        R_y = y_add/2 + Y0;
        j0 = 2;
    end
    for j = j0:n_y
        Cell_index = Cell_index + 1;
        Cell_number(j-j0+1,i) = Cell_index;
        Cell_position_x(Cell_index) = X0;
        Cell_position_y(Cell_index) = round(R_y + y_add * (j - j0));
    end
    X0 = round(X0 + x_add);
end

N_BTS = Cell_index;
N_sector = N_BTS * N_sel_sector;        % кількість секторів

```

```

    %f_Cell_position      =      figure('Name','Розміщення базових
станцій','NumberTitle','off');
    %for i = 1:Cell_index
    %      rectangle('Position',[Cell_position_x(i)-R_cell,Cell_position_y(i)-
R_cell,2*R_cell,2*R_cell],'Curvature',[1,1]);
    %  daspect([1,1,1]);
    %end
    %rectangle('Position',[X_min,Y_min,X_max,Y_max],'LineStyle','--');
    %daspect([1,1,1]);
    %xlim([X_min-R_cell,X_max+R_cell]);
    %ylim([Y_min-R_cell,Y_max+R_cell]);
    %hold on;
    %scatter(Cell_position_x,Cell_position_y);
    %  xlabel('Координата X, м'); ylabel('Координата Y, м');

end

```

```

function sheep = best_Pase_User(phase,from,to)
%best_Pase_User - finds a user with the most deep position in sector 'to'
%based on his phase. 'from' is the source sector
global delta_fi
d=delta_fi;
if from == 1
    if to == 2
        temp = find(phase == max(phase));
        sheep = temp(1);
    elseif to == 3
        temp = find(phase == min(phase));
        sheep = temp(1);
    end
elseif from == 2
    if to == 1
        temp = find(abs(phase) <= (pi/3 + d));
        sheep = temp(1);
        minimum = phase(temp(1))-(pi/3-d);
    end
end

```

```

for i = 2:length(temp)
    m = phase(temp(i))-(pi/3-d);
    if minimum > m
        minimum = m;
        sheep = temp(i);
    end
end
elseif to == 3
    temp = find(abs(phase) >= (pi - d));
    sheep = temp(1);
    if phase(temp(1))>0
        minimum = d + pi - phase(temp(1));
    else
        minimum = d - (pi + phase(temp(1)));
    end
    for i = 2:length(temp)
        if phase(temp(i))>0
            m = d + pi - phase(temp(i));
        else
            m = d - (pi + phase(temp(i)));
        end
        if minimum > m
            minimum = m;
            sheep = temp(i);
        end
    end
end
elseif from == 3
    if to == 1
        temp = find(abs(phase) <= (pi/3 + d));
        sheep = temp(1);
        minimum = (pi/3-d) - phase(temp(1));
        for i = 2:length(temp)
            m = (pi/3-d) - phase(temp(i));
            if minimum > m
                minimum = m;
            end
        end
    end
end

```



```

        sheep = temp(i);
    end
end
elseif to == 2
    temp = find(abs(phase) >= (pi - d));
    sheep = temp(1);
    if phase(temp(1)) > 0
        minimum = phase(temp(1)) - (pi - d);
    else
        minimum = d + (pi + phase(temp(1)));
    end
    for i = 2:length(temp)
        if phase(temp(i)) > 0
            m = phase(temp(i)) - (pi - d);
        else
            m = d + (pi + phase(temp(i)));
        end
        if minimum > m
            minimum = m;
            sheep = temp(i);
        end
    end
end
end
end
end

```

```
function save_Results_1
```

```
%save_Results записує результати у додаткові змінні, щоб повторно
```

```
%використати глобальні змінні без втрати отриманих даних
```

```
global Arrival_density Start_density End_density Load Loss Q_HO S_load End
Hop_Quantity ...
```

```
Arrival_density_LB_1 Start_density_LB_1 End_density_LB_1 Load_LB_1
Loss_LB_1 Q_HO_LB_1 S_load_LB_1 End_LB_1 Hop_Quantity_LB_1
```

```
Arrival_density_LB_1 = Arrival_density;
```

```
Start_density_LB_1 = Start_density;
```

```

End_density_LB_1 = End_density;
Load_LB_1 = Load;
Loss_LB_1 = Loss;
Q_HO_LB_1 = Q_HO;
S_load_LB_1 = S_load;
End_LB_1 = End;
Hop_Quantity_LB_1 = Hop_Quantity;
End

```

```

function add_Loss( user, time )
global Next_session End Loss K_session User_Busy
User_Busy(user) = 0;
End(user,Next_session(user)) = time;
Loss(time) = Loss(time) + 1;           %записати у втрати, бо рівень сигналу
занадто малий
Next_session(user) = Next_session(user) + 1;
if Next_session(user) > K_session(user)
    Next_session(user) = 0;
end
end

```

```

function change_Capacity_Matrix(user, time, res)
%change_Capacity_Matrix заповнення/зміна матриці пропускних здатностей
% res = -1 відміна впливу користувача на матрицю пропускних здатностей
% res = 1 додавання ресурсів користувача до матриці пропускних здатностей
global N_BTS delta_fi_LB S_uBusy Capacity_Matrix D_limit_LB

D_user_BS = zeros(1,N_BTS);           % масив відстаней абонента до БС
for BS = 1:N_BTS                       % визначення відстаней до БС
    D_user_BS(BS) = dist_BS(user,time,BS);
end
nn_BS = find(D_user_BS <= D_limit_LB); % масив номерів досяжних БС
sz = length(nn_BS);                    % кількість досяжних БС
for i_gg = 1:sz
    fi = find_Phase(user,time,nn_BS(i_gg));

```

```

    if fi < (delta_fi_LB - pi/3) || fi > (pi - delta_fi_LB)
        sector = 3 * nn_BS(i_gg);          % 3-й сектор
        if S_uBusy(user) ~= sector
            Capacity_Matrix(S_uBusy(user),sector)          =
Capacity_Matrix(S_uBusy(user),sector) + res;          % заповнення матриці пропускних
здатностей
        end
    end
    if (fi >= (pi/3 - delta_fi_LB)) && (fi <= (delta_fi_LB - pi))
        sector = 3 * nn_BS(i_gg) - 1;      % 2-й сектор
        if S_uBusy(user) ~= sector
            Capacity_Matrix(S_uBusy(user),sector)          =
Capacity_Matrix(S_uBusy(user),sector) + res;          % заповнення матриці пропускних
здатностей
        end
    end
    if abs(fi) <= (pi/3 + delta_fi_LB)
        sector = 3 * nn_BS(i_gg) - 2;      % 1-й сектор
        if S_uBusy(user) ~= sector
            Capacity_Matrix(S_uBusy(user),sector)          =
Capacity_Matrix(S_uBusy(user),sector) + res;          % заповнення матриці пропускних
здатностей
        end
    end
end
end
end
end

function phase = find_Phase(user,time,BS)
%find_Phase обчислення фази користувача відносно БС
global Ruh_x Ruh_y Cell_position_x Cell_position_y

    phase = angle((Ruh_x(user,time) - Cell_position_x(BS)) + 1i*(Ruh_y(user,time) -
Cell_position_y(BS)));

end

```

```

function dist_to_BTS = dist_BS(user,time,BS)      %віддаль до БС
% обчислення віддалі до БС
global Ruh_x Ruh_y Cell_position_x Cell_position_y
dist_to_BTS = sqrt(((Ruh_x(user,time) - Cell_position_x(BS))^2 +
(Ruh_y(user,time) - Cell_position_y(BS))^2));

end

function sector = find_BS_for_new_call(user,time) %пошук ближніж БС

global R_cell N_BTS

sector = -2;          % відсутність доступних секторів
D_user_BTS = zeros(1,N_BTS);      % масив відстаней абонента до БС

for i = 1:N_BTS          %визначення відстаней до усіх БС
    D_user_BTS(i) = dist_BS(user,time,i);
end
set_of_BTS = find(D_user_BTS <= R_cell); % номери досяжних БС
len = length(set_of_BTS);      % кількість досяжних БС
if len == 0          % відсутність доступної БС

    sector = -2;          % рівень сигналу занадто низький

elseif len == 1
    sector = find_sector(user, time, set_of_BTS(1)); % визначення секору

elseif len > 1
    for k = 1:(len-1)      % сортування номерів досяжних БС від найближчих
до найвіддаленіших
        if sector == -1
            for i = 1:(len-k)

```

```

        if D_user_BTS(set_of_BTS(len-i))<D_user_BTS(set_of_BTS(len-(i+1)))
            swap_1 = set_of_BTS(len-i);
            set_of_BTS(len-i) = set_of_BTS(len-(i+1));
            set_of_BTS(len-(i+1)) = swap_1;
        end
    end
    sector = find_sector(user, time, set_of_BTS(k));      % пошук доступного
сектору

    end
end
end
end

function find_Calls(time)          %перевірка поступлення викликів

global User_Busy Next_session Start Arrival_density
Passive_Users = find(User_Busy == 0);      %номери неактивних абонентів
N_oUP = length(Passive_Users);           %кількість неактивних абонентів
for i = 1:N_oUP
    if Next_session(Passive_Users(i)) > 0    % страхівка :-)
        if time == Start(Passive_Users(i),Next_session(Passive_Users(i)))
            Arrival_density(time) = Arrival_density(time) + 1;      %Інтенсивність
надходження викликів
            sector = find_BS_for_new_call(Passive_Users(i),time);      %пошук нової
БС

            if sector > 0

                start_Call(Passive_Users(i),time,sector); % початок сеансу;)

            elseif sector == -1

                User_Busy(Passive_Users(i)) = 3;      % перевід в режим
очікування/паузи обслуговування

```

```

elseif sector == -2

    add_Loss(Passive_Users(i), time);    % втрата виклику

end

end

end

end

function sector = try_to_start_one_more_time(user,time)
%try_to_start_one_more_time  ще одна спроба розпочати сеанс зв'язку

sector = find_BS_for_new_call(user,time);    %пошук нової БС

if sector > 0

    start_Call(user,time,sector);    % початок сеансу;)

end

end

function check_End_Calls(time)    %перевірка та завершення викликів

global User_Busy Next_session End
Active_Users = find(User_Busy == 1);    %номери активних абонентів
N_UBo = length(Active_Users);    %кількість активних абонентів
for i = 1:N_UBo
    if Next_session(Active_Users(i)) > 0    % страхівка :-)
        if time == End(Active_Users(i),Next_session(Active_Users(i)))

            End_Call(Active_Users(i),time);    % функція завершення сеансу
        end
    end
end
end

```

```

end

end

function start_Call( user, time, sector )
%start_Call Summary of this function goes here
global User_Busy N_of_BTS N_sel_sector S_uBusy S_oload Sector_Load
Start_density
User_Busy(user) = 1;
N_of_BTS(user) = ceil(sector / N_sel_sector);
S_oload(sector) = S_oload(sector) + 1;
Sector_Load(sector) = Sector_Load(sector) + 1;
S_uBusy(user) = sector;
Start_density(time) = Start_density(time) + 1;
End

function sector = check_Call(user,time)    % початок сеансу

sector = -1;

sector = find_BS(user,time);    %пошук нової БС

```

ДОДАТОК 2. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ РОБОТИ

"ЗАТВЕРДЖУЮ"
Директор
ПП "Цифрові технології"
Танчак З.В.
" 7 " 06 2018 р.

АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи
Бака Романа Івановича на тему
**"Підвищення доступності телекомунікаційних послуг в мережах
мобільного зв'язку"**

Даний акт складений про те, що у ПП "Цифрові технології" для вибору оптимальної стратегії планування мережі мобільного зв'язку шляхом оптимізації призначення базових станцій та оцінки ефективності використання каналу зв'язку використані результати дисертаційної роботи Бака Р.І. "Підвищення доступності телекомунікаційних послуг в мережах мобільного зв'язку", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- 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 безпроводного інтерфейсу підсистеми радіомережі і дає змогу визначити оптимальну стратегію планування системи мобільного зв'язку;
- 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.

Внаслідок перевірки використаних методів та алгоритмів на мережному обладнанні у ПП "Цифрові технології" встановлено, що результати знаходяться в межах п'ятивідсоткового середньоквадратичного відхилення від поданих у дисертаційній роботі.

Провідний інженер



Дрофяк А.М.

Проректор з науково-педагогічної роботи

ІНСТИТУТ НАУКОВО-ПЕДАГОГІЧНОЇ РОБОТИ
НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "Львівська політехніка"

доц. Давидчак О.Р.

2018 р.



АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи

Бака Романа Івановича на тему

"Підвищення доступності телекомунікаційних послуг в мережах мобільного зв'язку"

у навчальному процесі кафедри телекомунікацій

Даний акт складений комісією у складі:

- д.т.н. Стрихалюк Б.М., голова методичної ради Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- к.т.н., доц. Озірковський Л.Д., декан базової вищої освіти Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., проф. Климаш М.М., завідувача кафедри телекомунікацій;

про те, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати кандидатської дисертаційної роботи Бака Р.І. "Підвищення доступності телекомунікаційних послуг в мережах мобільного зв'язку", а саме:

- імітаційна модель обслуговування викликів у комірковій мережі мобільного зв'язку, яка враховує розподіли швидкостей та напрямів руху абонентів, та їх мережну активність в різний час протягом доби, використана в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторних роботах, з дисципліни «Технології мереж мобільного зв'язку» для студентів спеціальності 8.17000200 «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізація «Інформаційні мережі зв'язку»
- 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 безпроводного інтерфейсу підсистеми радіомережі і дає змогу визначити оптимальну стратегію планування системи мобільного зв'язку, використаний в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторних роботах, з дисципліни «Системи мобільного зв'язку» для студентів напрямку 6.05090300 «Телекомунікації»

Члени комісії:

Стрихалюк Б.М.

Озірковський Л.Д.

Климаш М.М.

**ДОДАТОК 3. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ
ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ
ДИСЕРТАЦІЇ**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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.

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.

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.

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.

5. М. М. Климаш, А. Г. Ложковський, О. А. Лаврів та Р. І. Бак, “Графо-аналітичний підхід до порівняння ефективності систем безпроводного зв’язку,” Комп’ютерні технології друкарства, no. 27, pp. 189–193, 2011.

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.

7. B. Buhyl, P. Huskov, O. Lavriv, R. Bak, and A. Luntovskyu, “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.

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.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (форма участі здобувача):

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. (Очна участь здобувача із доповіддю, 29 травня – 02 червня 2017 р.).

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. (заочна участь здобувача, співдоповідач, 21-25 лютого 2017 р.)

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. (заочна участь здобувача, співдоповідач 19-22 квітня 2016 р.)

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. (заочна участь здобувача, співдоповідач 24-27 лютого 2015 р.)

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. (очна участь здобувача із доповіддю, 24-26 листопада 2011 р.)

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. (очна участь здобувача із доповіддю, 1–3 листопада 2012 р.)