

**МАСЮК АНДРІЙ РОМАНОВИЧ**

УДК 621.396

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних  
гетерогенних мережах**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі  
(шифр і назва спеціальності)

05 «Технічні науки»  
(галузь знань)

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

---

(підпис, ініціали та прізвище здобувача)

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

**Науковий керівник–**  
Климаш Михайло Миколайович,  
д.т.н., професор

*Ідентичність всіх примірників дисертації*

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради*

**/І.В. Демидов/**

## АНОТАЦІЯ

*Масюк А.Р.* Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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» МОН України, Львів, 2018.

Дисертаційну роботу присвячено розв'язанню науково-технічного завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних гетерогенних мережних систем та покращення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору систем радіодоступу та розроблення моделі спільного управління ресурсами з використанням технології обробки великих обсягів даних.

У першому розділі проведено аналіз технологій мобільного зв'язку. Визначено, перелік вимог необхідних для забезпечення необхідної якості обслуговування абонентам. Встановлено що стрімке зростання клієнтського трафіку в мережах мобільного зв'язку, зміна його характеру і структури потребують безперервного і значного збільшення пропускної спроможності цих систем. Технології радіоінтерфейсів практично досягають теоретичних меж каналної пропускної здатності, і наступним шляхом для підвищення ємності мережі є просторове ущільнення та вдосконалення методів управління розподілом радіоресурсу. Проаналізовано, що існуючі методи підвищення ефективності функціонування мереж мобільного зв'язку стикаються з проблемою відсутності технології управління гетерогенними мережами, яка даватиме змогу отримати гнучку, керовану, адаптивну та економічно ефективну систему, з прогнозуванням навантаження від абонентів та орієнтацією на задоволення користувача. Для досягнення більшої продуктивності мережі запропоновано використовувати гетерогенні мережі із комірками різних розмірів.

Другий розділ роботи присвячено розробленню методу та алгоритмів адаптивного управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах.

Детально проаналізовано критерії для ефективного управління ресурсами. Розглянуто особливості та класифікацію хендовера в гетерогенних мережах мобільного зв'язку. Формалізовано завдання для побудови ефективних безпроводних мереж в заданому просторі для функціонування та роботи мобільних пристроїв в гетерогенній мережі. Запропоновано розробити гетерогенну мережу, яка буде орієнтована на абонента та дасть змогу оператору мережі аналізувати та прогнозувати поведінку користувачів шляхом використання хмарних технологій. Проведено порівняння критеріїв для ефективного управління ресурсами та здійснено вибір критерію максимального рівномірного завантаження мобільної мережі. Запропоновано метод адаптивного вибору вузла безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин, що дає змогу забезпечити глобальний доступ та безшовну мобільність між безпроводними мережами із забезпеченням необхідної якості обслуговування. Розроблено централізований алгоритм хендовера в гетерогенних мобільних мережах на основі хмарних обчислень.

У четвертому розділі розроблено модель підвищення продуктивності роботи гетерогенної мережі із використанням системи обробки великих обсягів даних. Розроблено комплексний метод гнучкого управління ресурсами в гетерогенній мережі, який включає в себе: статичне резервування ресурсів для певного типу сервісу в кожній з технологій, динамічне резервування ресурсів, аналіз пріоритетності користувачів, що дає змогу зменшити кількість незадоволених клієнтів. Розроблено структурну схему етапів оптимізації гетерогенної мережі, що дає змогу підвищити ефективність функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку. Розроблено скрипти, що дають змогу аналізувати великі обсяги даних та шляхом фільтрації та впорядкування виводити правильні дані, що дають змогу приймати інтелектуальні рішення для управління ресурсами та прогнозувати поведінку гетерогенної мережі. Оцінено ефективність запропонованих рішень та досягнуто підвищення продуктивності гетерогенної мережі. За допомогою пріоритезації користувачів підвищено

якість обслуговування користувачів в гетерогенній мережі та зменшено кількість незадоволених клієнтів.

**Ключові слова:** гетерогенна мережа, якість обслуговування, розподіл ресурсів, хмарні обчислення, нечітка логіка.

Список публікацій здобувача:

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Masiuk A. The method of adaptive selection of a wireless access network in a heterogeneous environment based on the theory of fuzzy sets / A. Masiuk, M.Klymash, I. Demydov, M. Beshley, H. Beshley, O. Panchenko // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2018. – Vol. 3. – Issue 1. – P. 11-22.

2. Strykhalyuk B. Service provisioning by using a structure stability algorithm in a virtualized data center based on cloud technology / Bogdan Strykhalyuk, Olga Shpur, Andriy Masiuk // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2014. – Volume 4, Number 1. – P. 81–86.

3. Масюк А. Р. Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень / А. Р. Масюк, І.Б. Стрихалюк, М. В. Брич, І. О. Кагало, Г. В. Бешлей // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. — № 874. — С. 110–121.

4. Бешлей М.І. Оцінка адекватності функціонування програмного маршрутизатора у процесі обслуговування мультимедійного трафіку // М.І. Бешлей, О.М. Селюченко, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк, Г.В. Холявка// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. - № 818. - С. 162-173.

5. Лунтовський А. О. Етапи розвитку сучасних інфокомунікаційних сервісів та енергетична ефективність мережевих технологій / А.О. Лунтовський, П. О. Гуськов, А. Р. Масюк // Вісник Національного університету «Львівська

політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. - № 796. - С. 131-139.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

6. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk and M. Klymash // "2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2016. - P. 33-35.

7. Beshley M. Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization / M. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk // 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016. - P. 1-3.

8. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masiuk // IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015)], (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, Ukraine – P. 69-72.

9. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network test bed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko and A. Masiuk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv, 2015. - P. 1-4.

10. Masiuk A. Common radio resource management model for heterogeneous cellular networks / Masiuk, M. Beshley, O. Lavriv and Y. Deschynskiy // IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2016), Feb. 23-26, 2016, Lviv, Ukraine. - P. 661-663.

11. Krasko O. Enhanced MAC design for convergence of 5G backhaul network / O. Krasko, H. Al-Zayadi, A. Masyuk and M. Klymash // 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017. - P. 213-216.

12. Klymash M. Concept for ensuring effective functioning of mobile communication system in heterogenous 5G infrastructure / M. Klymash, H. Beshley,

A. Masiuk and I. Strykhalyuk // 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, 2017. - P. 272-274.

13. Masiuk A. Resource management method in LTE heterogeneous networks / A. Masiuk, H. Beshley, B. Koval and R. Basa // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 2018. - P. 1131-1134.

14. Бешлей М.І. Підвищення ефективності роботи гетерогенних мереж методом динамічного перерозподілу ресурсів між різними безпроводовими технологіями / Бешлей М.І., Селюченко М.О., Гуськов П.О., Масюк А.Р. // Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології»: матеріали науково-технічної конференції (17-20 листопада 2015 р. м.Київ), Т.2 – К: ДУТ. – 2015. – С. 49–50.

15. Бешлей М.І. Розробка і дослідження імітаційної моделі безпроводної гетерогенної мережі / Климаш М.М., Масюк А.Р. // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р., м. Київ, Україна), 2016. - К.: НТТУ «КПІ». – С. 70-72.

16. Климаш М.М. Модель адаптивного управління радіоресурсами в безпроводних гетерогенних мережах / М.М. Климаш, М.І. Бешлей, А.Р. Масюк // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015: збірник матеріалів конференції (22-25 квітня 2015р., м. Київ, Україна), 2015 - К.: НТТУ «КПІ». – С.40-42.

17. Селюченко М.О. Багаторівневе управління ресурсами в гетерогенній мульти - операторській мережі // Селюченко М.О., Бешлей Г.В., Масюк А.Р., Бешлей М.І. // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT'2015). Conference proceedings. (29 October – 01 November, Lviv, Ukraine), 2015. – P. 125-128.

18. Климаш М.М. Аналіз властивостей вихідного потоку в системі розподілу інформації із самоподібним вхідним трафіком і обслуговуванням за порядком черги / Климаш М.М., Бугиль Б.А., Масюк А.Р. // Науково-технічна

конференція "Проблеми телекомунікацій": Програма. К.: НТУУ "КПІ", 2011. - С. 37-38.

19. Кожуров, Д. В. Модель обміну керуючою інформацією в сервісно-орієнтованій Cloud-мережі / Д.В. Кожуров, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій-2013 (СПТЕЛ-2013), 30 жовт.- 2 листоп. 2013 р. — Львів, 2013. — С. 105-108.

20. Бешлей М.І. Концепція програмно конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR / Климаш М.М., Масюк А.Р., Бешлей Г.В., Бешлей М.І. // Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (3-5 листопада 2016 р. м. Чернівці), 2016. - С. 35-36.

## ABSTRACT

*Masiuk A. R.* Models and algorithms for common resource management in wireless heterogeneous networks. - Proficiency scientific treatise on the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the 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 Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to solving the scientific and technical task of increasing the efficiency of the wireless heterogeneous network operation and enhancing the quality of service for users by improving the method of adaptive selection of radio access network and developing a model for joint management of resources using the technology of processing Big Data.

In the first chapter, we analyzed mobile communication technologies. We have determined the list of requirements necessary to provide the required quality of service to subscribers. We have also established that rapid growth, changing nature and structure of client traffic in mobile networks need a continuous and significant increase in the throughput of these systems. Radio interface technology practically reaches the theoretical limits of channel bandwidth, and the next way to increase network capacity is to spatially compass and improve the management methods of radio resource allocation. We have concluded that existing methods of improving the efficiency of mobile communication networks face the problem of lack of heterogeneous network management technology that could provide a flexible, managed, adaptive, user-centered and cost effective system management including prediction of load from subscribers. To achieve greater network performance we suggested using heterogeneous networks with cells of different sizes.

The second chapter of the paper is devoted to the development of method and algorithms for adaptive resource management in wireless heterogeneous networks. In this chapter, we analyzed in detail the criteria for efficient resource management considering the features and classification of handover in heterogeneous mobile communication networks. We formalized the task of building the effective wireless



networks in a given space for operation of mobile devices in a heterogeneous environment. We proposed to develop a subscriber -focused heterogeneous network that enables the network operator to analyze and predict subscriber behavior using cloud technologies. We conducted comparison of criteria for efficient resource management and selected the criterion of maximum uniform loading of the mobile network. We proposed the method of adaptive selection of a wireless access node in heterogeneous environment using the theory of fuzzy sets. The latter enables to provide global access and seamless mobility between wireless networks with the provision of the required quality of service. We developed the centralized algorithm for handover in heterogeneous mobile networks based on cloud computing technology.

In the third chapter, we performed investigation and simulation of functioning of the heterogeneous network. To study the processes of functioning of a heterogeneous network with a high level of user mobility, we developed simulation model that allows configuring large number of parameters and characteristics to enable describing existing network technologies. The simulation model is based on mathematical, predictive and optimization models. We created a model of a heterogeneous wireless access platform that allows automating the proposed method of selecting the destination network due to implementation of the protection model. Using the developed simulator, we investigated the processes of providing services to users of a heterogeneous network system based on the developed models. In particular we investigated the case of the "real-time video" service. The optimal cell of the heterogeneous network system for the service provisioning to a given user is determined based on evaluation of the characteristics and parameters of the corresponding network access node using the methods of the theory of fuzzy sets.

In the fourth chapter we developed a model for increasing the productivity of a heterogeneous network with the use of a system for processing large volumes of data. In addition, we developed a complex method of flexible resource management in a heterogeneous network that includes statistical reservation of resources for a certain type of service in each technology, dynamic resource reservation, analysis of user priority. This allows reducing the number of dissatisfied clients. We developed the

algorithm of optimization of a heterogeneous network that allows improving the efficiency of heterogeneous mobile communication networks. We developed the scripts to automate analysis of the large volumes of data. The scripts use filtration and streamlining to display correct data that allows achieving intelligent resource management solutions and predict the behavior of a heterogeneous network. We evaluated the effectiveness of the proposed solutions and achieved the increase of productivity of the heterogeneous network. At the same time, we improved quality of service in the heterogeneous network using user prioritization and reduced the number of unsatisfied clients.

**Key words:** heterogeneous network, service quality, resource allocation, cloud computing, fuzzy logic.

The list of author's publications:

*Proceedings where basic scientific results of thesis were published:*

1. Masiuk A. The method of adaptive selection of a wireless access network in a heterogeneous environment based on the theory of fuzzy sets / A. Masiuk, M.Klymash, I. Demydov, M. Beshley, H. Beshley, O. Panchenko // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2018. – Vol. 3. – Issue 1. – P. 11-22.
2. Strykhalyuk B. Service provisioning by using a structure stability algorithm in a virtualized data center based on cloud technology / Bogdan Strykhalyuk, Olga Shpur, Andriy Masiuk // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2014. – Volume 4, Number 1. – P. 81–86.
3. Masiuk A. R. Intellectual Vertical Handover Algorithm in Heterogeneous Mobile Network Based on Cloud Technology / A. R. Masiuk, I.B. Strykhalyuk, M.V. Brych, I. O. Kahalo, H. V. Beshley // Radio Electronics and Telecommunications /Ed. B.A. Mandziy. – Lviv.: Lviv Polytechnic Publishing House. – 2017. - № 874. - P.110–121.
4. Luntovskiy A.O. Stages of development of modern infocommunication services and energy efficiency of network technologies / A.O.Luntovskiy, P.O. Guskov, A.R. Masyuk // Radio Electronics and Telecommunications /Ed.

B.A. Mandziy. – Lviv.: Lviv Polytechnic Publishing House. - 2014. - No. 796. - P. 131-139.

5. Beshey M.I. Estimation of the adequacy of the functioning of the software router in the process of multimedia traffic servicing // M.I Beshley, O.M. Selyuchenko, O.A. Lavriv, A.R Masyuk, H.V Kholiavka // Radio Electronics and Telecommunications /Ed. B.A. Mandziy. – Lviv.: Lviv Polytechnic Publishing House. - 2015. - No. 818. - P. 162-173.

*Proceedings that certify an approvement of thesis materials:*

6. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk and M. Klymash // "2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2016, pp. 33-35.

7. Beshley M. Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization / M. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk // 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016, pp. 1-3.

8. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masiuk // IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015)], (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, 'Ukraine – P. 69-72.

9. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network test bed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko and A. Masiuk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv, 2015, pp. 1-4.

10. Masiuk A. Common radio resource management model for heterogeneous cellular networks / Masiuk, M. Beshley, O. Lavriv and Y. Deschynskiy // IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2016), Feb. 23-26, 2016, Lviv, Ukraine, pp. 661-663.

11. Krasko O. Enhanced MAC design for convergence of 5G backhaul network / O. Krasko, H. Al-Zayadi, A. Masyuk and M. Klymash // 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 213-216.

12. Klymash M. Concept for ensuring effective functioning of mobile communication system in heterogenous 5G infrastructure / M. Klymash, H. Beshley, A. Masiuk and I. Strykhalyuk // 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, 2017, pp. 272-274.

13. Masiuk A. Resource management method in LTE heterogeneous networks / A. Masiuk, H. Beshley, B. Koval and R. Basa // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 2018, pp. 1131-1134.

14. . Beshey M.I Improving the efficiency of heterogeneous networks by the method of dynamic redistribution of resources between different wireless technologies / Beshley M.I, Seliuchenko M.O., Guskov P.O., Masyuk A.R. // International scientific and technical conference "Modern Information and Telecommunication Technologies": materials of the scientific and technical conference (November 17-20, 2015, Kiev), T.2 - K: DUT - 2015 - P. 49-50.

15. Beshley M.I. Development and research of simulation model of wireless heterogeneous network / Klymash M.M, Masyuk A.R // X International scientific and technical conference "Problems of telecommunications" IIT-2016: collection of conference materials (April 19-22, 2016, Kyiv, Ukraine), 2016 - K .: NTTU "KPI" - P. 70-72.

16. Klymash M.M Model of adaptive control of radioresources in wireless heterogeneous networks. / M.M. Klymash, M.I Beshley, A.R Masyuk // VIII International scientific and technical conference "Problems of telecommunications" PT-2015: collection of conference materials (April 22-25, 2015, Kyiv, Ukraine), 2015 - K .: NTTU "KPI" - P.40-42 .

17. Seliuchenko M.O. Multilevel resource management in a heterogeneous multi-operator network // Seliuchenko M.O, Beshley H.V., Masyuk A.R, Beshley

M. I. // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies" (AICT'2015). Conference proceedings (29 October - 01 November, Lviv, Ukraine), 2015 L-: P. 125-128.

18. Klymash M.M Analysis of the properties of the output stream in the system of information distribution with self-similar incoming traffic and servicing according to the order of the queue / Klymash M.M, Bugil B. A., Masyuk A. R // Scientific and Technical Conference "Problems of Telecommunications": Program. K .: NTUU "KPI", 2011. - p.37-38.

19. Kozhurov D.V. Model for the exchange of control information in a service-oriented Cloud-network / D.V. Kozhurov, OA Lavriv, A.R Masyuk // Modern problems of telecommunications and training of specialists in the field of telecommunications-2013 (SPTTEL-2013), October 30 - November 2. 2013 - Lviv, 2013. - P. 105-108.

20. Beshley M.I. Concept of a software-configured heterogeneous mobile network based on SDN / NFV and SDR technologies / Klymash M.M, Masyuk A.R, Beshley H.V, Beshley M.I // Physical-technological problems of transmission, processing and storage of information in infocommunication systems: materials of the V International Scientific and Practical Conference (November 3-5, 2016, Chernivtsi), 2016. - p.35-36.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	16
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	23
1.1. Аналіз мереж мобільного зв'язку та їх еволюція в напрямку гетерогенності.....	23
1.2. Аналіз існуючих проблем в сучасних мобільних мережах .....	27
1.3. Перспективна мережа мобільного зв'язку C-RAN.....	29
1.4. Розвиток та впровадження гетерогенних мобільних мереж HetNet.....	33
1.5. Критерії для ефективного управління ресурсами гетерогенної мережі.....	37
1.6. Висновки до розділу 1 .....	47
РОЗДІЛ 2. МЕТОД ТА АЛГОРИТМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В БЕЗПРОВІДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ .....	48
2.1. Формалізація завдання забезпечення ефективного функціонування гетерогенної мережі радіодоступу .....	48
2.2. Підвищення ефективності функціонування мереж за критерієм максимального рівномірного завантаження гетерогенної інфраструктури....	53
2.3. Багатокритерійний алгоритм вертикального хендовера користувацького навантаження .....	56
2.4. Метод адаптивного вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин .	68
2.5. Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мережі на основі хмарних обчислень.....	76
2.6. Модель гнучкого управління ресурсами в гетерогенній мобільній мережі на основі технології Big Data .....	78
2.7. Висновки до розділу 2 .....	89
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ .....	90
3.1. Розроблення імітаційної моделі переміщення абонентів мобільної мережі .....	90
3.2. Дослідження роботи мобільної мережі на основі імітаційної моделі руху абонентів для прогнозування локальних перевантажень .....	96
3.3. Модель емуляції роботи гетерогенної системи мобільного зв'язку...	100

3.4. Імітаційне моделювання процесів динамічного розподілу ресурсів у гетерогенній мережній платформі безпроводного доступу .....	103
3.5. Висновки до розділу 3 .....	108
<b>РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ОБ'ЄМІВ ДАНИХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ.....</b>	<b>110</b>
4.1. Етапи підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку .....	110
4.2. Постановка імітаційного моделювання процесу оптимізації гетерогенної мережі .....	114
4.3. Практична реалізація технології обробки великих об'ємів даних отриманих шляхом імітаційного моделювання гетерогенної мережі .....	118
4.4. Генерація, збір та аналіз даних процесу функціонування гетерогенної мережі із реалізованим рішенням обробки великих даних .....	127
4.4.1. Генерація даних процесу функціонування гетерогенної мережі. ....	127
4.4.2. Збір та аналіз даних процесу функціонування гетерогенної мережі із реалізованим рішенням обробки великих даних .....	132
4.5. Управління ресурсами в гетерогенній мережі .....	134
4.6. Оптимізація гетерогенної мережі та оцінка ефективності використання запропонованих рішень .....	140
4.7. Висновки до розділу 4 .....	151
<b>ВИСНОВОК .....</b>	<b>152</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....</b>	<b>154</b>
<b>ДОДАТОК 1. Програмний код імітаційної моделі гетерогенної мобільної системи зв'язку.....</b>	<b>167</b>
<b>ДОДАТОК 2. Фрагмент коду моделі гетерогенної мережі з використанням технології Big Data.....</b>	<b>171</b>
<b>ДОДАТОК 3. Акти впровадження результатів роботи .....</b>	<b>175</b>
<b>ДОДАТОК 4. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації .....</b>	<b>179</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** В умовах стрімкого глобального зростання обсягів трафіку мережі мобільного зв'язку наступного покоління повинні орієнтуватись на потреби клієнтів для підвищення якості обслуговування. Для того, щоб адаптуватися до зростаючого потоку інформації в найближчій перспективі сучасні підходи, такі як розширення спектру та розгортання більшої кількості базових станцій в мобільній мережі вже не будуть актуальними з точки зору вартості, масштабованості та гнучкості. Різке збільшення обсягів інформаційного трафіку, яке, в основному, спричинене мобільним відео, соціальними медіа та різноманітними сервісами «Інтернету речей» змушує мобільних операторів шукати інноваційні способи управління мережами в умовах обмежених частотних та транспортних ресурсів. Перед телекомунікаційними компаніями постає завдання створення мереж, які були б інтегровані на усіх рівнях, поєднували би різні стандарти і технології, забезпечуючи безшовний перехід з одного стандарту до іншого, від однієї технології до іншої. Саме такі мережі отримали назву гетерогенних. В умовах гетерогенності та сумісної роботи багатьох операторів безпроводного зв'язку пріоритетним завданням стає ефективне управління спільними радіоресурсами і забезпечення прозорого пересування абонента, що включають у себе такі механізми як підтримка мобільності, хендовер, забезпечення QoS, а також систему безпеки та тарифікації. Хендовер у гетерогенній мережі є ключовою функцією, що дає змогу абоненту безшовно пересуватися у мережі. При цьому горизонтальний хендовер є достатньо дослідженою процедурою та здебільшого ґрунтується на рівні сигналу, що приймається (Received Signal Strength, RSS). Тоді як вертикальний хендовер є більш складною процедурою у зв'язку з неоднорідною природою різних мереж мобільного зв'язку та потребує удосконалення з метою ефективного використання їх ресурсів, максимізації якості послуг, що надаються та задоволеності користувачів. Дослідженням завдань управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах займаються фахівці в Україні та закордоном. Зокрема, питання забезпечення якості послуг в гетерогенних мережах розглядали Глоба Л.С., Гаркуша С.В.,



Воропаєва В.Я., Безрук В.М., Лемешко О.В. Серед іноземних дослідників слід відзначити роботи з питань розроблення алгоритмів та підходів до реалізації вертикального хендовера Harsha A. Bhute, Omar Khattab, Zekri M., Jouaber B. Проте, у більшості із відомих робіт в процесі вибору мереж радіодоступу розглядаються лише декілька параметрів, які не дають змоги враховувати в процесі ресурсного оцінювання та управління велику кількість критеріїв і динамічно адаптувати правила прийняття рішень. Для того, щоб це здійснювати необхідно розглянути перехід від нинішньої архітектури мобільних мереж до нової парадигми, що базуватиметься на збиранні та зберіганні інформації в дата центрах для її подальшого аналізу та прийняття рішень. Саме тому, актуальним питанням є управління мережами, керованими на основі аналізу великих обсягів даних у хмарному середовищі, оскільки зростання їх обсягу стає викликом для сучасної мобільної інфраструктури.

Таким чином, розширення спектру послуг, масштабування інфраструктури та обсягів трафіку, що постійно зростають, спонукають до розв'язання наукового завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних гетерогенних мережних систем та покращення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору систем радіодоступу та розроблення моделі спільного управління ресурсами з використанням технології обробки великих обсягів даних.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційну роботу виконано у межах держбюджетної науково-дослідної теми «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання», (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U004449 та держбюджетної науково-дослідної теми «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні», (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U007177.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розширення функціональності систем мобільного зв'язку та покращення якості послуг, що

ними надаються шляхом удосконалення методу адаптивного вибору мережі радіодоступу та розроблення моделі спільного управління мережними ресурсами з використанням технології обробки великих об'ємів даних.

Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких завдань:

1. Аналіз проблематики в галузі сучасних мобільних мереж зв'язку та перспектив розвитку гетерогенних мобільних мереж.

2. Математична формалізація завдання забезпечення ефективного функціонування гетерогенної мережі радіодоступу.

3. Розроблення методу адаптивного вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин.

4. Удосконалення централізованого алгоритму інтелектуального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі зв'язку на основі моделі хмарних обчислень.

5. Розроблення та дослідження імітаційної моделі безпроводної гетерогенної мережі зв'язку.

6. Розроблення поетапного методу підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку.

7. Практична реалізація технологій оброблення великих обсягів даних, одержаних шляхом імітаційного моделювання процесу функціонування гетерогенної мережі.

8. Оцінювання ефективності запропонованих рішень стосовно розв'язання завдання оптимізації ресурсів гетерогенної мережі мобільного зв'язку.

*Об'єкт дослідження* – процес оптимізації ресурсів гетерогенної мережі мобільного зв'язку із забезпеченням якості обслуговування.

*Предмет дослідження* – методи та алгоритми адаптивного управління радіоресурсами в безпроводних гетерогенних мережах.

*Методи дослідження.* У роботі знайшли своє застосування теорія систем та мереж масового обслуговування, аналітичні, імітаційні методи дослідження, а також методи натурного експерименту (в орендованому cloud-середовищі).

**Наукова новизна** роботи полягає у тому, що:

1. Вперше запропоновано модель для дослідження процесів функціонування гетерогенного мережного середовища, яка, на відміну від

відомих, використовує методику оброблення великих об'ємів даних для виконання моніторингу передавання інформації, аналізу завдань, які формуються користувачами мережі та виведення статистичних даних щодо ініціації хендовера в інфраструктурі мобільного зв'язку та дала змогу дослідити процес оптимізації операторської мережі шляхом реалізації алгоритму перерозподілу її мережевих ресурсів і забезпечення гнучкого балансування навантаження.

2. Набула подальшого розвитку імітаційна модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка, на відміну від відомих, автоматизує запропонований метод вибору радіоінтерфейсу вузла безпроводного доступу на основі теорії нечітких множин, використовуючи допоміжні математичні моделі, зокрема для опису та прогнозування процесів руху користувачів мереж мобільного зв'язку та дала змогу здійснювати вибір значної кількості параметрів моделювання для створення умов дослідження, що є близькими до умов реальної експлуатації телекомунікаційних систем.

3. Удосконалено метод вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному мережному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин, що дало змогу централізовано приймати обґрунтовані рішення щодо проведення процедури горизонтально-вертикального хендовера, базуючись на значеннях мережних параметрів, які належать до групи QoS-залежних критеріїв, а також таких, що залежать безпосередньо від властивостей радіоінтерфейсів мережної системи; передбачено можливості адаптування правил прийняття рішень, залежно від різних умов експлуатації телекомунікаційних систем та запроваджених мережних політик.

**Практичне значення одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Набув подальшого розвитку метод підвищення продуктивності гетерогенної мережі мобільного зв'язку шляхом знаходження комплексного інтелектуального рішення щодо спільного управління ресурсами телекомунікаційних операторів, який, на відміну від відомих, включає процедуру ініціації вертикального хендовера, гнучкого перерозподілу інформаційних потоків і відкидання неперіоритетних сеансів користувачів та дає

змогу підтримувати безшовне пересування рухомих абонентів із необхідною якістю обслуговування.

2. На основі застосування концепції хмарних обчислень розроблено інтелектуальний алгоритм вертикального хендовера в гетерогенних мобільних мережах із використанням методів нечіткої логіки для більш повної агрегації та оброблення мережних параметрів і прийняття рішення про міжсистемне переключення, що дало змогу ефективно використовувати ресурси різних мережних операторів і надавати телекомунікаційні послуги з кращою якістю (до 6 разів зменшено середню затримку та джитер пакетів даних при обслуговуванні відео потоків реального часу).

3. На основі запропонованих рішень із використанням методу додаткового резервування ресурсів мережі, порівняно з гомогенними мережами досягнуто підвищення продуктивності гетерогенної мережі мобільного зв'язку до 16%; а також додатково, в порівнянні з попереднім методом, – до 13% із використанням методів рівномірного розподілу ресурсів та за рахунок використання динамічного резервування. За допомогою застосування пріоритезації користувачів гетерогенної безпроводної мережі підвищено якість їх обслуговування та зменшено кількість незадоволених клієнтів.

4. Реалізовано систему оброблення великих обсягів даних на мові програмування Python, а саме розроблено скрипти для аналізу, фільтрації та впорядкування великих обсягів даних, які дали змогу приймати обґрунтовані рішення для управління мережними ресурсами та прогнозування поведінки гетерогенної мережної системи.

Наукові та практичні результати виконаних досліджень використані в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» для модернізації курсів лекцій з дисциплін «Системне програмування інфокомунікацій»; створення нових курсів лекцій з дисципліни «Розподілені сервісні системи та Cloud-технології», «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку», «Технології мереж мобільного зв'язку».

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено для покращення параметрів якості обслуговування та гнучкості управління

ресурсами в телекомунікаційних мережах ТзОВ ВТФ "Контех", ТзОВ "Телекомунікаційна компанія", ПП "Цифрові технології", що підтверджено актами впровадження.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати і положення дисертації представлені, доповідались та обговорені на 15-ох міжнародних і державних науково-технічних конференціях та наукових семінарах: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське 2016, 2018 рр.); Міжнародній науково-технічній конференції «Проблеми телекомунікацій» ПТ-11, ПТ-16, ПТ-16 (м. Київ, 2011, 2015, 2016 рр.); 5-й Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (2016 р., м. Чернівці, Україна); Науково-практичній конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013», м. Львів, 2013 р.); Міжнародній науково-технічній конференції (Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології) (м. Київ, 2015 р.); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2015, 2017 рр.); 2015, 2016 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T) (Kharkiv, Ukraine, 2015, 2016 рр.); Міжнародній конференції з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки IEEE (УкрМіКо'2016/UkrMiCo'2016) (м. Київ, 2016 р.); International IEEE Conferences on Advanced Information and Communication Technologies-2015, 2017 (м. Львів, 2015, 2017 рр.). Крім цього, дисертаційна робота у повному обсязі представлена на наукових семінарах кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка».

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 20 наукових праць, серед них 1 стаття в іноземному науковому періодичному виданні за напрямом дисертації [1], 4 статті у наукових фахових виданнях згідно з переліком МОН України [2–5] та 15

публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій [6–20].

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, викладені в дисертації, автор одержав особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: у роботах [1, 14] – розроблення адаптивного вибору мережі доступу в гетерогенній інфраструктурі, [2, 6, 8, 15] – розроблення та дослідження імітаційної моделі гетерогенної мережі, [3, 10, 12, 17] – алгоритм централізованого інтелектуального хендовера, [5, 7, 9, 18] – дослідження якості обслуговування в гетерогенних мережах, [4, 11-14, 20] – підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж методом динамічного перерозподілу ресурсів між різними безпроводовими технологіями доступу.

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та чотирьох додатків. Загальний обсяг роботи становить 182 сторінки друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 131 сторінка основного тексту, 87 рисунків, 14 таблиць, список використаних джерел зі 121 найменування.

# РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ

## 1.1. Аналіз мереж мобільного зв'язку та їх еволюція в напрямку гетерогенності

Збільшення обсягів трафіку диктує нові вимоги до ємності мережі. Щораз більше пристроїв підключаються до мережі Інтернет вимагаючи високої швидкості передачі інформації. Особливо популярним останнім часом є доступ до Всесвітньої мережі за допомогою безпроводного зв'язку. Проте це призводить до збільшення частки безпроводного трафіку, і в наступні роки така тенденція буде зберігатися, завдяки зручності безпроводного підключення, що дозволяє використовувати послуги в будь – якому місці, в будь – який час.

Завдяки розвитку концепції Інтернет речей (IoT) прогнозується, що у 2020 році до мережі Інтернет буде підключено до 50 мільярдів пристроїв, кожен із яких буде обмінюватися трафіком один з одним безпосередньо через мережу Інтернет [51, 61].

В зв'язку з зростанням трафіку від абонентів оператори мобільного зв'язку повинні впроваджувати нові технічні рішення, щодо широкосмугової передачі даних, щоб збільшити ємність мережі, надійність, стабільність швидкості передачі інформації, здешевити вартість надання послуг. Можна збільшувати кількість базових станцій (хоча не можна перевищувати певних потужностей випромінювання), а можна збільшити ефективність використання базових станцій, впроваджуючи нові технології, але це потребує капіталовкладень [68-69].

Трафік передавання даних почав випереджати трафік передачі голосу вже в кінці 2009 року згідно з даними, оприлюдненими компанією Ericsson (рис 1.1).

У свою чергу, сучасні мережі передавання інформації повинні гарантувати необхідний рівень якості послуг (QoS) для різних типів трафіку. Для цього реалізується підтримка пріоритезації окремих послуг, причому як на

мережевому і транспортному рівні, так і на MAC-рівні (стандарти IEEE 802.16). Це дає змогу використовувати їх для надання сервісів голосового зв'язку, передавання мультимедійної інформації тощо [52-55].

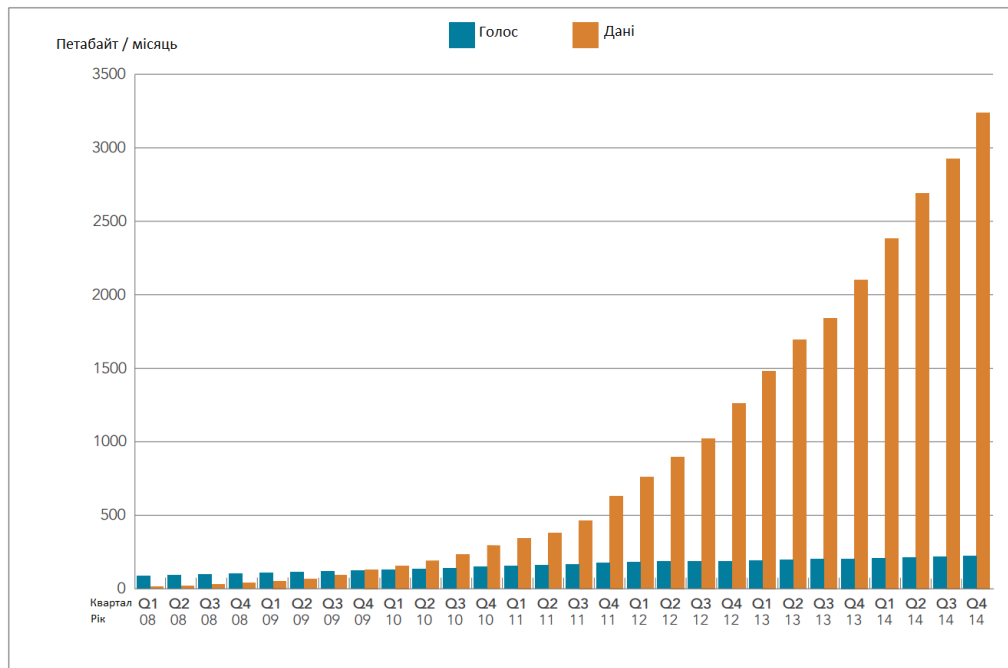


Рис.1.1. Середньомісячний обсяг мобільного трафіку

Технології 3G вже широко використовуються операторами стільникового зв'язку в усьому світі. Вони розвиваються за двома напрямками - лінія UMTS (WCDMA) і лінія CDMA (cdma2000) [71-75].

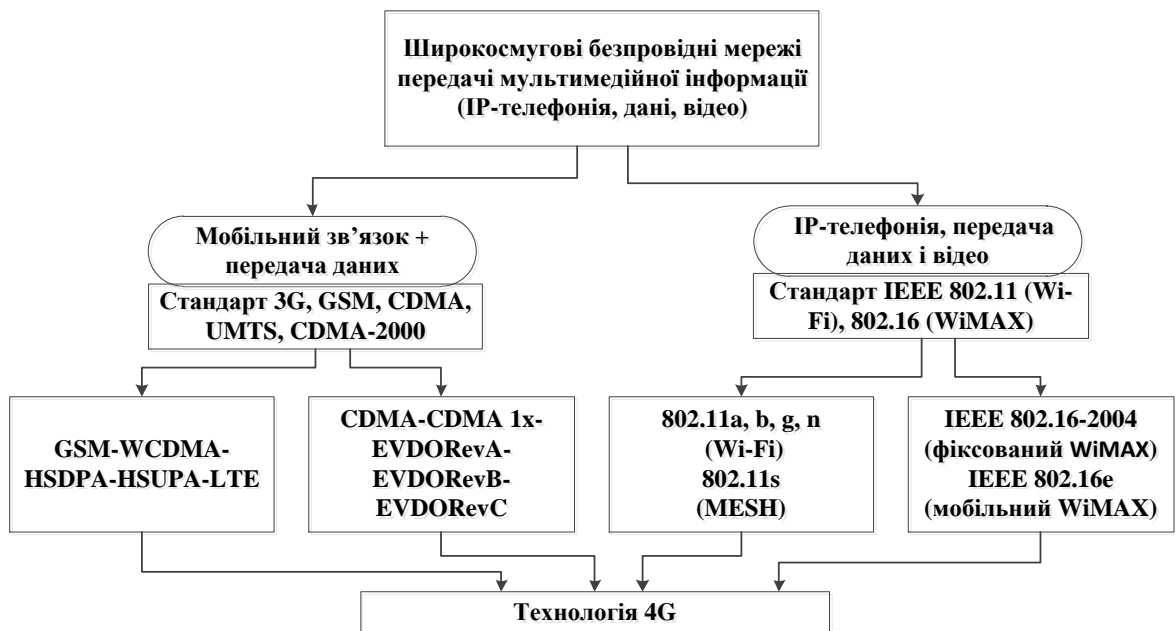


Рис. 1.2. Основні напрямки розвитку технології широкополосного зв'язку



З кожним роком зростає кількість пристроїв що використовують підключення до мережі Інтернет через мобільний телефон, зростають швидкості доступу до мережі [76]. Разом із цим збільшується кількість Інтернет – сервісів, відповідно зростає обсяг мобільного трафіку (рис 1.3).

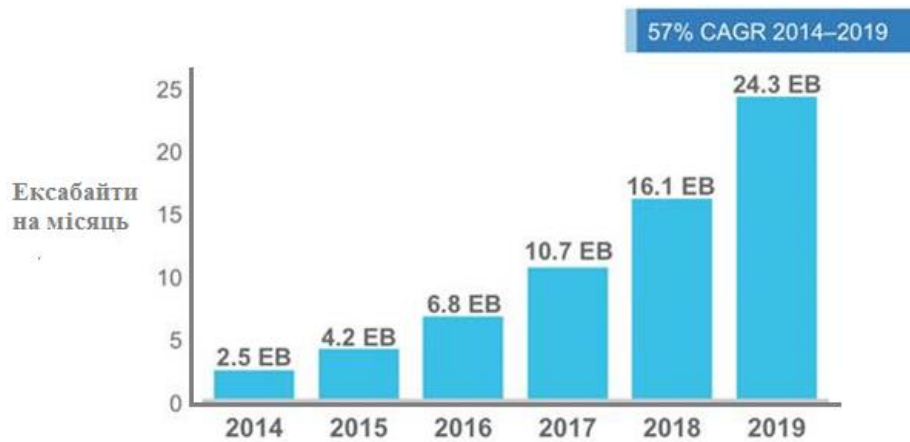


Рис. 1.3. Cisco прогнозує 24,3 ексабайт на місяць від мобільного трафіку

У довгостроковій перспективі такого розвитку з'явиться те, що ми називаємо 5G, тобто набір органічно інтегрованих технологій радіодоступу. 5G (5-е покоління мобільних мереж або 5-е покоління безпроводних систем) - телекомунікаційний стандарт зв'язку нового покоління [32].

Вимоги до 5G систем: безпека для здоров'я людини, енергетична ефективність, якість зв'язку, затримка з'єднання - менше 5 мс [33].

Для забезпечення усіх вимог, що будуть використовуватися в 5G необхідно використання:

1) Масивних МІМО-систем.

Технологія МІМО дає змогу використовувати декілька антен на прийомо - передавачі. Технологія, що успішно застосовується в мережах четвертого покоління, знайде застосування і в мережах 5G. При цьому, якщо в 2014 році в мережах використовується МІМО 2x2, то в майбутньому число антен має збільшитися. Ця технологія володіє особливістю: швидкість передавання даних зростає пропорційно кількості антен, при цьому якість сигналу поліпшується за рахунок прийому сигналу відразу декількома антенами.

2) Сантиметрового і міліметрового діапазонів поширення радіохвиль.

На сьогоднішній час мережі LTE працюють в частотних діапазонах нижче 3 ГГц і вважається, що перехід в більш високі діапазони буде зроблений лише в стандарті 5G. При підвищенні частоти, на якій передається інформація, зменшується дальність мобільного зв'язку. Це закон фізики, обійти його можна лише підвищуючи потужність передавача, яка обмежена санітарними нормами. Відомо, що базові станції мереж п'ятого покоління будуть розташовуватися щільніше, ніж зараз, що викликано необхідністю створити набагато більшу ємність мережі. Перевагою діапазонів десятків ГГц є наявність великої смуги спектру частот. Поширення випромінювання - квазіоптичне, при якому відсутні інтерференція і пов'язані з нею перешкоди.

Однак застосування радіохвиль міліметрового діапазону має і деякі недоліки. Справа в тому, що такі сигнали втрачають енергію при передачі на великі відстані: зокрема, затухання виникає через поглинання електромагнітного випромінювання молекулами кисню і води.

### 3) Мультитехнологічність.

Для забезпечення якісного обслуговування в мобільних мережах 5G необхідна підтримка як вже існуючих стандартів, таких як UMTS, GSM, LTE, так і інших, наприклад, Wi-Fi. Базові станції, що працюють за технологією Wi-Fi можуть застосовуватись для розвантаження трафіку в особливо завантажених місцях.

### 4) D2D (Device-to-device).

Технологія device-to-device дає змогу кінцевим пристроям, що знаходяться неподалік один від одного, обмінюватися даними без участі мережі мобільної 5G, через ядро якої буде проходити лише сигнальний трафік. Перевагою такої технології є можливість перенесення передачі даних в неліцензовану частину спектру, що дасть змогу додатково розвантажити мережу.

Лідером розробок даної технології стає китайська компанія Huawei. Для того, щоб досягти швидкостей передачі даних вище 10 Gbit/s, компанія вкладає близько \$ 600 млн у впровадження технологій безпроводних мереж. Виходячи з того, що нові покоління стандартів стільникового зв'язку з'являлися кожні 10

років, впровадження стандарту 5G можна очікувати в районі 2020. Найімовірніше, розгортання мереж 5G буде проводитися в діапазонах 791-862 МГц, 2,5-2,69 ГГц або в 5 ГГц діапазоні [43-46].



Рис.1.4. Інтегроване поєднання безпроводних мереж в єдине гетерогене середовище

## 1.2. Аналіз існуючих проблем в сучасних мобільних мережах

Як і для 3G так і для 4G покоління характерним є використання просторового ущільнення, що дає можливість досягнути більшої продуктивності мережі за рахунок впровадження великої кількості мікро, піко та фемтокомірок та підвищення коефіцієнта перевикористання частотного спектру [81-83]. Комірки малого розміру являють собою базові станції з меншою потужністю і значно меншим радіусом дії ніж макро базова станція. На теперішній час розгортання мікро комірок відбувається за детермінованим (стаціонарним) методом. Такий метод широко використовується протягом певного часу для планування покриття коміркових систем. Даний методи є ефективними для однорідної топології мережі із фіксованим розміром комірок із врахуванням інтерференції між спільночастотними комірками. Проте, є неефективними для гетерогенних телекомунікаційних мереж, оскільки він використовується тільки моделювання покриття із конкретним розміром комірок. Розгортання мережі в умовах міста із щільною забудовою

ускладнюється за рахунок неоднорідності клієнтського навантаження та нерівномірного загасання корисного сигналу, що порушує фіксовану геометричну структуру мережі. Встановлення додаткових базових станцій за гексагональним шаблоном не дає змоги розрахувати оптимальний розмір комірок для забезпечення необхідних вимог до пропускної здатності системи[84-89].

Трафік, який генерують користувачі невинно зростає. Це зумовлене тим, що ринок постійно оновлюється сучасними девайсами, обслуговування яких вимагає широкосмугового передавання даних. Широкосмуговий доступ забезпечує високу швидкість передавання даних та постійне підключення до інтернету, і можливість як приймати, так і передавати інформацію на високих швидкостях. На сьогоднішній день широкосмуговою вважають передачу зі швидкістю понад 2 Мбіт/с. Нажаль, на сьогоднішній день не завжди є можливість забезпечення такої швидкості абонентам. Це зумовлене тим, що абонентське навантаження є неоднорідним і зазвичай локалізоване ,в той чи інший період часу, в чітко визначених місцях, що є найбільш характерним для міських умов. Тому виникає ситуація, коли одні базові станції є перенавантажені і якість обслуговування їхніх абонентів незадовільна , в той час як інші залишаються практично без клієнтів. Тобто, теперішні системи радіодоступу не орієнтовані на користувача, вони орієнтовані на площу покриття. Сучасні мережі повинні бути спроектовані з орієнтацією на користувача [90-93]. Орієнтоване на абонента проектування може бути охарактеризоване, як багатоступінчастий процес вирішення завдань, який вимагає, від проектувальників аналіз передбачення та поведінку користувачів. Головна відмінність проектування на користувача від інших методів проектування полягає у спробі оптимізувати систему таким чином, щоб користувачі використовували її ресурси так як вони хочуть, замість того, щоб змусити користувачів змінити свою поведінку для пристосування до мережі. Одним із методів застосування такого проектування зміна існуючої архітектури і застосування нерегулярного розподілу комірок в мережі [99].

### 1.3. Перспективна мережа мобільного зв'язку C-RAN

Сучасні мережі мобільного зв'язку побудовані досить складно, що призводить до ускладнення їх масштабування і управління ними, знижує їх надійність. Основними передумовами до появи концептуальних технологій «програмно-визначених» (або «програмно-конфігурованих») мереж (Software-Defined Networking, SDN) і віртуалізації мережевих функцій (Network Function Virtualization, NFV) є, насамперед, зростання обсягів мережного трафіку і кількості пристроїв підключених до телекомунікаційних мереж [42, 101].

В провайдерів телекомунікаційних послуг виникла необхідність в динамічній пріоритезації мережного трафіку. Наприклад, в окремих випадках встановлений вищий пріоритет повинен бути для IPTV-сервісу, а в інших ситуаціях - для VoIP і навпаки [41].

У мережах мобільного зв'язку віртуалізація представляється, за допомогою концептуальної технології Cloud RAN або централізованої (Centralized) системи [25-27]. В даному випадку антени та радіопідсистеми (remote radio heads, RRHs) відокремлюються від базової станції (baseband units, BBUs) і модулів управління, що з'єднуються за допомогою оптичного волокна з блоками RRHs та розташовані в base station hotel (BSH) [56].

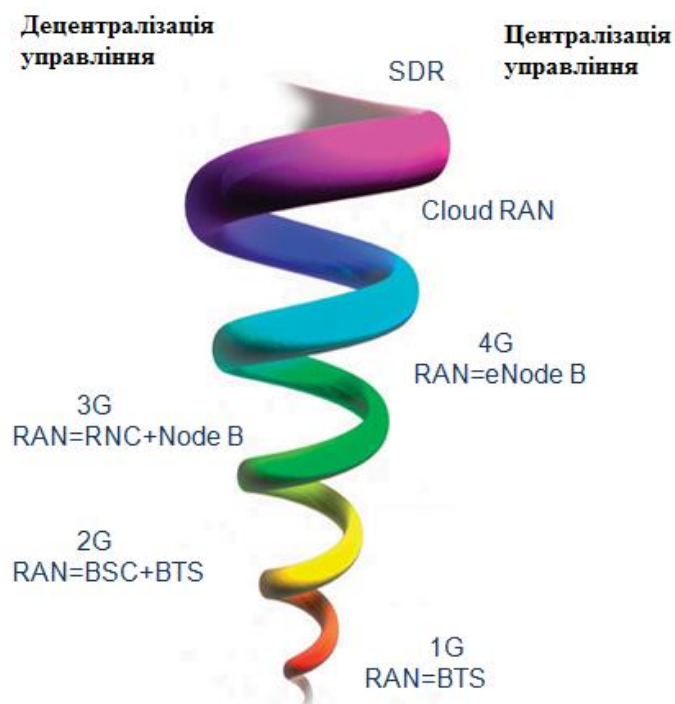


Рис.1.5. Концепції майбутньої гетерогенної мережі Cloud RAN

На рис.1.5. зображена концепція Cloud RAN, що дає змогу використовувати хмарні технології та централізоване управління для підвищення ефективності мережі та покращення якості обслуговування [34].

До стратегічних аспектів технології Cloud RAN відносяться:

- Зменшення експлуатаційних та капітальних витрат на мережу радіодоступу.
- Підвищення енергоефективності за рахунок зменшення споживання електроенергії.
- Підвищення спектральної ефективності мережі радіодоступу.
- Підтримка декількох стандартів RAN, на основі відкритої платформи.
- Збільшення кількості доходів за рахунок введення нових послуг.
- Підвищення якості обслуговування абонентів.
- Технічні аспекти концепції Cloud RAN.
- Зміна конструкції базової станції.
- Інтеграція антени і радіо модуля в єдиному пристрої.
- Централізоване і гнучке управління RAN у всіх діапазонах частот 3GPP.
- Управління базовими станціями віддалено з використанням ЦОД.

Технічні рішення для впровадження технології Cloud RAN були розроблені компаніями Korea Telecom та Huawei [23].

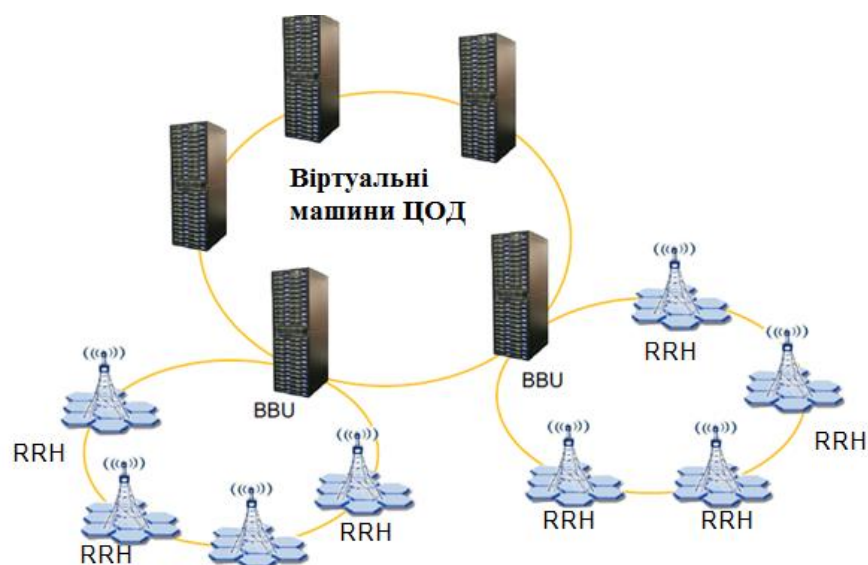


Рис.1.6. Архітектура Cloud RAN запропонована компанією Huawei

На рис. 1.6. представлена архітектура Cloud RAN запропонована компанією Huawei (Cloud baseband - CBB). Основними елементами цього рішення є BBU (broadband unit) широкопasmовий блок та RRH (Remote Radio Head) блок дистанційного радіо управління [21-22].

Архітектура запропонована компанією Huawei дозволяє управляти 1800 базовими станціями (RRH) та об'єднувати до 50 контролерів BBU за допомогою CBB [37].

В області мобільного зв'язку встановлення допоміжних БС після досягнення деякого порогу ущільнення їх розміщення вже не дозволяє суттєво збільшити пропускну спроможність та ємність RAN, тому наступним кроком для підвищення ємності мережі радіодоступу є використання малих комірок (фемто- і пікокомірок). Отже, конфігурування мереж із великим масштабом є складним завданням, що вимагає суттєвих змін у процесі побудови, експлуатації та управління мережами. [35]

Ключовими принципами програмно-конфігурованих мереж є розділення процесів передавання та управління трафіком, централізоване управління мережною структурою шляхом використання уніфікованих та спеціалізованих програмних засобів, віртуалізація мережевих ресурсів та функцій елементів мережі. Протокол OpenFlow дає змогу реалізувати незалежний від виробника інтерфейс між логічним контролером та транспортом мережі та є реалізацією концепції програмно-конфігурованої мережі [77-79].

У концепції SDN за рахунок перенесення функцій управління відбувається фізичне розділення рівня управління мережею (network control plane) від рівня передавання даних (forwarding functions) [80].

У результаті отримуємо гнучку, керовану, адаптивну та економічно ефективну архітектуру, що дає змогу ефективно адаптуватися для передавання великих потоків різноманітного трафіку [67].

Основними ідеями SDN є:

- розподіл проходження трафіку (data plane) і сигналізації / управління (control plane);
- спрощення мережевих елементів рівня data plane;

- єдиний, уніфікований, незалежний від виробника інтерфейс між рівнем управління та рівнем передавання даних;
- централізоване керування мережею за допомогою SDN контролера;
- віртуалізація ресурсів мережі та мережних функцій [ 70].

Таким чином, SDN здійснює розподіл площини управління та транспорту, що дає змогу забезпечити централізацію управління розподіленою мережею та підвищити ефективність використання ресурсів та автоматизацію управління мережевими сервісами. NFV зосереджена на оптимізації мережних сервісів всередині інфраструктури за рахунок розділення мережних функцій (наприклад, DNS, кешування та ін.) [13]. NFV дозволяє прискорити впровадження нових сервісів і функцій мережі та не потребує відмови від вже розгорнутої мережної структури [39].

Протокол OpenFlow дає змогу програмному забезпеченню SDN взаємодіяти з відповідними елементами мережі - маршрутизаторами і комутаторами через відкриті API. Функція віртуалізації мережі може працювати на одній або декількох віртуальних машинах (сервери, системи зберігання, перемикачі, фаєрволи). NFV дає змогу програмувати сервіси, що раніше були доступні тільки у вигляді апаратних рішень SDN та спростити конфігурацію мережі, масштабувати мережі і сервіси за запитом, автоматизувати управління мережею, збільшити потужність фізичного рівня за рахунок накладення віртуального [47-50].

Існує два стратегічні напрями впровадження SDN, NFV і хмарних технологій [20]. Перший пов'язаний з підвищенням ефективності мережі та гнучкості послуг. Головна мета - зниження вартості експлуатації мережі і скорочення часу виходу на ринок. Другий націлений на отримання переваг від поєднання нових бізнес-можливостей. Мета в цьому випадку інша - формування нових диференційованих хмарних сервісів і динамічне, залежне від поточного профілю попиту їх надання [57-60].

Майбутній розвиток стільникових мереж пов'язаний із використанням хмарних технологій, використання яких потребує змін правил регулювання у галузі та бізнес-моделі, які використовуються операторами [30, 36].



Впровадження концепції мультитехнологічної та мультидіапазонної побудови мереж мобільного зв'язку буде ґрунтуватися на хмарних технологіях: програмно-конфігурованих мереж радіодоступу (SDR) і (SDN), що реалізуються на ЦОД не тільки інфраструктурних операторів зв'язку [97].

Планування мереж стільникового зв'язку є складним процесом, що передбачає багато аспектів, а не лише частотно територіальне планування роботи базових станцій мережі в умовах внутрішньосистемних перешкод.

#### **1.4. Розвиток та впровадження гетерогенних мобільних мереж HetNet**

Стрімке зростання клієнтського трафіку в мережах мобільного зв'язку, зміна його характеру і структури потребують безперервного і значного збільшення пропускної спроможності цих систем.

Побудувавши за останні роки на одній території мережі мобільного зв'язку декількох радіо технологій (GSM / GPRS / EDGE, WCDMA / HSPA, LTE), телекомунікаційні оператори стоять перед важким завданням подальшого їх майбутнього розвитку при одночасному забезпеченні економічної ефективності. Гранично ефективне використання частотного радіоспектра, мережевих технологій і інфраструктури стає важливим питанням для досягнення успіху мережевих компаній. Технології радіоінтерфейсів практично досягають теоретичних меж каналної пропускної здатності, і наступним шляхом для підвищення ємності мережі є просторове ущільнення та вдосконалення методів управління розподілом радіоресурсу.

Різнорідними або гетерогенними безпроводними мережами зв'язку (HetNet) називають системи, які застосовують різні технології безпроводного доступу, функціонують в декількох частотних діапазонах, мають багаторівневу структуру і використовують у своїй топології комірки різного розміру [94].

Гетерогенні мобільні мережі забезпечують можливість оптимізації витрат та підвищення якості послуг, шляхом вибору технології передавання, смуги частот і архітектурного рівня, які є найоптимальнішими для конкретного завдання . Застосування комірок малого радіусу (Small Cells) поряд з «великими» макро комірками дає змогу зменшити відстань від базової станції

(БС) до клієнтського пристрою (UE), знизити випромінювану UE потужність, зменшити рівень інтерференції в системі, збільшити спектральну ефективність, покращити якість сприйняття (QoE) послуги та збільшити спектральну ефективність.

Серед передумов виникнення HetNet, крім наявності в телекомунікаційного оператора декількох мереж із різними технологіями, обмеженості частотного ресурсу, а також широкого поширення багаторежимних, багатодіапазонних користувальницьких терміналів, варто виділити нерівномірність територіального розподілу абонентського трафіку в мережі [20].

На відміну від ідеалізованої моделі в реальних мережах абоненти користуються послугами зв'язку та генерують трафік нерівномірно, а в зонах його концентрації. Зниження мобільності абонентів, що використовують пакетну передачу даних, по відношенню до голосових, користувачам підвищує нерівномірність розподілу трафіку. Вона спостерігається не тільки на рівні мережі в цілому, але і на рівні окремих комірок.

Практично в кожній комірці є кілька точок концентрації трафіку. За даними різних операторів, 50 - 80% трафіку генерується на 10 - 15% від площі всієї мережі, і 40 - 50% - створюється 2 - 3% користувачів. Використання гетерогенних мереж, зокрема використання комірок малого радіусу в місцях концентрації трафіку, дає змогу ефективно вирішити проблему забезпечення ємності мережі.

Класична архітектура мобільних мереж побудована базовими станціями з приблизно однаковими параметрами потужності, територіями обслуговування і клієнтської ємності [21]. Потреба в оптимізації мобільних мереж, викликана нерівномірністю розподілу абонентів (трафіку) по території, що обслуговується і наявністю ділянок з недостатнім покриттям, одночасно з вимогою економічної ефективності, привела до застосування базових станцій з різними технічними характеристиками [31].

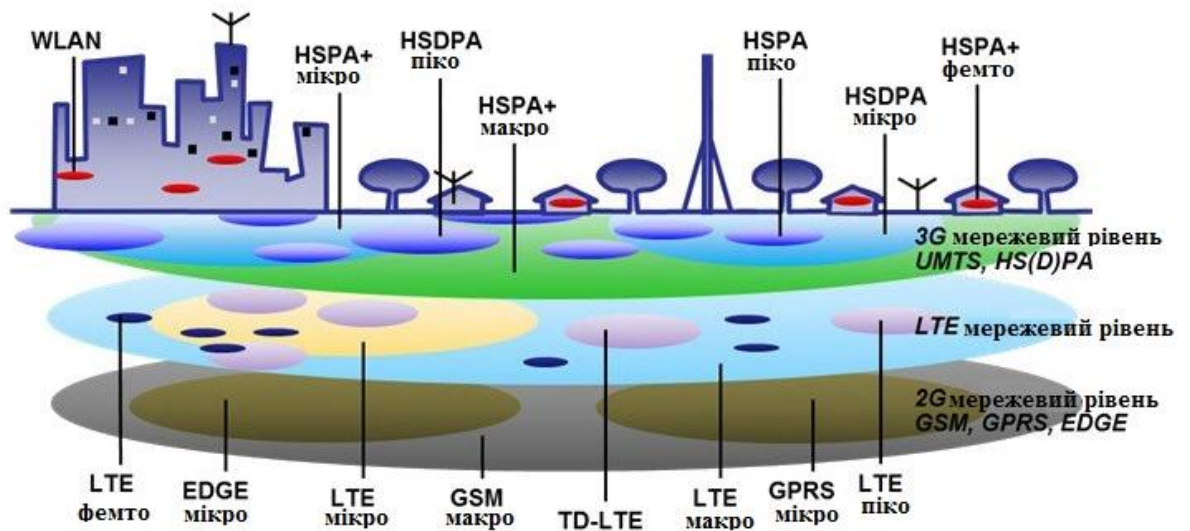


Рис. 1.7. Архітектура гетерогенної мобільної мережі (HetNet)

На рис.1.7. представлена структура гетерогенної мережі, яка дає змогу розширити виробничі потужності та ґрунтується на фактичному, а не прогнозованому, значенні попиту на конкретний трафік даних.

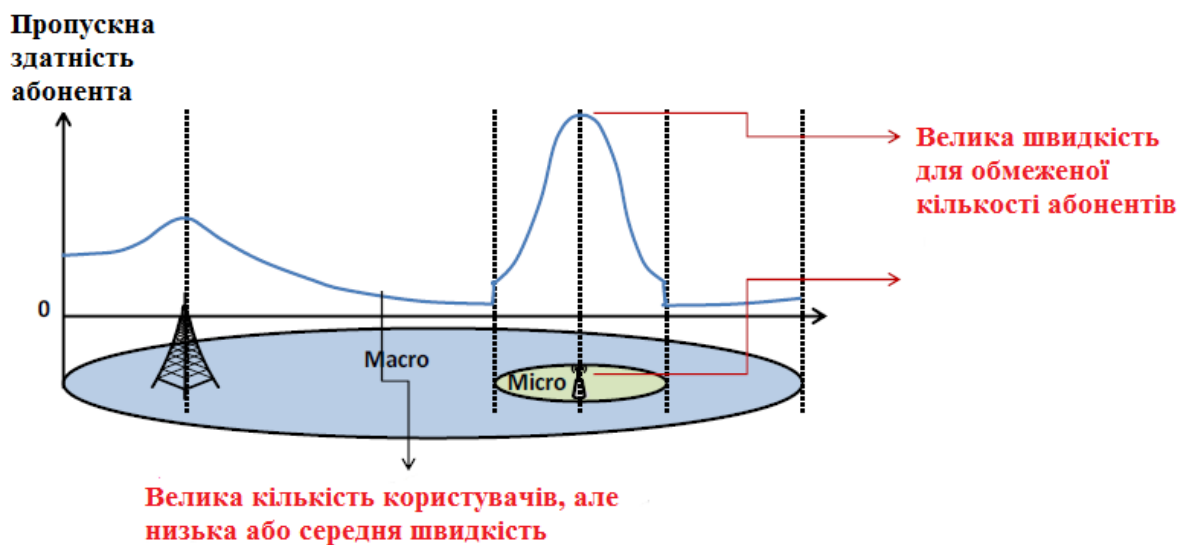


Рис.1.8. Принцип роботи гетерогенної мережі з різним комірками (HetNet)

Прийнято виділяти такі типи вузлів радіомережі в складі HetNet відповідно до вирішуваних ними завдань: макро-, мікро-, піко- і фемто-базові станції, віддалені приймачі (RRH) і ретранслятори (relay)[22]. Нижче показано класифікація та опис їх технічних характеристик (рис.1.9).

<p>Всередині приміщення 10-100 мВт          Поза приміщенням 0,2-1 Вт          Радіус дії: десятки метрів</p>	
<p>Всередині приміщення 10-100 мВт          Поза приміщенням 0,2-1 Вт          Радіус дії: десятки метрів</p>	
<p>Всередині приміщення &gt;10 Вт          Поза приміщенням &gt;10 Вт          Радіус дії: одне приміщення</p>	
<p>Всередині приміщення 100-250 мВт          Поза приміщенням 1-5 Вт          Радіус дії: десятки метрів</p>	
<p>Всередині приміщення немає          Поза приміщенням 5-10 Вт          Радіус дії: сотні метрів</p>	
<p>Всередині приміщення немає          Поза приміщенням &gt;10 Вт          Радіус дії: кілометри</p>	

Рис.1.9. Класифікація типів вузлів радіомережі

Розподіл трафіку в багаторівневій мережі, управління мобільністю і смністю мережі це цілий клас взаємопов'язаних (і часто суперечливих) завдань, оптимальне вирішення яких можливе лише при комплексному підході. Рішення забезпечується продуманим частотним плануванням, а також розробкою і застосуванням політик розподілу трафіку за рівнями HetNet [23]. Принципи вибору того чи іншого шару БС, частоти, технології для обслуговування абонентського терміналу з урахуванням його місця розташування, швидкості руху, завантаження радіоінтерфейсів БС, інших мережевих умов.

При реалізації HetNet необхідно вирішити ряд технічних завдань: планування мережі, боротьба з внутрішньо інтерференцією, організація транспортної мережі (backhaul), управління мережею та самоорганізація, управління мобільністю, тощо.

## 1.5. Критерії для ефективного управління ресурсами гетерогенної мережі

Управління мобільністю є основною проблемою в мультисервісній гетерогенній мережі. Вона складається з двох компонентів: управління розташування і управління передачі обслуговування [39]. Управління розташуванням відстежує і знаходить мобільний пристрій (User Equipment, UE) для успішної доставки інформації. Управління передачею обслуговування підтримує активні зв'язки для роумінгу UE, щоб вони могли змінювати свою точку підключення в мережі. Безмежна мобільність може бути досягнута шляхом надання UE проводити безшовні передачі обслуговування через гетерогенні безпроводні доступні мережі, наприклад, через мобільний Wi-Fi, LTE, Cloud-RAN, UMTS, GSM.

Кожен UE в будь-який час в межах діапазону, щонайменше, приєднаний до однієї базової станції або точки доступу (ТД). Критерієм для визначення, яка з точок приєднання є найбільш оптимальним рішенням для надання запитуваного сервісу в будь-якому конкретному місці і моменті часу для UE, є вибір базової станції або точки доступу, яка дає максимальну потужність сигналу. Цей вибір відповідає вимогам QoS і зазвичай також максимізує якість зв'язку за умови, що жодного іншого погіршувального сигналу не існує.

Коли UE відходить від базової станції або точки доступу, то рівень сигналу зменшується, і з'являється необхідність перемикання зв'язку в іншу БС або ТД. Передача обслуговування є механізмом, за допомогою якого буде тривати зв'язок між UE і відповідним терміналом, передаючи з'єднання від однієї точки мережі в іншу [25]. Тобто, передача обслуговування являє собою механізм, за допомогою якого UE зберігає з'єднання активним, коли він мігрує із зони покриття однієї мережі точки кріплення до іншої.

Передача обслуговування являє собою складний процес, який включає в себе кілька важливих питань, таких, як контроль, методологія, алгоритми, метрики, протоколи та показники ефективності. У центрі уваги цієї роботи є алгоритм вирішення передачі обслуговування та суміжної метрики. Опис метрик більш детально розкритий в цьому розділі, коли буде описано процеси

передачі обслуговування. Але для початку розписані особливості та класифікація хендовера, для того щоб зрозуміти процеси передачі обслуговування.

*Аналіз особливості та класифікація хендовера.* Передачі обслуговування можна класифікувати використовуючи тип мережі, тобто на горизонтальні (всередині системи) і вертикальні (міжсистемні) випадки, коли UE переміщається в межах або між різними технологіями. Рис. 1.10 показує горизонтальні і вертикальні передачі обслуговування [28] Комірка В і комірка С використовує одну і ту ж мережеву технологію, в той час як комірка А і В використовує різні технології мережі.

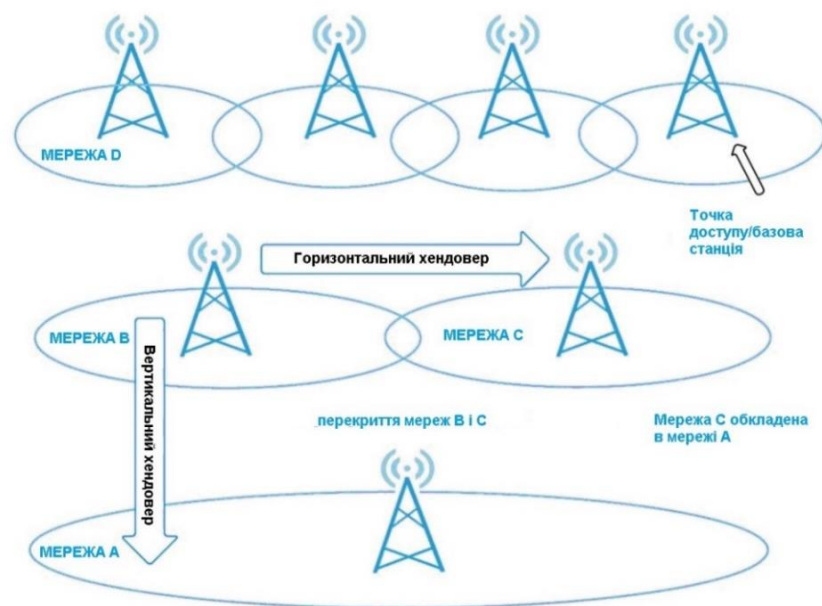


Рис. 1.10. Вертикальний і горизонтальний хендовер

Горизонтальна передача обслуговування або внутрішньосистемна передача обслуговування є передачами обслуговування, які відбуваються між точками доступу або базовими станціями тією ж технологією мережі. Іншими словами, горизонтальна передача обслуговування відбувається між однорідними осередками системи безпроводного доступу. Наприклад, перехід від передачі сигналу UE з IEEE 802.16e БС до географічно сусідньої IEEE 802.16e БС являє собою горизонтальний процес передачі обслуговування. Мережа автоматично обмінюється і бере на себе відповідальність покриття з однієї точки кріплення до іншої кожен раз, коли UE переходить з однієї

комірки в сусідню, яка підтримує ту ж технологію мережі. Горизонтальні передачі обслуговування є обов'язковими, так як UE не може продовжувати свій зв'язок без його виконання.

Вертикальна передача обслуговування або міжсистемні передачі обслуговування є передачами обслуговування, які відбуваються між різними точками з'єднання, що належать до різних мережевих технологій. Реалізація вертикальних передач обслуговування є більш складним у порівнянні з горизонтальними передачами обслуговування через різні характеристики доступних мереж.

В цілому, існує два типи вертикальної передачі обслуговування: "вгору і вниз". Вертикальна передача «вгору» - це передача обслуговування до безпроводної мережі з великим розміром охоплення і низькою пропускнуою здатністю. Вертикальна передача обслуговування «Вниз» - це передача обслуговування до безпроводної мережі з меншим розміром охоплення і збільшеною пропускнуою спроможністю. Таким чином, мобільний пристрій, що виконує вертикальну передачу «вгору» відключається від мережі, що забезпечує меншу зону покриття і більш високу швидкість передачі обслуговування (наприклад, WLAN) на новий, що забезпечує більш широке охоплення, але низьку швидкість передачі обслуговування (наприклад, WWAN), в той час як мобільні пристрої, що виконують вертикальну передачу «вниз» відключаються від мережі, що забезпечує широку область охоплення і меншу швидкість передачі обслуговування до нової, яка забезпечує обмежене охоплення, але більш високу швидкість передачі обслуговування [94-96].

Передачі обслуговування можна охарактеризувати, як «м'яка» або «жорстка». «Жорстка» передача обслуговування відбувається, якщо UE може бути пов'язаний тільки з однією точкою приєднання одночасно. Іншими словами, UE може створювати нове з'єднання в цільовій точці приєднання після того, як старе з'єднання було зірвано.

«М'яка» передача обслуговування відбувається, якщо UE може взаємодіяти з більш ніж однією точкою приєднання під час передачі обслуговування. У цьому випадку з'єднання UE може бути створене в цільовій

точці приєднання, до того як стара точка з'єднання буде від'єднана. Наприклад, МП, оснащені кількома мережевими інтерфейсами, можуть одночасно підключатися до кількох точок доступу в різних мережах під час м'якої передачі обслуговування.

Безшовна передача обслуговування означає, що перехід до нової мережевої точки приєднання є прозорим для користувача (немає помітного зниження рівня QoS).

*Процес передачі обслуговування. Процес хендовера.* Обидва, горизонтальний і вертикальний процеси передачі обслуговування, можна розділити на три послідовні етапи: збір інформації про доступні мережі (ініціація), прийняття рішення про передачу обслуговування, і здійснення передачі обслуговування. Існують різні алгоритми передачі обслуговування, які можуть бути використані, щоб завершити поточний процес передачі обслуговування.

*Збір інформації про доступні мережі.* Виявлення мережі є процесом, в якому мобільний пристрій (МП) оснащений декількома інтерфейсами для пошуку мереж безпроводного доступу. Коли багаторежимний UE рухається по мережі, він повинен виявити мережі з різними технологіями доступу в його межах, які можуть бути кращими для використання в даний час. Наприклад, багатомодовий МП, що використовує мережу UMTS в системі гетерогенної мережі, виявляє мережі Wi-Fi, коли вони стануть доступними і можливими для передачі обслуговування. Передача обслуговування відбувається в наступних умовах: якщо мережі є пріоритетнішими для оператора або користувача і якщо радіосигнал в UMTS починає значно погіршуватися. Фаза виявлення мережі збирає інформацію про мережу, мобільні пристрої, точки доступу та налаштування користувача, які будуть оброблятися, і використовуватися для прийняття рішень на стадії прийняття передачі обслуговування.

*Ухвалення рішення про передачу обслуговування.* Ухвалення рішення про передачу обслуговування - це можливість вирішити, коли виконувати горизонтальну або вертикальну передачу обслуговування і визначити кращу мережу серед кандидатів на передачу доступу. Вона включає в себе вибір



мережі доступу і приводить в дію переходи. Припустимо, МП, який використовує мобільний UMTS, виявив ще доступні сусідні Wi-Fi мережі. Наступне питання полягає, чи потребує UE ініціювати передачу обслуговування до виявленої Wi-Fi мережі. Існують різні алгоритми рішення вертикальної передачі обслуговування, які можна використовувати, щоб зробити правильне рішення передачі обслуговування триваючого зв'язку.

Метрики передачі обслуговування використовуються для вирішення, потрібна чи ні передача обслуговування. Ухвалення рішення про передачу обслуговування в традиційних горизонтальних передачах обслуговування, які відбуваються в гомогенних мережах використовується метрика RSS і доступності каналу передача обслуговування виконується, якщо RSS сусідньої БС перевищує RSS поточної БС на задане граничне значення.

Традиційний алгоритм прийняття рішення про передачу обслуговування використовує вимір RSS, щоб прийняти рішення передачі наступним чином:

- прийнятий сигнал: вибирає БС, у якій сигнал надходить з кращим рівнем сигналу (вибрати базову станцію  $V_{new}$ , якщо  $RSS_{new} > RSS_{old}$ );
- прийнятий сигнал з порогом: передача обслуговування виконується, якщо RSS нової БС перевищує сигнал поточної БС нижче порогового значення  $T$  (вибрати  $V_{new}$ , якщо  $RSS_{new} > RSS_{old}$  і  $RSS_{old} < T$ );

У вертикальних передачах обслуговування, багато мережевих характеристик впливають на те, чи відбудеться передача обслуговування чи ні. Традиційні метрики рішення передачі обслуговування на основі індикації прийнятої потужності сигналу (RSSI) і інших параметрів фізичного рівня, використовуваних для горизонтальної передачі обслуговування в стільникових системах, є недостатніми для гетерогенних безпроводних систем нового покоління. Таким чином, критерій RSS не може бути використаний для вирішення вертикальної передачі обслуговування, оскільки RSS з різних мереж не можуть бути співставлені безпосередньо в зв'язку з різними характеристиками накладення гетерогенних безпроводних мереж [28]. Для того щоб виконати інтелектуальні рішення передачі обслуговування в гетерогенному середовищі і забезпечити безвідмовну вертикальну передачу

обслуговування, необхідно врахувати наступні показники, які представлені на рис. 1.11:



Рис. 1.11. Критерії для рішення запуску вертикального хендовера

(а) Якість обслуговування. Передачу до мережі з кращими мережевими умовами і більш високою продуктивністю, як правило, забезпечують поліпшені рівні обслуговування.

1) Умова мережі. Пов'язані з мережею параметри, такі як мобільність, доступна смуга пропускання, затримки в мережі і перевантаженість (втрата пакета), повинні бути розглянуті для ефективного використання мережі.

2) Продуктивність системи. Щоб гарантувати системну роботу і надавати поліпшені сервісні обслуговування, безліч параметрів можуть вимірюватися і використовуватися в рішеннях про передачу обслуговування, такі як RSS, особливості поширення каналу, втрата шляху, міжканальне втручання, відношення сигнал-шум (SNR - signal- to-noise ratio) і частота помилок по бітам (BER - bit error rate).

(б) Вартість послуг. Вартість запропонованих послуг є одним з основних моментів для користувача, так як різні мережеві оператори і постачальники послуг можуть використовувати різні плани і стратегії білінгу, які можуть вплинути на вибір користувача мережі, а отже і на рішення.

(в) Заряд акумулятора. Заряд батареї може бути суттєвим фактором для передачі обслуговування в деяких випадках, так як безпроводні пристрої працюють на обмеженому споживанні від батареї. Наприклад, коли рівень

заряду батареї зменшується, підключення до мережі з малим енергоспоживанням було б найкращим рішенням.

(г) Безпека. Здатність мережі (в тому числі операторів мереж і корпоративних мереж), щоб протистояти нападу від вірусних програм, зловмисників і хакерів, в тому числі захист мережевої інфраструктури, послуг, конфіденційності та цілісності даних клієнтів є важливим питанням, і іноді може стати вирішальним фактором у виборі мережі. Найбільш значним джерелом ризиків в безпроводних мережах є те, що основне комунікаційне середовище технології - це радіохвиля, відкрита для зловмисників. Мережа з високим шифруванням переважає, коли інформація, що передається є конфіденційною.

(д) умови мобільного терміналу. Умови мобільного терміналу включають розмір екрану, мобільність, продуктивність (обчислювальна потужність, пам'ять і місце для зберігання), вимоги до пропускну здатності, підтримка мережі і динамічні чинники, такі як швидкість, і інформація про місцезнаходження. Швидкість UE більше впливає на рішення в вертикальних передачах обслуговування, ніж на горизонтальних. Передача у вкладеній мережі в накладеній архітектурі гетерогенної мережі не рекомендується при русі на високій швидкості, так як незабаром знову доведеться робити передачу обслуговування до початкової мережі, коли UE знову вийде із зони покриття гетерогенної мережі.

(е) користувацькі налаштування. Користувацькі налаштування (такі як пріоритет оператора мережі, тип технології, краща максимальна вартість) можуть бути використані для задоволення спеціальних запитів для певного типу мережі. Наприклад, якщо цільова мережа, до якої мобільний вузол виконує передачу обслуговування, не пропонує високий рівень безпеки, користувач може все-таки вирішити використовувати існуючу мережу. Залежно від покриття, можливо користувач побажає використовувати безпечну і дорогу мережу (наприклад, LTE) для його трафіку, але все ще може використовувати більш дешеву мережу (наприклад, WLAN) для доступу до веб інформації.

(ж) типи додатків. Різні типи додатків або сервісів, таких як передача голосу, даних і мультимедійних додатків вимагають різні рівні швидкості передачі даних, мережевих затримок, надійності і безпеки. Дані програми, такі як потокове відео, працюватимуть краще, якщо пропускна здатність буде високою. Додаткам, які працюють в реальному часі, необхідна мінімальна затримка мережі, а ті додатки, які працюють не реальному часі, не так чутливі до затримок мережі.

*Здійснення передачі обслуговування.* Цей етап виконує процедуру вертикальної передачі, тобто пов'язує мобільний пристрій з новою мережею безпроводного доступу. Виконання передачі обслуговування вимагає фактичної передачі пакетів даних на новому безпроводному зв'язку для того, щоб перенаправити шлях з'єднання мобільного пристрою до нової точки приєднання. Він може бути реалізований за допомогою протоколів, таких як Mobile IP і протоколу управління передачею потоків.

*Аналіз існуючих підходів щодо управління ресурсами та проблеми в задачах для забезпечення ефективного зв'язку в гетерогенних мобільних мережах.*

В роботі [102] запропоновано метод вибору мережі призначення процедури вертикального хендоверу в гетерогенних мобільних радіосистемах зі здатністю реконфігуруватися, побудованих на основі технології Software Defined Radio , який демонструє роботу алгоритму прийняття рішення і підкреслює той факт, що рішення приймається не на основі абсолютної переваги тієї чи іншої альтернативи, а на основі різниці значень поточного і альтернативного варіанта, мінімізуючи кількість міжсистемних хендоверів, що спричиняють додаткове навантаження на систему. Проте, у роботі не враховано комплексного критерію, який базується на групі QoS-залежних критеріїв та таких, що залежать безпосередньо від властивостей радіоінтерфейсу мережної системи, яке передбачає можливість адаптування правил прийняття рішень в процесі роботи мереж. Також не оцінено обчислювальних витрат і витрат часу на прийняття рішення згідно запропонованого методу, що є важливим для забезпечення необхідного QoS.

У роботі [103] пропонується модифікація мультикритеріального методу вертикального хендовера. Для модифікації методу вертикального хендовер запропоновано використовувати саме два мультикритеріальних методи прийняття рішень:

Перший - TOPSIS для одиночних викликів, так як він має концептуальну простоту і хорошу ефективність обчислень, а також можливість вимірювати відносну продуктивність для кожної альтернативи, а також забезпечує високу пропускну здатність і зменшує втрату пакетів. Другий - MULTIMOORA для групових викликів, так як цей метод володіє потужною технікою ранжирування мереж шляхом об'єднання трьох підходів ранжирування: системи відносин, системи точок відліку і мультиплікативну форму за допомогою теорії домінування, а також високу точність прийняття правильного рішення при вертикальному хендовері в умовах високих швидкостях пересування мобільних вузлів через гетерогенну мережу. Проте складність інтеграції цих алгоритмів та виведення необхідного результату вимагає великих обчислювальних ресурсів.

В іноземних роботах в напрямку дослідження алгоритмів прийняття рішення щодо ініціації вертикального передавання обслуговування (хендоверу) найосновнішими є три публікації. Перша ґрунтується на алгоритмах багатокритеріального прийняття рішення щодо ініціації міжсистемного хендоверу, у яких різні параметри агрегуються у функції вартості [104]. Друга передбачає оброблення вхідних параметрів за математичними алгоритмами на основі марківських процесів прийняття рішень стосовно переключення між мережами, наприклад, як у [105]. Третя основана на використанні механізмів нечіткої логіки, приклади рішень на основі нечіткої логіки представлені у [29, 75, 76, 106]. Проте у цих роботах критеріями вибору мережі доступу розглядали лише декілька параметрів, які не дають змогу враховувати в процесі оцінки значну множину критеріїв і адаптувати правила прийняття рішень в динамічному режимі роботи.

Завдання оптимізації мережі мобільного зв'язку шляхом оптимальної кластеризації вже досліджувались авторами для умов певного телекомунікаційного оператора [77]. Також досліджувалися питання

забезпечення показників якості в конвергентних мережах GSM/Wi-Fi [38] та в домені пакетної комутації мобільних мереж третього покоління [79]. Але в умовах складної гетерогенності та мультиоператорності пріоритетним завданням є ефективне управління спільними радіоресурсами і забезпечення безшовного пересування абонента, включаючи мобільність, хендовер, параметри QoS, захищеність даних та білінг.

У статті [80] запропоновано комплекс методів для управління якістю обслуговування потоків у гетерогенному мобільному середовищі. Проаналізовано основні проблеми контролю якості комплексної мережі, пов'язані з залученням додаткових ресурсів для обслуговування користувачів. Запропоновано підхід щодо керування системою обслуговування мобільних користувачів, яка складається з власної інфраструктури оператора мобільного зв'язку та орендованих підсистем обслуговування. Проте не досліджено питання спільного управління існуючими мережами для забезпечення QoS з використанням технології Big Data та підвищення продуктивності гетерогенної мережі.

Провівши літературний огляд, виявлені наступні не вирішені завдання ефективного безвідмовного зв'язку, які необхідно розв'язати:

- перемикання між різними типами безпроводних мереж за критерієм рівномірності завантаження. Рівень радіосигналів залежить від кількості девайсів. Тому в залежності від зміни кількості девайсів в межах однієї станції рівень сигналу змінюється. І необхідно в першу чергу рівномірно розподілити UE по базових станціях або точках доступу;
- перемикання між різними типами безпроводних мереж, з огляду на різні критерії мережі. У зв'язку з тим, що мережі, які зустрічаються в шляху МП, можуть бути різними, тобто мережа гетерогенна. Необхідно розробити інтелектуальний алгоритм передачі обслуговування, який враховує різні критерії МП. Це завдання є основним у даній дисертаційній роботі;
- відсутність мережі в проблемній області. Проблема область - це зона де спостерігається погіршення якості обслуговування. Можуть бути такі

ситуації, коли в області немає мережі з різних причин (вихід з ладу БС, не міська місцевість і т.д.) або є, але не відбувається плавне переключення.

## **1.6. Висновки до розділу 1**

В даному розділі проведено аналіз технологій мобільного зв'язку. Визначено, перелік вимог необхідних для забезпечення необхідної якості обслуговування абонентам. Стрімке зростання клієнтського трафіку в мережах мобільного зв'язку, зміна його характеру і структури потребують безперервного і значного збільшення пропускної спроможності цих систем. Технології радіоінтерфейсів практично досягають теоретичних меж каналної пропускної здатності, і наступним шляхом для підвищення ємності мережі є просторове ущільнення та вдосконалення методів управління розподілом радіоресурсу. Для досягнення більшої продуктивності мережі запропоновано використовувати гетерогенні мережі із комірками різних розмірів.

## РОЗДІЛ 2. МЕТОД ТА АЛГОРИТМИ АДАПТИВНОГО УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В БЕЗПРОВІДНИХ ГЕТЕРОГЕННИХ МЕРЕЖАХ

### 2.1. Формалізація завдання забезпечення ефективного функціонування гетерогенної мережі радіодоступу

Задача побудови ефективних безпроводних мереж в заданому просторі для функціонування та роботи мобільних пристроїв в гетерогенній мережі.

Вихідні умови завдання:

Нехай:

- задано замкнутий простір  $\Omega$ ;
- простір  $\Omega$  складається з  $\Omega \rightarrow \Omega^P \cup \Omega^{nP}$ ,  $\Omega^P$  - де простір, покритий безпроводними технологіями,  $\Omega^{nP}$  - непокритий простір (мертві зони, зони, де фізично немає або вийшли з ладу базові станції або точки доступу, тощо)
- у просторі  $\Omega$  діє безпроводна гетерогенна мережа (або гетерогенна мережа, що складається з  $S$  мереж радіодоступу та набору з'єднань  $n=1,2,\dots,N$ ), кожна з яких складається з окремих станцій трансляцій, тобто є сукупністю станцій різнорідних безпроводних зв'язків з різними характеристиками:

$$S = \{S_i\}, i = 1, \dots, n \quad (2.1)$$

Де  $S$  – різнорідні базові станції або точки доступу в гетерогенному середовищі,  $i$  - кількість станцій.

$\Omega^P$  простір покритий безпроводними станціями, що складається з:

$$\Omega^P = \Omega_1 \cup \Omega_2 \cup \Omega_3 \dots \cup \Omega_k, k = 1, \dots, m. \quad (2.2)$$

$k$  – кількості простору, який покрито мережею. Суть полягає в тому, що якщо кількість мобільних пристроїв збільшиться і якість сигналу зменшиться, то можуть утворюватись мертві зони, які в свою чергу зменшать  $\Omega^P$ . З цього випливає, що простір  $\Omega^P$  залежить від кількості мобільних пристроїв в конкретній зоні.



Кожна станція безпроводного зв'язку  $S_i \in S$  має ряд характеристик

$$\chi(S_i) = \{\chi_{i1}, \chi_{i2}, \dots, \chi_{ij}, \dots, \chi_{in}\}, \quad (2.3)$$

де  $\chi(S_i)$  – характеристики базових станції або точок доступу,  $n$  – загальна кількість характеристик.

*Перелік характеристик складає:*

1.  $\chi_{ih}$  – радіус поля дії потужності енергії не менше  $\Delta$ , тобто мережа безпроводного зв'язку має обмежений радіо-ресурс – з радіусом дії  $P_S$ ;
2.  $\chi_{ij}$  – величина енергії поля у випадковій точці  $x$ , радіуса поля дії;
3.  $\chi_{ik}$  – рівень надійності зв'язку (тобто безвідмовність),
4.  $\chi_{il}$  – рівень захищеності зв'язку (тобто безпеки для виконання завдань),
5.  $\chi_{im}$  – рівень енергетичної потужності станції;

В описі використовуємо позначення  $h, j, k, l, m$  для того, щоб зобразити різновид характеристик базових станції або точки доступу, які входять в склад характеристик.

$\chi_{im} = S_i(D)$  — це кількість і перелік мобільних пристроїв в мережі  $S_i$  яка має характеристику  $\chi_{im}$ ;  $\chi_{im=BS_i}(D_f)$  — бінарна величина, яка дорівнює 1, якщо мобільні пристрої  $D_f$  розподілені в мережу станції  $S_i$ , а інакше рівна 0;

В просторі  $\Omega$  під впливом дії безлічі станцій безпроводного зв'язку  $CV$  існують безліч мобільних пристроїв, які функціонують у вільному режимі (без навантаження), або виконують робочі операції (чи завдання) як роздільно – в поодинці, так і разом. Нехай цими пристроями є:

$$D = D_1, D_2, \dots, D_f, \dots, D_m \quad (2.4)$$

де  $m$  - кількість мобільних пристроїв,  $f$  – позиція мобільного пристрою, який входить до складу мобільних пристроїв.

*Характеристики пристроїв такі:*

Кожен пристрій  $D_f \in D$  має ряд характеристик

$$\eta(D_f) = \{\eta_{f1}, \eta_{f2}, \dots, \eta_{fj}, \dots, \eta_{fn}\}, \quad (2.5)$$

де  $\eta_f$  - характеристики мобільного пристрою  $D_f$ .

Перелік характеристик складає:

$\eta_{fj}$  – радіус поля перехоплення сигналу зв'язку, при якому потужність сигналу не менше  $\delta$ , якщо мобільні пристрої  $D_f$  розподіляються в мережу станції  $S_i$ , вони використовують її ресурс у розмірі  $r_{SD}$ ;

$\eta_{fc}$  – це мінімальний ресурс, необхідний для забезпечення вимог QoS послуг;

$\eta_{fk}$  – величина потужності сигналу захоплення в довільній точці  $x$  радіусу дії поля;

$\eta_{fl}$  – рівень надійності захоплення зв'язку (тобто безвідмовність),

$\eta_{fm}$  – рівень захищеності зв'язку (тобто безпеки, виконання завдань),

$\eta_{fh}$  – рівень енергетичної потужності станцій;

$\eta_{in} = S_i(D_f)$  – це кількість і перелік мобільних пристроїв в мережі станції  $S_i$ ;

$\eta_{in} = BS_i(D_f)$  – бінарна змінна, яка дорівнює 1, якщо мобільний пристрій  $D_f$  розподілений в мережі станції  $S_i$ , а інакше – дорівнює 0; і т. д. В описі використані позначення  $j, c, k, l, m, h, s$  для того, щоб показати різновид характеристик мобільних пристроїв, які входять в склад характеристик.

Кожен пристрій  $D_f \in D$ , може бути в трьох станах:

$$S(D_f) = \{S^0, S^F, S^R\}, \quad (2.6)$$

Де  $S^0(D_f)$  – не функціонує (не включений, несправний),  $S^F(D_f)$  – функціонує у вільному режимі,  $S^R(D_f)$  – працює: окремо або спільно.

Нехай  $\epsilon$  набір процесів (BP), які задані і їх потрібно виконувати в просторі  $\Omega$  або вести підтримку виконання цих бізнес-процесів.  $BP = \{BP_i : i = 1, \dots, L\}$ , зокрема  $L=1$ . Розглянемо випадок одиночного бізнес-процесу. Тоді одиничний бізнес-процес BP складається з робочих операцій

$$R_o = \{R_{o1}, R_{o2}, \dots, R_{oj}, \dots, R_{ok}\}, \quad (2.7)$$

де  $k$  – кількість робочих операцій, значення даної змінної визначає постановник завдань;  $R_{oi}$  – робоча операція, що входить до складу бізнес-процесу. Робочі операції можуть статичними, динамічними, визначеними або з

невизначеними станами. Вони можуть виконувати (робочі операції) спільно або роздільно. Це визначає систему організації виконання робочих операцій бізнес-процесів.

Для виконання кожної робочої операції накладаються певні вимоги:

а) вимагається виконання умов з боку пристрою або пристроїв, тобто на вибір пристроїв для виконання робочих операцій (на призначення робочих операцій пристроїв) вимагається виконання низки умов, обмежень, критеріїв. Всі ці вимоги позначимо через

$$V = \{V_1, V_2, \dots, V_i, \dots, V_g\} \quad (2.8)$$

де  $g$  – загальна кількість вимог, тобто критеріїв, значення якого визначає постановник завдань;  $V_i$  –  $i$ -та вимога, яку визначає постановник. Вимога або критерій  $V_i$  має такі значення (зміст, характеристики) як: рівень сигналу або потужність безпроводного зв'язку. Для безвідмовної роботи мобільного пристрою його значення не повинно бути меншим  $\beta$ . Значення  $\beta$  відомо, виходячи з попередніх досліджень. Але ці питання в даній роботі не розглядається.

Також існують інші вимоги, такі як: безвідмовність/безперервність (коефіцієнт безперервності) не менший  $E$ , енергетична потужність не менше  $P$ , захист сигналів приймання/передачі повинен бути на певному рівні (не менше рівня  $C$  і  $D$ ), рівень захисту повинен бути на певному рівні (на рівні  $P$ ) і т. д. В даному випадку  $E$ ,  $P$ ,  $C$ ,  $D$  і  $\Gamma$  відомі і задані виходячи з попередніх досліджень.

б) на якість виконання робочої операції пред'являється ряд вимог:

$$W = \{W_1, W_2, \dots, W_n\}, \quad (2.9)$$

де  $h$  – кількість вимог і критеріїв на виконання (підтримки процесу виконання та результату виконання робочих операцій). Значення  $h$  (кількість вимог і критеріїв) визначає постановник задач або завдань.  $W_i$  – вимоги на виконання робочої операції: оперативність, мінімальність вартість і витрат і т. д. на результати виконання робочої операції, тобто на якість вихідної продукції; максимізація (пропускної здатності, QoS, швидкості передачі, вартості або певний комплексний критерій) і т. д.

*Тепер, сформулюємо загальну задачу ефективного безвідмовного зв'язку:*

Нехай в момент часу  $t$  (чи  $t_n$ ) стан середовища простору  $\Omega$  наступний (тобто ситуація – прийняття рішень):

$$S(\Omega) = \{CV, D, R_o, V, W\}, \quad (2.10)$$

де  $CV$  - базова станція.

Тоді в момент часу  $t_n$  необхідно вибрати таку станцію безпроводного зв'язку  $CV_i \in CV$ , яка задовільнятиме вимоги цільової функції

$$Q = F(W) = F\{W_1, W_2, \dots, W_j\} \rightarrow opt, \quad (2.11)$$

де

$$W = \{W_1, W_2, \dots, W_j\}, \quad j < h, \quad (2.12)$$

Далі з виразу (2.11) функцію

$$F\{W_1, W_2, \dots, W_j\}, \quad (2.13)$$

перетворимо в цільову функцію виду:

$$f(b_{ij}, r_{ij}, P_i) \quad (2.14)$$

Цільова функція  $f(b_{ij}, r_{ij}, P_i)$  — це критерій, який необхідно максимізувати (пропускна здатність, QoS, швидкість передачі, вартість або певний комплексний критерій).

Кожна мережа має обмежений радіо-ресурс  $P_i$ , коли мобільні пристрої  $i$  розподіляються в мережу  $j$ , він використовує її ресурс розмірі  $r_{ij}$ ;

$B_{ij}$  — це бінарна змінна, яка дорівнює 1, якщо мобільні пристрої  $i$  розподілені в мережу  $j$ , а інакше – дорівнює 0;

$r_{ij}$  – використовувані ресурси мобільного пристрою  $i$  розподіленої мережі  $j$ .

$D_j$  — це кількість мобільних пристроїв в мережі  $j$ .

Коли всі ресурси мережі зайняті і надходять нові запити на послуги, розподіл ресурсів між користувачами здійснюється у відповідності з певною політикою, яка представлена функцією  $p_{ij}(v_j, P_j, D_j)$ . Вона може залежати від загальної ємності мережі ( $v_j$ ), кількості мобільних пристроїв ( $D_j$ ) і вектора вимог QoS для всіх з'єднань ( $P_j$ ).

Загальний принцип (алгоритм) рішення наведеного вище завдання, тобто

завдання забезпечення ефективного безвідмовного зв'язку, представимо в наступному вигляді:

$$\max(f(b_{ij}, r_{ij}, P_i)) \quad (2.15)$$

Таким чином, замість розв'язання задачі (2.11) розв'язуємо задачу (2.15).

За умови:  $\sum_{i=1, n} \sum_{j=1, m} b_{ij} = 1$ ; мобільний пристрій  $i$  знаходиться в мережі  $j$

$$r_{ij} = \begin{cases} r_{ij}^{\min}, \text{ якщо } \sum_{i=1, n} \sum_{j=1, m} r_{ij} \cdot b_{ij} \leq P_j \\ P_{ij}(v_j, P_j, D_j), \text{ якщо } \sum_{i=1, n} \sum_{j=1, m} r_{ij} \cdot b_{ij} > P_j; \end{cases} \quad (2.16)$$

## 2.2. Підвищення ефективності функціонування мереж за критерієм максимального рівномірного завантаження гетерогенної інфраструктури

В роботі розглядається задача перемикання між різними типами безпроводних мереж за критерієм рівномірності завантаження, тому що з цим завданням часто стикаються оперативні служби під час надзвичайних ситуацій. Збільшується кількість екстрених дзвінків, і зв'язку з цим базові станції завантажуються. Для того, щоб UE змогли без особливих зусиль виконувати свою роботу, необхідно правильно і рівномірно розподіляти їх по базовим станціям і точками доступу.

Заданий UE (мобільний пристрій – телефон, ноутбук, робот або інший мобільний пристрій) може перебувати в певний момент часу в зоні покриття тільки Wi-Fi/LTE/UMTS/GSM. Однак через мобільність він може перебувати в зоні покриття більш ніж однієї мережі, наприклад, в зоні покриття БС (базова станція) UMTS і ТД (access point – точка доступу IEEE 802.11. Безліч WLAN IEEE 802.11 зон покриття знаходяться в межах зони покриття UMTS, а зона покриття Wi-Fi може частково покривати зону покриття мережі WLAN і (або) UMTS. Крім того, зони покриття UMTS також можуть перекривати одна одну. Таким чином, в будь-який момент часу є необхідність у правильному рішенні про те, яку БС або АР використовувати для кожного UE.

Головною особливістю СУГБМ (система управління гетерогенної

бездротової мережі) є можливість оптимізації загальної продуктивності існуючих Wi-Fi мереж, а також мереж стільникових операторів незалежно від технологій, які в них використовуються. UE зазвичай знаходиться в двох можливих станах:

- мобільний вузол обслуговується ТД до тих пір, поки RSS (Received Signal Strength) ТД знаходиться в допустимих межах.
- мобільний вузол обслуговується БС (базова станція) до тих пір, поки RSS однієї чи більше точок доступу не досяг порогового значення.

Таким чином, ТД володіє вищим пріоритетом для UE завдяки більш високій пропускну здатності та більш низькій вартості трафіку в порівнянні з БС. Якщо UE знаходиться в зоні дії декількох БС, то СУГБМ буде вибирати ТД виходячи з таких показників, як вартість і продуктивність, враховуючи при цьому необхідність забезпечення розподілу навантаження. Для забезпечення координації передачі інформації і команд в різних стандартах передачі даних будуть використані МІН (Media Independent Handover – медіа незалежна передача).

Припустимо  $A = \{a_1, \dots, a_n\}$  і  $C = \{c_1, \dots, c_m\}$  – це точка доступу ТД WLAN і БС коміркової мережі (GPRS/UMTS/LTE) відповідно, причому  $m = 1$  що значно менше за  $n$ , так як безліч точок доступу розгортають в межах зон покриття стільникового зв'язку. В даному випадку, коли  $a_i \in A (1 \leq i \leq n)$  і  $c_i \in C (1 \leq i \leq m)$  список можливих кандидатів (UE) на підключення, в мережах Wi-Fi, що самоорганізуються UE та є більший.

СУГБМ повинна зберігати список з  $A$  і  $C$ , як список можливих кандидатів для підключення, а також зберігати інформацію про завантаженість кожного із них.  $D \subset (D_1, D_2, \dots, D_m)$ , – це UE. Кожен UE або вимагає перемикання або вже обслуговується ТД/БС, без необхідності в перемиканні. Таким чином,  $D$  можна розділити на дві підмережі в певний момент часу  $t$ :

– 1 підмережа :

$$D_t = \{d_{1(t)}, d_{2(t)}, \dots, d_{m(t)}\} \quad (2.17)$$

Де  $m(t)$  – кількість UE, які вимагають перемикання в момент часу  $t$ ;

– 2 підмережа:

$$V_i = \{D - D_i\} \quad (2.18)$$

де UE з хорошим підключенням до ТД або БС.

Кожна ТД  $a_i$  і БС  $c_i$  здатні забезпечити певну максимальну пропускну здатність  $Z_i$ . Позначимо  $w(i)$  вага або вартість пропускну здатності ТД або БС. Для простоти можна використовувати тільки два види вартості каналів: для кожної ТД –  $w_a$ , для БС –  $w_c$ .

Точки доступу і базові станції здатні збирати інформацію про середню пропускну здатність кожного UE, який обслуговується в даний момент. Але якщо UE не підключений до ТД/БС або його тільки що включили, то такої інформації у ТД/БС немає. Однак, якщо на кожному UE використовувати програму, яка буде періодично збирати цю інформацію і передавати її в СУГБМ, то можна зібрати інформацію про реальну пропускну здатність  $e_{ij}$  для кожної ТД/БС.

Таким чином, сумарне реальне навантаження  $l_i$  для  $a_i$  і  $c_i$  (ТД і БС):

$$l_i = \sum_{d_i \in V_i} e_{ij} \quad (2.19)$$

Введемо двійкову змінну  $b_{ij}$ , яка приймає значення одиниці ( $b_{ij} = 1$ ), коли  $d_i$  підключений до ТД або БС, і нуль ( $b_{ij} = 0$ ), якщо не підключений.

Таким чином,  $B = \{b_{ij}\}$ ,

– матриця зони покриття буде виглядати так:

$$b_{ij} \in \{0, 1\},$$

$$b_{ij} = 0, \text{ якщо } \text{RSS}_{ij} < \begin{cases} K_a, \text{ для ТД} \\ K_c, \text{ для БС} \end{cases} \quad (2.20)$$

де  $K_a$  і  $K_c$  – граничні значення RSS, досягнувши яких UE може встановити з'єднання з ТД і БС відповідно.

Сумарно необхідна пропускну здатність  $v_i(B)$  для  $a_i$  і  $c_i$  (ТД і БС) для підключення додаткових UE  $d_i \in D_i$

$$v_i(B) = \sum_{d_i \in D_i} e_{ij} b_{ij} \quad (2.21)$$

Коефіцієнт завантаженості  $F(i)$   $a_i$  або  $c_i$  (ТД або БС):

$$F(i) = w(i) \frac{l_i + v_i(B)}{Z_i} \quad (2.22)$$

### **2.3. Багатокритерійний алгоритм вертикального хендовера користувачького навантаження**

Безшовні передачі обслуговування, з низькою затримкою і мінімальними втратами пакетів, стали вирішальними факторами для мобільних користувачів, які хочуть отримати безперервні і надійні послуги. У традиційних горизонтальних хендоверах, які відбуваються в однорідних мережах, тільки інформація, отримана від шару радіоканал, така як прийнятий сигнал (RSS) і доступність каналу використовуються в процесі прийнятті рішення про передачу обслуговування. На відміну від цього підходу, крім RSS, багато параметрів, такі як зони покриття мережі, швидкості передачі даних, вартості послуг, надійність, безпека, живлення від батареї, швидкості мобільного терміналу і швидкість роботи мережі можуть бути використані в процесі прийняття вертикальної передачі обслуговування. Це робить весь процес естафетної передачі вертикальних хендоверів більш складним і неоднозначним, так як різні чинники мають враховуватися, щоб зробити вдале рішення естафетної передачі. Одним з перспективних напрямків у мультисервісній NGWN полягає в розробці інтелектуальних алгоритмів рішення вертикальної естафетної передачі, щоб визначити час для виконання передачі обслуговування і забезпечення оптимального вибору технології мережі доступу серед всіх доступних мереж доступу для користувачів, забезпеченими багаторежимним мобільним терміналом. Створення такого інтелектуального алгоритму вертикального прийняття/передачі обслуговування є досить складним завданням через складність ланцюга передачі обслуговування, прийняття метрик, модульності рішення передачі обслуговування, інформаційної неточності, а також інтерпретованих питань. В даній роботі пропонується нечітка логіка як ефективний засіб для вирішення цих завдань, також описаний хід рішення і логічний висновок. В якості неповного методу представлення знань, нечітка логіка добре підходить для



вирішення питань, неточності.

Нечітка система виводу (FIS), або нечітка логіка системи, є нелінійне відображення вектора вхідних даних у скалярному виході. Це є основою обчислення, заснованою на поняттях теорії нечітких множин та нечіткої логіки. Є два типи систем нечіткого виводу, які можуть бути реалізовані, ними є Мамдано та Сугено типу. Систем нечіткого виводу були успішно застосовані в таких областях, як автоматичний контроль, класифікація даних, аналіз рішень і експертних систем.

Нечітка логіка – багатозначна логіка, яка має справу з приблизними міркуванням. Це додає до логічної (Boolean) або двозначної логіки важливу можливість – приймати рішення, володіючи недосконалою інформацією, тобто інформації, яка в одному або в декількох відношеннях може бути неточною, невизначеною, неповною, недостовірною, або частково достовірною. Нечітка логіка складається з нечітких множин і операції з нечітких множин використовуються, щоб зробити висновки на нечіткій логіці. Нечіткі множини пов'язані з умовами, які з'являються в минулому або наслідків з If-Then правил та з входами і виходами FIS. Функції приналежності (MF) використовуються для опису цих нечітких множин. Два види нечітких множин можуть бути використані в FIS, 1-го типу і 2-го типу. 1-го типу нечіткі множини описуються MF, як точні, в той час як 2-го типу нечіткі множини описуються MF, що самі по собі є нечіткими. FIS, що повністю описується в термінах 1-го типу нечітких множин, називається FIS 1-го типу, у той час як FIS, який описаний з використанням щонайменше 2-го типу нечітких множин, називається FIS 2-го типу. Після розгляду кількох питань, що відносяться до високої мобільності між UMTS та мережами доступу Mobile WiMAX і вивчення відповідної літератури по вертикальній передачі обслуговування, подаються ілюстрації нової безшовної вертикальної архітектури управління естафетної передачі, яка може досягнути безмежної мобільності в гетерогенних мережах нового покоління, безпроводного доступу до IP для роботи оперативних служб. Та й взагалі для всіх мобільних користувачів, оснащених багаторежимним мобільним терміналом, зберігаючи при цьому задовільний рівень QoS і

безшовне з'єднання. Термінал управління і вертикальний алгоритм естафетної передачі наступного покоління повинні відповідати наступним вимогам :

- Безшовний доступ в NGWN. МП потрібно буде переходити з однієї інтегрованої мережі доступу на іншу плавно і прозора, без ризику порушення з'єднання. Таким чином, наступне покоління VHDA (vertical handoff decision algorithm) повинні підтримувати ефективний і прозорий роумінг МП серед безлічі безпроводних мереж.

- Високе завантаження мережі. Інтеграція гетерогенних безпроводних мереж доступу розроблена, щоб забезпечити більш високу ступінь використання смуги пропускання для особливо вимогливих сервісів щодо якості обслуговування (QoS) і покращення системних та мережних характеристик

- Мульти-сервіс. Наступне покоління безпроводних мереж буде підтримувати кілька класів послуг, таких як голос, відео, потокове відео, перегляд веб-сторінок. Підтримка декількох послуг в NGWN підвищить якість сприйняття користувачів, так як різні користувачі мають різні вимоги до обслуговування. Тому VHDA повинна підтримувати безліч послуг.

- Вимоги до якості обслуговування. Бездротові системи наступного покоління будуть складатися з різних технологій доступу з різними параметрами, пов'язані між собою за загальним IP - ядром. Ці програми будуть мати різні вимоги. Вертикальний алгоритм естафетної передачі нового покоління повинен забезпечити належний QoS, включаючи високу пропускну здатність, мінімальну швидкість втрати пакетів, мінімальну затримку передачі обслуговування, високу надійність і мінімальні затрати на обслуговування в гетерогенному мобільному обчислювальному середовищі [3].

У роботі подається алгоритм вертикального хендовера (VHDA), який є зручним для розуміння, орієнтований, контекстно-залежний для користувачів. Використовуємо нечітку систему логічного виводу (FIS). Для обробки декількох вертикальних параметрів (критеріїв) ініціювання передачі обслуговування, використовуємо FMADM (fuzzy multiple attribute decision making - Багатокритеріальні задачі прийняття рішень). Для вибору з набору

альтернатив альтернативних мереж бездротового доступу на основі класифікації їх неточних атрибутів використовуємо методи оптимізації, включаючи генетичний алгоритм (ГА) і алгоритм імітації відпалу, щоб максимізувати або мінімізувати основні параметри для вибору оптимальної мережі, які доступні доступні для потенційної вертикальної передачі обслуговування.

Як неповний метод подання знань, нечітка логіка добре підходить для вирішення питань неточності. У підході орієнтованим на користувача, абоненти будуть мати великий контроль, і будуть мати можливість вибрати доступну мережу, яка буде їх задовольняти. VHDA, як передбачається, контекстно-залежний в тому сенсі, що повинен бути повідомлений про умови МП, про можливості доступних мереж, а також вимоги QoS для конкретної послуги. VHDA сформульований як проблема FMADM, так як вертикальна передача обслуговування, в середовищі NGWN, залежить від безлічі атрибутів.

Вертикальні рішення передачі обслуговування (VHD) в середовищі NGWN є більш складними і включають в себе компроміс серед багатьох показників передачі обслуговування, у тому числі вимог якості обслуговування (QoS) (наприклад, за умов мережі та продуктивності системи), умов мобільних терміналів, вимог до електроживлення, типів додатків, користувацькі уподобання і вартість послуг. Як правило, критерії VHD можна сформулювати на основі користувацьких переваг, уподобань оператора, або поєднання того й іншого. Використані показники розглянуті в цілях, орієнтованих на користувача, включають в себе оптимізацію критеріїв (атрибутів) [39- 42]:

- рівень сигналу: певний поріг сигналу необхідний для виявлення мережі і вказує на наявність доступних мереж, тобто доступну мережу можна виявити, якщо потужність її сигналу відповідна.
- покриття мережі: часті передачі обслуговування в мережі можуть понести затримки і втрати пакетів. Мережа, яка забезпечує більшу зону покриття, дозволяє мобільним користувачам, уникнути частих передач обслуговування, оскільки вони змінюють місце розташування. Охоплення

вимірюється в метрах. Наприклад, охоплення мережі UMTS і Mobile WiMAX є від 30 м до 20 км і до 50 км відповідно.

- швидкість передачі даних: різні доступні мережі різних технологій пропонують різні швидкості передачі даних. Швидкість передачі даних звичайно вимірюється в Кбіт або Мбіт. Мережа, яка може передавати сигнали з високою швидкістю є кращою, оскільки максимальна швидкість передачі даних скорочує час доставки пакетів для послуг, які працюють в реальному часі і підвищує якість обслуговування для адаптивних послуг у режимі реального часу.
- вартість послуги: вартість послуг і використання конкретної доступної мережі, є основним критерієм для користувачів та може вплинути на вибір користувача, отже, і на естафетні рішення. Користувач може віддати перевагу дешевшій мережі, щоб зменшити вартість послуг. Вартість послуги зазвичай вимірюється в ціні за одиницю товару в секунду, в послугах, які працюють у режимі реального часу і вартості за одиницю товару КВ для послуг реального часу.
- надійність мережі: надійна мережа не піддається помилкам і володіє високим рівнем довіри, для забезпечення доброї продуктивності.
- мережева безпека: високий рівень безпеки забезпечує цілісність інформації. Мережа з високим шифруванням є кращою, коли обмін інформацією є конфіденційний. Рівень безпеки, як правило, задається за допомогою лінгвістичних термінів, таких як дуже високий, високий, середній, низький і дуже низький.
- швидкість МП: Якщо МП може забезпечити високу швидкість прийому/передачі, то вертикальна передача обслуговування, буде переходити на мережі, у яких територія охоплення невелика, це не зовсім правильно. Наприклад, МП пересувається по 3G виявляє Wi-Fi. Не дивлячись на те, що Wi-Fi пропонує гарну пропускну здатність і інші хороші показники, насправді немає необхідності перемикатися на Wi-Fi, тому що через якийсь час виникне необхідність знову від'єднатися.

- вимоги до батареї живлення: сучасні багаторежимні мобільні пристрої споживають енергію. Споживана потужність має бути зведена до мінімуму, так як мобільні пристрої мають обмежений час автономної роботи від батарей. При зниженні рівня заряду батареї, переходити до мережі з малим енергоспоживанням буде кращим рішенням. Споживана потужність батареї, як правило, задається з допомогою лінгвістичних термінів, таких як дуже низька, низька, середня, висока і дуже висока;
- затримки в мережі: низька затримка в мережі підвищує якість обслуговування, в той час як висока латентність мережі погіршує якість роботи додатків і передачі інформації. У режимі реального часу послуги (наприклад, голосовий виклик) чутливі до затримок. Алгоритм передачі обслуговування повинен працювати швидко, так щоб мобільні пристрої не зіткнулися з проблемою переривання зв'язку. Затримка в мережі, як правило, вимірюється в секундах.

Ці настанови можуть мати різні рівні пріоритети для вирішення вертикальної передачі обслуговування. Вони повинні бути вибрані таким чином, що алгоритм розв'язання передачі обслуговування максимізував QoS для користувача і зводив до мінімуму використання системних ресурсів. Розробка алгоритму прийняття естафетної передачі, який би враховував і поєднував численні параметри, залишається основним завданням дослідження. Вертикальна передачі обслуговування наступного покоління буде включати багато з перерахованих вище критеріїв при здійсненні передачі обслуговування.

Оскільки користувачі гетерогенної NGWN можуть з'єднуватися з більш ніж однією доступною мережею в будь-який час, повинні бути розглянуті, як МП і WON, що буде ініціювати вертикальну передачу обслуговування і обирати найбільш підходящу мережу бездротового доступу для задоволення потреб користувачів. Таким чином, вертикальний алгоритм передачі обслуговування необхідний для того, щоб визначити, коли слід виконати передачу обслуговування до цільової мережі і зробити оптимальний вибір мережі бездротового доступу серед всіх доступних безпроводних мереж.

Вертикальна передача обслуговування в середовищі NGWN, має вирішити наступні завдання: заданий мобільний користувач, оснащений сучасним мульти-спряженим мобільним пристроєм (з радіо інтерфейсом, включаючи UMTS, WLAN, WiMAX і Digital Video Broadcasting - Handheld), підключений до мережі доступу, повинен визначити, чи слід починати вертикальну передачу обслуговування і динамічно вибрати оптимальне підключення до мережі з доступних мереж, або продовжувати перебувати в існуючій мережі.

Отже, наш запропонований алгоритм VHDA складається з двох частин [43]: Передача обслуговування та ініціювання. Для втілення ідеї VHD, наводиться приклад: вертикальної передачі обслуговування між мобільним WiMAX і UMTS. Алгоритм ініціювання передачі обслуговування використовує нечітку систему логічного виводу (FIS) для обробки декількох вертикальних параметрів (критеріїв) ініціювання передачі обслуговування. В роботі використовується FIS Mamdani, який складається з функціональних блоків [44]: первинні дані, нечітка база правил, база даних нечіткий механізм виведення, а також оброблені дані. Так як входи і виходи з FIS чітко характеризують, потрібно знати первинні та оброблені дані, щоб перетворюючи їх із нечіткого подання та отримати зрозуміле визначення для рішення передачі.

Алгоритм вибору доступної мережі (Access Network Selection - ANS) включає в себе прийняття рішення у нечіткому середовищі. Він може бути вирішеним із застосуванням багатокритерійної задачі прийняття рішення (FMADM), яка має справу з проблемою вибору альтернативи з множини альтернатив на основі класифікації їх неточних атрибутів. В подальшому даний алгоритм реалізований програмно в моделі для порівняння із запропонованим. Алгоритм використовує функцію вибору мережі багатокритерійного атрибута і визначає тип доступу, для вибору найкращої доступної мережі, узгоджений з вимогами розташування, станами пристроїв, послуг і додатків користувача, вартості послуги та пропускнуою здатністю. Ця теза пропонує використовувати генетичний алгоритм (GA) та імітацію відпалу

(SA) для оптимізації ANSF з метою вибору оптимальної мережі доступу.

Функція, що вирішує вертикальну естафетну передачу, запускається, коли будь-яка з таких подій спрацьовує:

- a) коли підтверджена наявність нової точки або виявляється недоступність старої мережі,
- b) коли користувач змінює налаштування і таким чином, змінюються ваги, пов'язані з атрибутами вибору мережі,
- c) коли існує серйозний спад сигналу або повна втрата сигналу поточної радіолінії.

Отже, метою алгоритму є знаходження оптимальної мережі для можливої передачі обслуговування з набору вже активних послуг оптимальної цільової мережі. МП вибравши правильний час для початку вертикальної передачі обслуговування знижує подальші передачі обслуговування, покращує QoS, обмежує кількість сигнальної інформації та зміну маршруту, що є невід'ємною частиною процесу передачі обслуговування. Для обробки вертикальної передачі обслуговування, пов'язаних з параметрами використовується нечітка логіка, яка використовує приблизні режими міркувань для неточних даних, на які впливають помилки в точності і акуратності від вимірів системою. FIS виражає правила відображення в словесній мові. Мамдані FIS можуть бути використані для обчислення точного коефіцієнта передачі обслуговування, який визначає необхідність ініціації передачі обслуговування між UMTS і WiMAX. Розглядається два випадка обслуговування.

Сценарії: перемикання каналу від UMTS до WiMAX, і передачі обслуговування від WiMAX до UMTS. Запропонований алгоритм ініціації хендовера має ряд переваг, включаючи:

- атрибути нечіткої логіки. Нечітку логіку концептуально легко зрозуміти і легко застосовувати. Переваги нечіткої логіки полягають в наданні простоти рішення алгоритму ініціації хендовера (HIA - Handoff Initiation Algorithm). Суперечливі критерії можуть бути вирішені із застосуванням нечіткої логіки;

- використання рішень багаторазової передачі обслуговування. У складному і невизначеному гетерогенному середовищі NGNW, багатокритеріальні алгоритми можуть зменшити невизначеність відносно альтернативних мереж доступу і дозволяють зробити розумний вибір серед них. Проблемою є різноманітність критеріїв і різноманітність алгоритмів критерію, які забезпечують більш високу продуктивність, ніж один алгоритм критерію пов'язаний з додатковою гнучкістю і взаємодоповнюючим характером критеріїв.

#### *Передача обслуговування від UMTS до WiMAX.*

Припустимо, що МП, який підключений до мережі UMTS виявляє новий WiMAX мережі. Мамдані FIS обчислює коефіцієнт передачі обслуговування, який визначає, чи повинен МД ініціювати передачу обслуговування до WiMAX.

Використовується нечітке моделювання [103] у наступних кроках щоб побудувати Mamdani FIS [104]:

Крок 1: Визначення вхідні лінгвістичні змінні і визначення їх чисельні діапазони.

Є три діапазони зони покриття мережі :

Чотири вхідні змінні були визначені: RSS (RSSI), швидкість передачі даних, зона покриття мережі і мережева латентність цільової WiMAX мережі.

Є три діапазони RSSI :

Таблиця 2.1

RSSI (дБм)		
Лінгвістичний діапазон	Нижня межа	Верхня межа
Сильний	-72	-66
Середній	-78	-66
Слабкий	-78	-72

Є три діапазони швидкості передачі даних :

Таблиця 2.2

Швидкість передачі даних (Мб / с)		
Лінгвістичний діапазон	Нижня межа	Верхня межа
Високий	30	60
Середній	0	60
Низький	0	30



Є три діапазони зони покриття мережі :

Таблиця 2.3

Покриття в мережі (км)

Лінгвістичний діапазон	Нижня межа	Верхня межа
Хороший	25	50
Середній	0	50
Поганий	0	25

Є три діапазони затримки мережі :

Таблиця 2.4

Мережева затримка (мс)

Лінгвістичний діапазон	Нижня межа	Верхня межа
Високий	100	200
Середній	0	200
Низький	0	100

Крок 2: Визначити і назвати лінгвістичні вихідних змінних і визначити їх чисельні діапазони.

Таблиця 2.5

Чинник хендовера або коефіцієнт передачі

Лінгвістичний діапазон	Нижня межа	Верхня межа
Дуже високий	0.75	1
Високий	0.5	1
Середній	0.25	0.75
Низький	0	0.5
Дуже низький	0	0.25

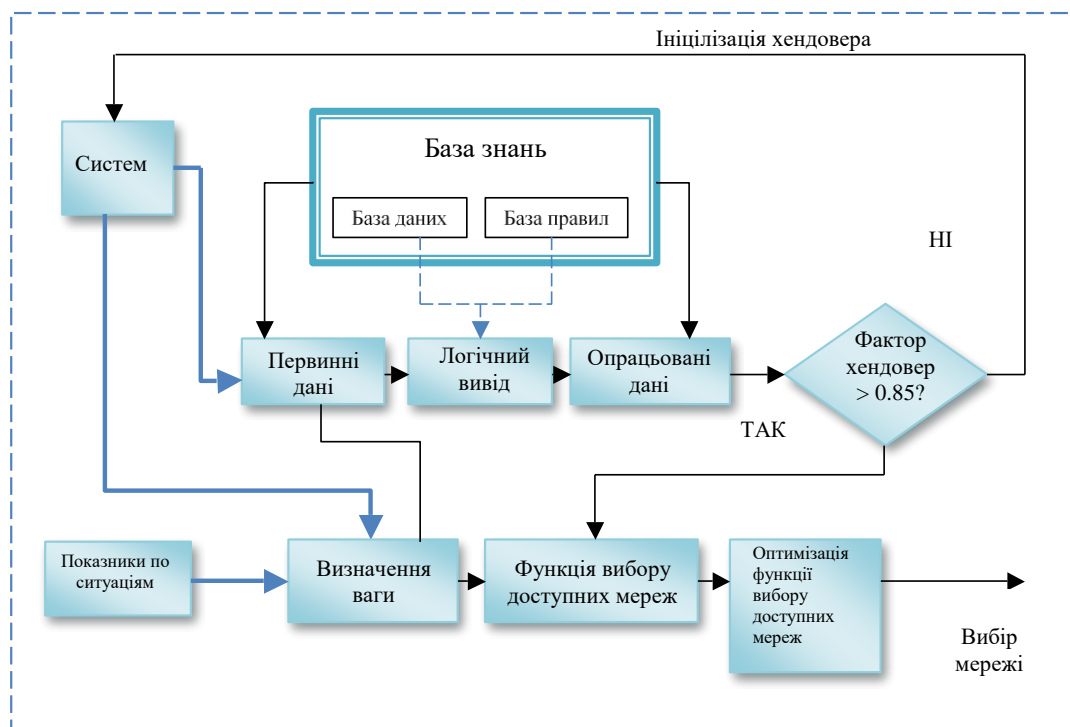


Рис.2.1. Алгоритм ініціалізації передачі обслуговування [1]

Існує одна вихідна змінна визначення : коефіцієнт передачі обслуговування (хендовер чинник). Є п'ять діапазонів передачі обслуговування коефіцієнта : дуже високий, високий, середній, низький, і дуже низький.

Крок 3: Визначити набір нечітких функцій приналежності для кожної вхідної і вихідної змінної.

Використовується Gaussian MF із-за короткої нотації і гладкості функції Гауса. Кожен діапазон вхідних і вихідних змінних визначає зв'язок з нечіткими множинами, які мають те ж позначення в діапазоні. Таким чином, є три нечітких безлічі вхідних змінних і п'ять нечітких множин для вихідних змінних, наприклад, нечітка безліч значень для RSSI складаються з лінгвістичних термінів: сильного, середнього і слабкого. Низькі і високі значення кожного діапазону використовуються для визначення свого відповідного набору в Gaussian MF. Вхідна змінна для нечіткої змінної RSSI визначається від - 78 дБм до - 66 дБм. Нечітка множина "сильний" визначається з - 72 дБм до - 66 дБм при максимальному значенні в - 66 дБм. Аналогічним чином, нечітка множина "середній" для RSSI визначається від - 78 дБм до - 66 дБм при максимальному значенні в - 72 дБм, і "слабкий" для RSSI визначається від - 78 дБм до - 72 дБм при максимальному значенні при - 78 дБм.

Визначення для змінної "швидкості передачі даних" визначається від 0 Мбіт до 60 Мбіт, у визначенні для змінної "покриття в мережі" визначається від 0 м до 50 км, і визначення для змінної "мережева затримка" визначається від 0 мс до 200 мс. На виході значення для змінної "коефіцієнт передачі обслуговування" визначається як: дуже високий, високий, середній, низький, і дуже низький. Змінна "коефіцієнт передачі обслуговування" визначається від 0 до 1, при цьому максимальне членство великих кількостей "дуже низький" і "дуже високий" в 0 і 1 відповідно.

Крок 4: Побудувати базу правил, які регулюватимуть роботу FIS.

Є чотири нечіткі вхідні змінні і три нечіткі множини для кожної нечіткої змінної, максимальне можливе число правил в нашій базі правил складає  $3^4 = 81$ . Нечіткої бази правил містить If - Then правила, такі як (див. таблицю 2.6):

- якщо RSSI (Received Signal Strength Indication - Індикація сигналу, що приймається) визначається як "слабкий", і швидкість передачі даних як "низький", а зона покриття мережі як "поганий", і затримки в мережі являється як "високий", то хендовер чинник "низький";
- якщо RSSI "сильний", і швидкість передачі даних "високий", і зона покриття мережі "хороший", і затримки в мережі "низький", то хендовер чинник "високий";
- якщо RSSI "сильний", і швидкість передачі даних "середній" і зона покриття мережі "хороший", і мережеві затримки "середній", то хендовер чинник являється "високий".
- якщо RSSI "середній" і швидкість передачі даних "середній" і зона покриття мережі "хороший", і мережеві затримки "середній", то хендовер чинник являється "середній", і так далі.

Таблиця 2.6

Приклад базових правил

№ правила	RSSI	Швидкість передачі даних	Охоплення мережі	Затримка мережі	Фактор хендовера
1	2	3	4	5	6
1	Сильний	Висока	Добре	Низька	Найвищий
2	Сильний	Висока	Добре	Середня	Дуже високий
3	Сильний	Висока	Добре	Висока	Високий
4	Сильний	Висока	Середнє	Низька	Дуже високий
...	...	...	...	...	...
35	Середній	Висока	Погане	Середня	Низький
36	Середній	Висока	Погане	Висока	Низький
37	Середній	Середня	Добре	Низька	Високий
38	Середній	Середня	Добре	Середня	Середній
39	Середній	Середня	Добре	Висока	Середній
...	...	...	...	...	...
77	Слабкий	Низька	Середнє	Середня	Дуже низький
78	Слабкий	Низька	Середнє	Висока	Низький
79	Слабкий	Низька	Погане	Низька	Дуже низький
80	Слабкий	Низька	Погане	Середня	Дуже низький
81	Слабкий	Низька	Погане	Висока	Дуже низький

Для цього, в роботі використовується MATLAB Fuzzy Logic Toolbox .

Вищезгадані кроки з 1 по 4 зв'язується з кроками від 5 і до 8.

Крок 5: Занести вхідні дані.

Крок 6: Застосувати непрямий метод.

Крок 7: Сукупність усіх вихідних даних.

Крок 8: Оброблені дані (defuzzify).

На виході оброблених даних отриманий чіткий "хендовер показник". Після дефазифікації, отриманий "хендовер показник" використовується для визначення, чи потрібно передачу обслуговування : якщо хендовер показник  $> 0,85$ , то слід почати перемикання; інакше нічого не робити.

#### 2.4. Метод адаптивного вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин

Розглянемо різнотипність трафіку та критерії ініціації міжсистемного хендовера. Рис. 2.2 демонструє найпоширеніші типи мережного трафіку та певних однотипних критеріїв для реалізації хендовера, що застосовуються у якості вхідних даних для алгоритмів горизонтально- вертикального хендовера . Дані критерії наведено нижче.



Рис. 2.2. Різнотипність мережного трафіку та критерії щодо ініціації хендовера.

Для випадку обслуговування користувачів є можливість призначення пріоритетності критеріїв при прийнятті рішення щодо ініціації процедури

міжсистемного хендовера. Згідно запропонованого підходу у дисертаційній роботі, пріоритетності критеріїв є наступним (критерії хендовера першого та другого рівня): RSS, QoS, рівень мобільності абонента, завантаженість мережі, безпека, а також вартість; причому показникам RSS та QoS надано однакову пріоритетність, оскільки наша ціль полягає у максимізації рівня задоволеності кінцевого абонента якістю послуг, що надаються. Тим не менше, запропонований підхід має можливість гнучкої пріоритезації, тому для певних категорій кінцевих абонентів зазначена вище пріоритетність критеріїв може зазнати змін в процесі динамічної роботи [9]. Одним із запропонованих у роботі варіантів розв'язку даної задачі є метод адаптивного вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин. Даний метод включає в себе три основні компоненти збір даних, нормалізація даних і прийняття рішення про переключення [1]. Для того щоб виконати інтелектуальні рішення передачі обслуговування в гетерогенному середовищі запропоновано поділити всі параметричні критерії на дві групи: QoS-залежні та такі, що залежать безпосередньо від властивостей радіоінтерфейсу безпроводної мережної системи рис.2.3.

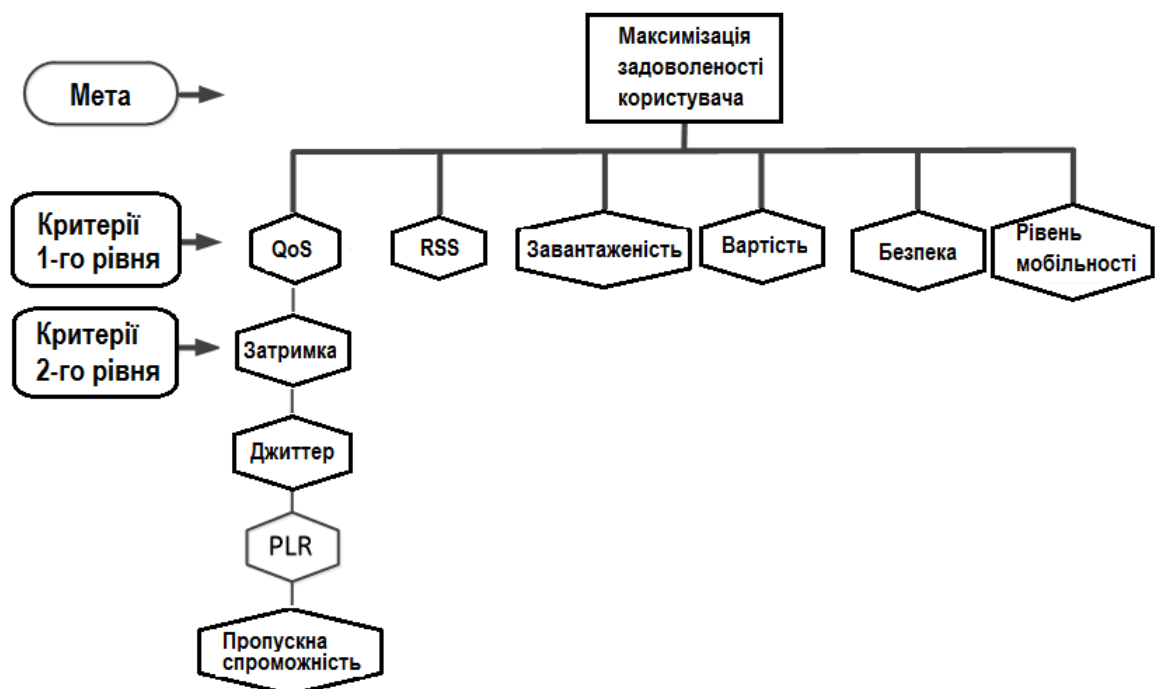


Рис.2.3. Множина критеріїв для прийняття рішення щодо ініціалізації процесу вертикального хендовера

Оскільки гетерогенна мережа забезпечує функціонування різних радіо технологій доступу з різними структурно-функціональними характеристиками. В загальному ці параметри неможливо порівнювати напряму. Таким чином, з метою їх нормалізації та агрегування в діапазоні  $[0, 1]$  використовуються підходи нечіткої логіки.

Підготувавши параметри для вирішення завдання вибору мережі доступу шляхом реалізації горизонтально-вертикального хендвера, вводимо шкалу ваги для кожного критерію у відповідності до відомої шкали Лікерта (1 – не може бути застосований  $(0,0,0.25)$ , 2- можливо застосовувати  $(0,0.25,0.75)$ , 3 – середнього рівня,  $(0.25, 0.5, 0.75)$ , 4 – варто застосовувати  $(0.5,0.75,1)$ , 5 – необхідно застосовувати  $(0.75,0.75,1)$ ) з урахуванням оцінок табл. 2.7. В наведених дужках подано трикутні нечіткі числа.

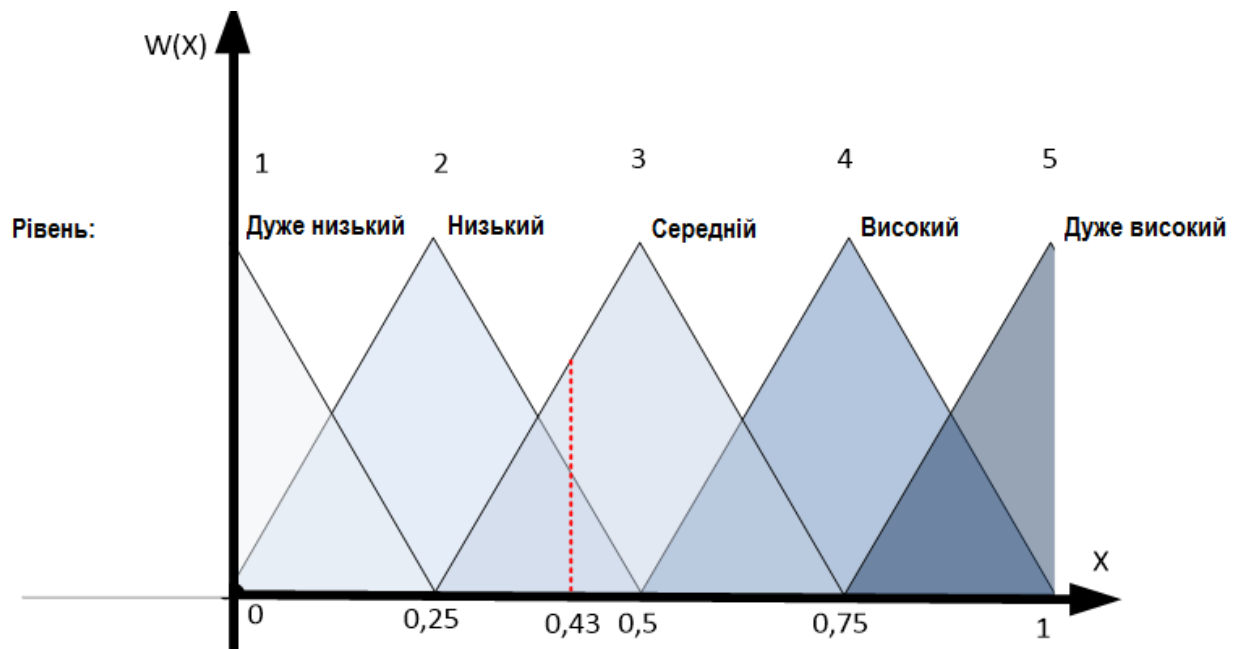


Рис. 2.4. Шкала оцінок та функції належності відповідних лінгвістичних термів

Вводимо п'ятирівневу шкалу лінгвістичних термів для оцінювання рівня корельованості між конкретним показником стану мережної системи та певним критерієм (1 – “дуже низький”, 2 – “низький”, 3 – “середній”, 4 – “високий”, 5 – “дуже високий”), що дає змогу провести оцінювання значення рівня певного критерійного параметра за шкалою табл.2.7.

## Критерійні параметри мереж доступу для ініціалізації хендовера за шкалою Лікерта

Шкала	1	2	3	4	5	Min/Max показники
Завантаженість, [%]	70–100	50 –70	40 –50	30–40	0–30	0–100
Вартість	1–2	2–3	3–4	4–8	8–10	1–10
RSS, [dBm]	< -110	-100 – -110	-90 – -100	-75 – -90	-55 – -75	-110 – -55
Безпека	1–2	2–4	4–6	6–8	8–10	1–10
Мобільність, [км/год]	<120	80–120	60–80	40–60	0–40	0–160
Затримка, [мс]	<300	200–300	100–200	50–100	10–50	10–500
Джитер, [мс]	<30	20–30	10–20	5–10	1–5	10–30
Коефіцієнт втрат пакетів (PLR), [%]	<8	6–8	4–6	3-4	1-3	1-8
Пропускна здатність, [Мбіт/с]	<0/1	0.1-10	1-50	50-100	100-200	0/1-200

Наступним кроком є формування емпіричних коефіцієнтів ваги  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $B_3$  та  $B_4$ , наданих сервісів клієнтам у відповідності до необхідного рівня якості обслуговування, які можуть набувати значень в діапазоні від 1 до 3, причому більше значення коефіцієнта означає більшу вагу заданого параметра якості сервісу для його відповідного виду (категорії послуг) (див. табл. 2.8).

Таблиця 2.8.

## Типи послуг та відповідні відносні вагові коефіцієнти якісних параметрів трафіку

Параметри якості Види сервісу	PLR	Затримка	Джитер	Пропускна здатність
	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$
Передавання голосу	2	3	3	1
Відеоконференцзв'язок	2	3	3	2
Послуги IPTV	3	2	2	3
Передавання даних через Internet	3	1	1	1
Передавання інтерактивних даних	2	2	1	1
Передавання мультимедіа на вимогу (VoD)	2	2	2	3
Послуги Voice over IP	3	2	1	1

Вводимо показник завантаженості, в якості коефіцієнта утилізації ресурсів вузла мережі доступу, за деякою технологією, а саме вагового коефіцієнта  $\rho_{mn}$ ,

на основі поточного рівня навантаження вузла, причому  $m$  є порядковим номером вузла мережі доступу, що розміщується в зоні покриття гетерогенної платформи, а  $n$  – тип мобільної технології у вузлі  $m$ . Прийmemo, що  $n=1$  для технології LTE,  $n=2$  для технології GSM та  $n=3$  для технології UMTS. Відповідні вагові коефіцієнти технологічно-залежних параметрів для наведених технологій показано у табл. 2.9.

Таблиця 2.9.

Вагові коефіцієнти технологічно-залежних параметрів

Технологія мережного доступу Параметри	GSM B <sub>1</sub>	LTE B <sub>2</sub>	UMTS B <sub>3</sub>
Вартість	1	2	2
Безпека	1	2	1
RSS	2	2	2
Завантаження	2	1	2
Рівень мобільності користувачів	1	2	1

Оцінивши параметри мережевого вузла, як результату в процесі збирання коефіцієнтів, що характеризують параметри QoS (PLR, затримку, джитер, пропускну здатність), оцінюємо вплив його завантаження по замовчуванню за допомогою вагових коефіцієнтів, які становлять 0.5. У випадку зростання ваги параметра при зростанні  $\rho_{mn}$ , вагові коефіцієнти параметрів з табл. 2.8 визначаються із табл. 2.7 за формулою:

$$wp_{imn} = 0.5 + 0.5 \cdot \rho_{mn}, i = 1..4. \quad (2.23)$$

В ситуації зниження ваги параметра при зростанні  $\rho_{mn}$ , вагові коефіцієнти відповідних параметрів визначається з табл. 2.8 за формулою:

$$wp_{imn} = 0.5 - 0.5 \cdot \rho_{mn}, i = 1..4, \quad (2.24)$$

де  $i$  є індексом QoS - параметру за порядком згідно табл. 2.8( $B_i$ ), який використовується у ваговому коефіцієнті  $wp_{imn}$  цього параметра, та використовується для інтелектуального горизонтально-вертикального хендовера.



Вплив змін коефіцієнту завантаження мережевих вузлів на вагові коефіцієнти їх QoS параметрів

Параметр моделі	Зміна завантаження	Зміна ваги
Джитер	Зростання $\rho \uparrow$	Зростання $\uparrow$
Вартість	Зростання $\rho \uparrow$	Зростання $\uparrow$
Безпека	Зростання $\rho \uparrow$	Без змін $\leftrightarrow$
Рівень мобільності користувачів, [км/год]	Зростання $\rho \uparrow$	Без змін $\leftrightarrow$
Затримка, [мс]	Зростання $\rho \uparrow$	Зростання $\uparrow$
Коефіцієнт втрат пакетів [%]	Зростання $\rho \uparrow$	Зростання $\uparrow$
Пропускна здатність, [Мбіт/с]	Зростання $\rho \uparrow$	Зменшення $\downarrow$
RSS, [dbm]	Зростання $\rho \uparrow$	Без змін $\leftrightarrow$

Ваговий коефіцієнт QoS параметру  $w_{imn}$  для відповідного сервісу визначається за формулою:

$$w_{imn} = w p_{imn} B_i, i = 1..4, \quad (2.25)$$

де  $B_i$  є ваговим коефіцієнтом QoS параметру для відповідного типу послуг, що запитується абонентами (див. табл. 2.8).

Наступним кроком є нормалізація коефіцієнта  $w_{imn}$ :

$$W_{imn} = \frac{w_{imn}}{\sum_{i=1}^4 w_{imn}}, \quad (2.26)$$

Розрахунок трикутних нечітких чисел для агрегованого оцінювання обраного мережевого вузла доступу  $\tilde{Q}_{mn}$  виконується у відповідності до технології його мережної технології, а також згідно оцінок значень критерійних параметрів для ініціації хендовера за шкалою, що наведена в табл. 2.7. Власне, сама процедура хендовера може привести до змін показників QoS для користувача, що обслуговується.

$$\tilde{Q}_{mn} = (q_1, q_2, q_3)_{mn} = \sum_{i=1}^4 (w_{imn} \times \tilde{L}_{imn}) \quad (2.27)$$

$$q_{j_{mn}} = \sum_{i=1}^4 (W_{i_{mn}} \times l_{ij_{mn}}), \quad (j=1,2,3; m=1,2,3; n=1,2), \quad (2.28)$$

де  $q_1, q_2, q_3$  є нижнім рівнем узагальненої оцінки  $\tilde{Q}$ , її основним значенням та верхнім рівнем, відповідно,  $\tilde{L}_{imn} = (l_{i1}, l_{i2}, l_{i3})_{mn}$  - трикутне нечітке число, що характеризує показник параметра мережного вузла за  $i$ -им критерієм, причому сам вузол належить безпроводній мережній системі в рамках гетерогенної мережної платформи з порядковим номером  $m$  та використовує  $n$ -ту технологію доступу (див. табл. 2.10). Тут  $l_{i1}, l_{i2}, l_{i3}$  - є нижнім рівнем лінгвістичної змінної, її основним значенням та верхнім рівнем, відповідно до формату трикутних нечітких чисел (Triangular Fuzzy Number), див. шкалу рис. 2.4.

Після розрахунку значень параметрів вузла доступу для групи QoS - залежних критеріїв аналогічно розраховується для параметрів що характеризують радіоінтерфейс, (табл. 2.9): RSS, завантаження, безпека, рівень мобільності користувача, вартість.

Тоді, комплексна агрегована оцінка мережного вузла доступу за двома рівнями критеріями визначається за формулою:

$$\begin{aligned} \tilde{R}_{mn} &= (r_{1mn}, r_{2mn}, r_{3mn}) = \frac{1}{2} \times (\tilde{Q}_{mn} + \tilde{P}_{mn}) \\ &= \frac{1}{2} \times (q_{1mn} + p_{1mn}, q_{2mn} + p_{2mn}, q_{3mn} + p_{3mn}). \end{aligned} \quad (2.29)$$

Дефазифікація одержаного нечіткого (трикутного) числа у відповідності до запропонованого методу визначається за формулою [1]:

$$R_{mn} = \frac{1}{3} \times \sum_{t=1}^3 r_{tmn}. \quad (2.30)$$

Таким чином, блок схема методу адаптивного вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин, представлена на (рис.2.5).

Відповідно, удосконалений метод вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин, дає змогу централізовано прийняти обґрунтоване рішення щодо проведення процедури горизонтально-вертикального хендвера, базуючись на групі QoS-

залежних критеріїв та таких, що залежать безпосередньо від властивостей радіоінтерфейсу мережної системи, яке передбачає можливість адаптування правил прийняття рішень, залежно від різних телекомунікаційних умов та мережних політик.

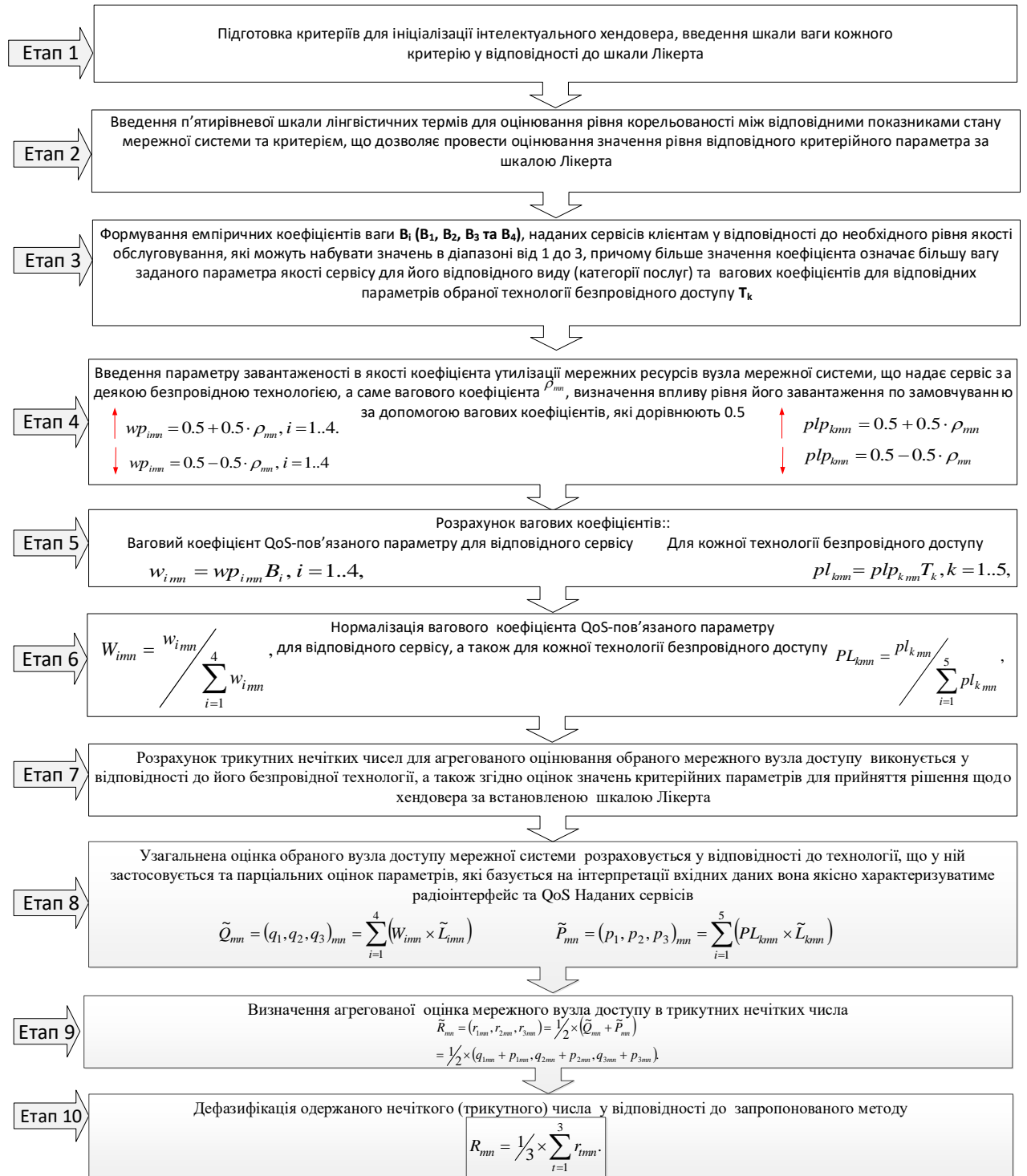


Рис. 2.5. Блок схема методу адаптивного вибору безпроводної мережі доступу

## **2.5. Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мережі на основі хмарних обчислень**

Розвиток технологій виготовлення мобільних пристроїв дав можливість створення таких пристроїв, які можуть паралельно спілкуватися з декількома безпроводними системами обслуговування. Інтеграція та конвергенція мереж на основі IP протоколу дозволили реалізувати комунікацію між системами доступу різних технологій. Основною проблемою при наявності декількох систем доступу та можливості їх одночасного використання для обслуговування користувача є відсутність оптимальних алгоритмів здійснення переключення між ними, тобто здійснення вертикального хендоверу.

Для вирішення задачі ініціації та здійснення хендоверу в цій роботі пропонується централізований метод керування процесом хендоверу на основі хмарних технологій з використанням міжсистемних інтерфейсів до засобів управління системами доступу на основі технології веб-сервісів. Для здійснення хендоверу пропонується використовувати принципи паралельних обчислень на основі кластеру серверів. Такий кластер може встановити кожний оператор для себе, інтегрувавши його у власну інфраструктуру.

Як варіант оператор може використати сервісні моделі клауд систем та розробивши власне програмне забезпечення використовувати обчислювальні потужності як сервіс у клауд провайдерів для розгортання власного програмного забезпечення. Це дозволить йому значно знизити капітальні витрати. Такий підхід продиктований тим, що для прийняття рішення про здійснення хендоверу та вибору конкретної системи доступу, як кандидата для переключення, необхідно, використовуючи математичні методи прогнозування та вибору, провести великий обсяг обчислень, що може зайняти велику кількість часу.

Зрозуміло, що в умовах мобільності абонентів, час є критичним фактором, оскільки при великих швидкостях пересування та передавання мультимедійного трафіку реального часу, тривале обчислення критеріїв здійснення хендоверу може призвести до банального розриву сесії та

складностей у подальшому її відновленні. Використання можливостей хмарних технологій дасть змогу провести ці обчислення в лічені мілісекунди та забезпечити оптимальний вибір системи доступу для переключення [3].

Для того, щоб швидко розв'язати завдання вибору мережі доступу у гетерогенній мережній платформі, в цьому розділі роботи запропоновано централізовану реалізацію процесу управління хендвером на основі хмарних технологій з використанням методів нечіткої логіки. Оптимізація ресурсів, що представляє собою їх перерозподіл, згідно інтересів кінцевих користувачів спрямована на пошук екстремального значення у процесі вивчення поведінки безпроводної системи доступу (максимум з точки зору результатів, мінімум - витрат), яка оцінюється, як кращий варіант з множини можливих.

В процесі оптимізації з'ясовується, який стан логістичної системи буде найкращим з точки зору пропонованих до неї вимог (алгоритм цього процесу розглянутий на рис. 2.6 ). Для цього розроблено програмне забезпечення на серверному кластері, що керує процесами ресурсної оптимізації (вертикального хендвера), які представлено на рис. 2.7 [10].

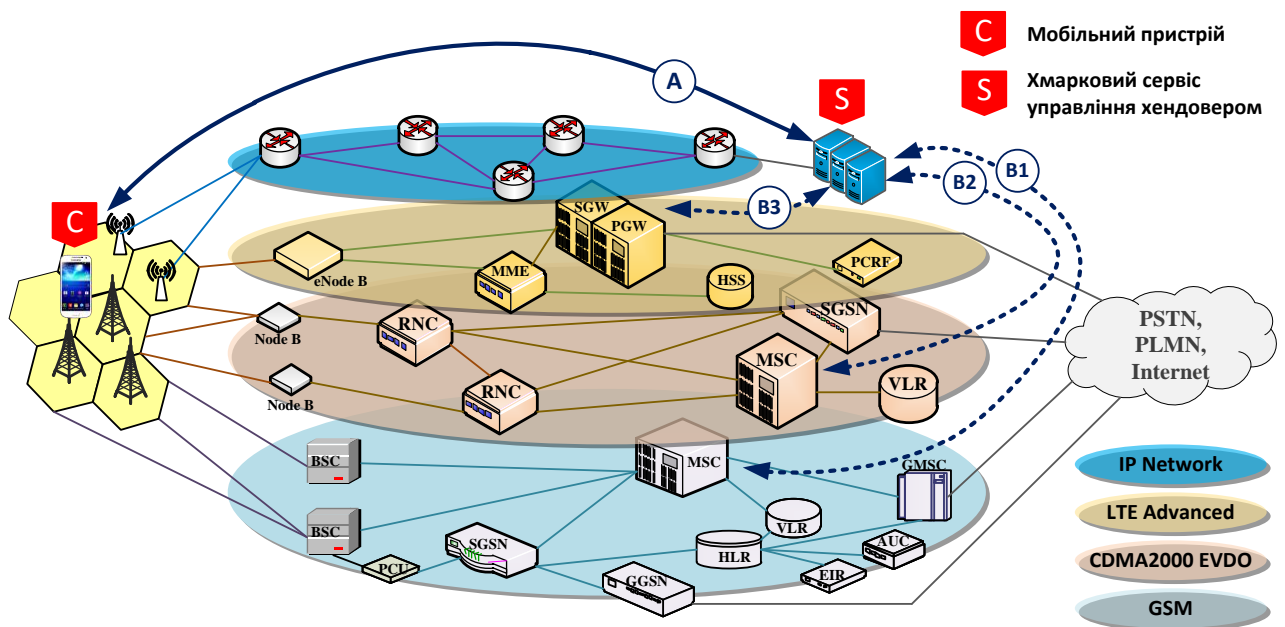


Рис. 2.6. Структурна схема гетерогенної мережі з централізованим управлінням ресурсів

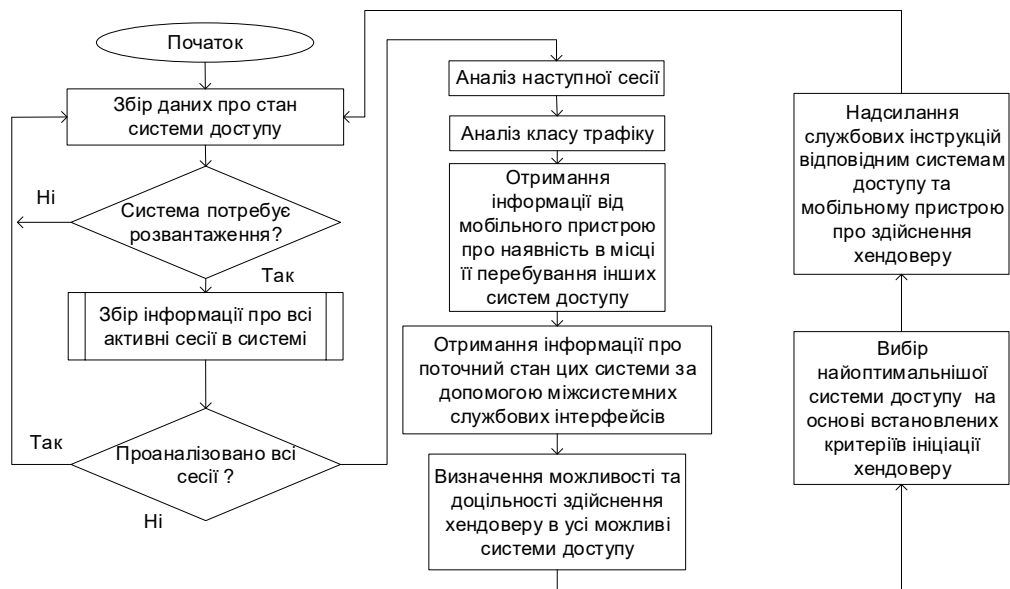


Рис. 2.7. Алгоритм централізованого інтелектуального вертикального хендоверу

Таким чином, використовуючи можливості та засоби хмарних сервісних платформ, подібні розрахунки оптимального вибору мережної системи забезпечується в межах кількох мілісекунд [2].

## 2.6. Модель гнучкого управління ресурсами в гетерогенній мобільній мережі на основі технології Big Data

Механізми рішення передачі обслуговування або управління перемикання між каналами зв'язку можуть бути централізованими (рішення, про передачу обслуговування, може прийматися в самому UE (як у мобільній передачі даних WLAN) або в мережевому об'єкті (наприклад, передача голосу стільникового зв'язку)). Ці випадки називаються передачею обслуговування мобільного контролю (MCHO – mobile-controlled handoff) (або передача обслуговування контрольованим терміналом) і передача обслуговування контрольованою мережею (NCHO - network-controlled handoff).

У NCHO, мережа приймає рішення передачі, що базується на вимірі RSS UE на ряді базових станцій. Інформація про якість сигналу для всіх користувачів доступна в одній точці мережі, що полегшує відповідний

розподіл ресурсів. Це вигідно, коли рішення передачі обслуговування приймається мережею, оскільки:

- мережа може перенаправити UE на іншу мережу, що має достатню ємність для обробки своїх поточних комунікацій;
- мережа може також координувати мобільність всіх UE таким чином, що загальний трафік рівномірно розподілявся по всім ресурсам, перенавантаження були зведено до мінімуму, і загальна пропускна здатність досягало максимального рівня.

Недоліком NCHO є те, що для радіомережі може не вистачати деяких параметрів, які впливають на рішення передачі, такі як вимоги абонентів, точний тип послуги, кількість активних UE, і деяких політик оператора, що мають відношення до рухливості між мобільним Wi-Fi і 3GPP.

Розумна інтеграція Wi-Fi як частини операторської мережі забезпечує значні переваги з точки зору підвищення можливостей і покриття, особливо там, де люди збираються найчастіше – транспортні вузли, торгові центри, міські центри, тощо. Інтелектуальна інтеграція передбачає вибір мережі і автентифікацію оператора, якому належить Wi-Fi автоматично та безпечно, забезпечуючи при цьому надійну і високу якість послуг. Інтегровані Wi-Fi мережі забезпечать операторам більше контролю та видимості при використанні Wi-Fi, а також можливість забезпечення дотримання загальної політики (так само як в мережах 3G/4G).

Оператори звертаються до інтеграції Wi-Fi в якості альтернативної технології радіо доступу (RAT), щоб додати ємність і для надання послуг доданої вартості. Є кілька важливих переваг для гетерогенної архітектури стосовно end-to-end QoS:

- Включення масштабування з тисяч маленьких точок доступу до середовища з великою щільністю, таких як стадіони – при одночасному зниженні транзитних витрат;
- Забезпечення високої якості роботи головних і відео додатків для кінцевих абонентів;
- Забезпечення безпеки end-to-end, в тому числі оборонних та атакуючих

механізмів проти безпроводного вторгнення;

- Забезпечення автоматичного та безпечного процесу переходу від стільникової мережі до Wi-Fi мережі;
- Грамотне розвантаження трафіку Wi-Fi;
- Інтеграція з ядра мобільної мережі політики структурного управління;
- Забезпечення доступу до мережі Wi-Fi в важкодоступних місцях.

У МСНО, UE можуть повністю контролювати процес передачі обслуговування. Цей тип передачі обслуговування має коротку тривалість реакції (порядку 0,1 сек.) Сам UE спочатку виявляє всі доступні мережі. Потім він вимірює рівні сигналів від оточуючих БС і рівнів перешкод на всіх каналах, і робить всі необхідні оцінки для вирішення передачі обслуговування. Передача може бути ініційована, якщо інтенсивність сигналу обслуговуючої БС нижче, ніж у іншій БС з допомогою певного порогу.

МСНО – це вибір майбутнього, оскільки ринок телекомунікацій мігрує з централізованого операторського підходу до клієнт-орієнтованого підходу. Допоміжна мережа при сприянні передачі обслуговування (НАНО – network-assisted handoff), допомагає UE в процесі прийняття рішення про ініціацію хендовера, виконуючи збір і аналіз даних. UE може також надати своє місце розташування і будь-яку іншу інформацію, яка може бути розглянута в аналізі мережі. Мережа тільки допомагає UE в процесі прийняття, а остаточне рішення буде прийнято в UE.

Як говорилося раніше, вся інформація, що збирається UE, буде відправлятися в ЦОД через оператора мобільного зв'язку. ЦОД представляється у вигляді Big Data, що складається з n серверів. Big Data відкривають можливість гнучкої взаємодії термінальних пристроїв, як з центром обробки даних, так і між собою. Це досягається вбудованими драйверами і системним програмним забезпеченням системи хмарного обчислення. Фізичне перемикання будуть виконуватися UE на основі прийняття рішень шляхом аналізу статистичних даних в Big Data [2].



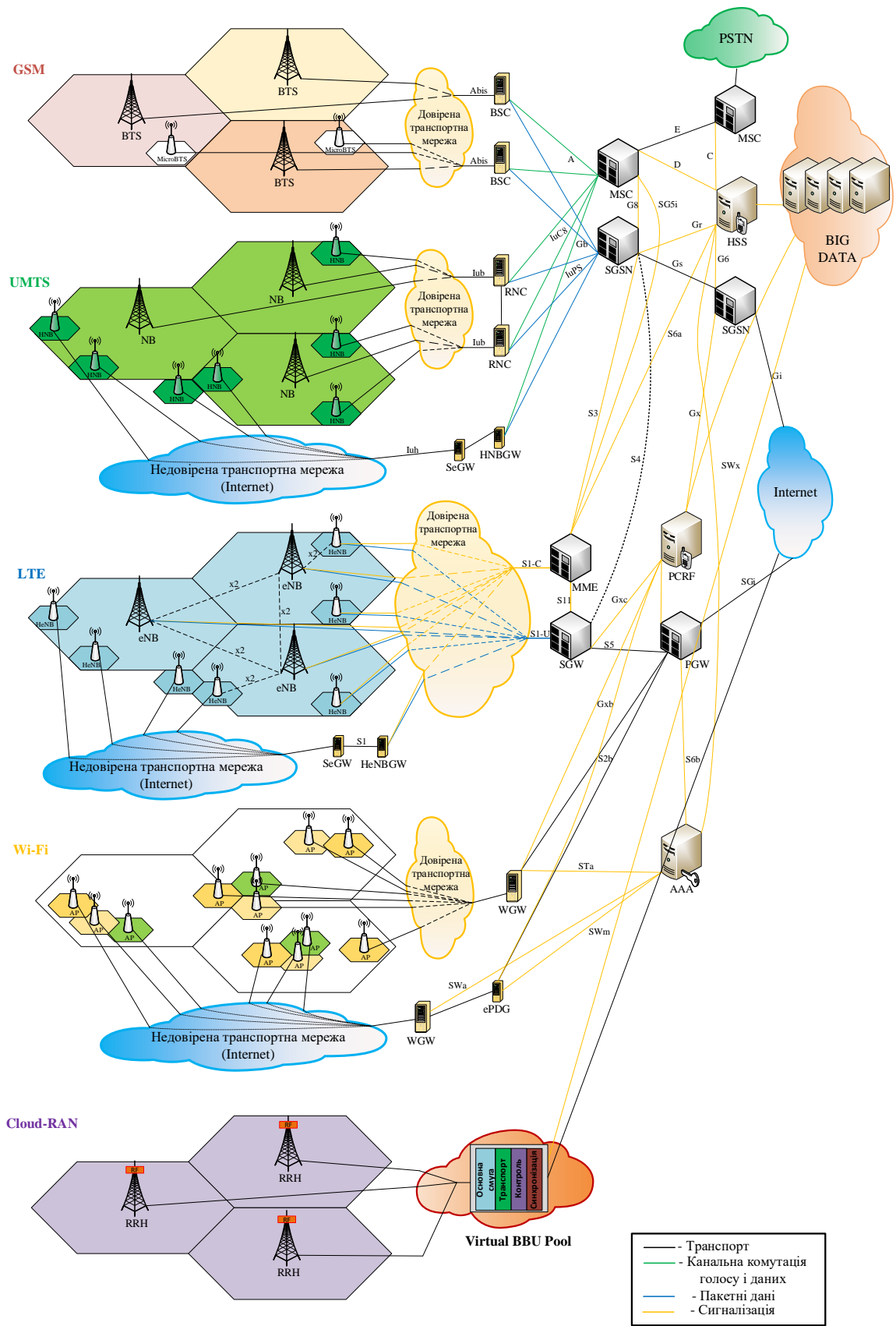


Рис. 2.8 Запропонована архітектура системи управління гетерогенною безпроводною мережею майбутнього покоління

У гетерогенній мобільній системі дані умовно розділяються на два типи: дані користувачів, та дані характеристик операторів мереж. Комплексний аналіз обох типів даних може надати цінну інформацію, яка може бути використана для оптимізації мережі. Таким чином, мобільні оператори можуть аналізувати дані для виконання планування мережі, розподілу спектру, управління ресурсами тощо [17].

*Дані користувача.* Дані, зібрані з UE, дуже пов'язані з профілем та поведінкою користувача, таких як їх місцезнаходження, мобільність та особисті дані щодо потреб користувача. З швидким розширенням мережі мобільного зв'язку і розвитком інтелектуальних мобільних пристроїв, генерується надмірний обсяг даних з додатків встановлених на UE користувачів.

*Дані оператора.* Дані, зібрані операторами в основному отримані з їх реєстрів баз даних і RAN. Реєстри баз даних мають велику кількість носіїв/службових даних відносно, продуктивності мережі, інформації про успішні виклики та пріоритети використання послуг.

З іншого боку, велика кількість даних в RAN включаючи інформацію про комірку (наприклад, інформацію про конфігурацію ENB, інформацію про стан ресурсів, інформацію про завади, звіти про передачу обслуговування, інформацію про мобільність, стан несправності, використання каналів зв'язку), повідомлення сигналізації, якими обмінюються БС і UE (наприклад, керування радіоресурсами; повідомлення для встановлення зв'язку та передачі даних) і вимірювань радіосигналів (опорний сигнал прийнятої потужності, опорний сигнал, прийнята якість і тощо). Ключові особливості цих двох видів даних, наведені в таблиці 2.11. Після того, як оператори мобільного зв'язку мають дані, зібрані з різних джерел, наступне завдання полягає в тому, як ефективно використовувати їх. Дані, отримані з усіх джерел повинні бути оброблені, і конвертувати в певні знання, які можуть бути використані для розробки адаптивних алгоритмів і стратегій оптимізації для підвищення продуктивності гетерогенної мережі. Розширені методи збору та аналізу даних є важливими для оптимізації мережі.

## Основні характеристики даних користувача та оператора мережі

Особливість	Дані користувача	Дані оператора
Мета	Впливають на потреби користувача	Об'єктивно вимірюється мережею без залучення людських факторів
(Не) структурованість	Різні формати даних, включаючи напівструктуровані та неструктуровані дані	Структуровані дані, створені відповідно до даних конкретних протоколів
Конфіденційність	Необхідна висока конфіденційність.	Внутрішнє використання для операторів мережі
Обмеження енергії	Точність даних обмежена енергоспоживанням пристрою	Немає обмежень енергії
Резервування	Висока кореляція та надмірність у випадку великої кількості користувачів, які знаходяться у популярних місцях протягом конкретного проміжку часу	Зазвичай висока кореляція і надмірність тому дані послідовно обробляються для різних рівнів мережі
Розповсюдження	Зазвичай фрагментарне і припиняється в часі і в просторі	Зазвичай періодичне та рівномірно розподілене в часі
Надійність	Низька надійність внаслідок зміни кількості користувачів та їх місцезнаходження. Необхідна попередня обробка для фільтрації шумів та збереження цілісності даних	Висока надійність, оскільки дані в основному від сигналізації та керуючої інформації в мережах. Нестабільна через різну динаміку, неоднорідність, і великий масштаб мереж
Керованість	Важко контролювати з точки зору швидкості, розмірів, збору даних.	Легко збирати оператору за допомогою конкретних мережевих інтерфейсів та вимірювальних пристроїв

У мобільних мережах збирання необроблених даних є першим кроком до аналізу великих даних. Наприклад, оператори можуть збирати дані від мобільних користувачів, які завантажують інформацію, пов'язану з їх

мобільністю. Однак інформація про місцезнаходження користувача може бути недоступною, якщо мобільні користувачі вимикають локалізацію на своїх мобільних пристроях. Як альтернатива, інформація про місцезнаходження, отримана безпосередньо з вузлів ENB не може бути точною через неточні методи локалізації. Помилки локалізації та вплив на навколишнє середовище часто є небажаними для великих даних. Крім того, батарея UE може бути вичерпана, тому потрібна інформація не може бути зібрана в певний час. З цією метою інтелектуальний аналіз даних, фільтрація, і методи екстракції розроблені з метою видалення перешкод або непотрібних даних, які відносяться до так званих схем класифікації схильних до помилок. Однак це як і раніше, є головною проблемою для отримання корисної інформації з неповних, надлишкових і невизначених великих обсягів даних. Одним із перспективних рішень для інтелектуального аналізу даних є динамічний аналіз даних із декількох джерел, оскільки дані, як правило, збираються із різних джерел [8].

З безпрецедентним зростанням зібраних даних, користувачі і оператори мереж вимагають ефективного аналізу даних і прогнозування інструментів для швидкого реагування і класифікації в режимі реального часу. В даний час різні додатки з великими даними пропонують як інтелектуальну, так і прогностичну аналітику з потужними методами машинного навчання. Машинне навчання відображає прогрес багатовимірної статистики, розпізнавання образів, інтелектуальний аналіз даних і деякі інші вдосконалені аналітики даних або передбачення. Він відіграє велику роль, якщо глибока та інтелектуальна ідея потрібна для виявлення прихованих даних з великих множин, різноманітних і швидко змінюваних наборів даних. Загалом, точність, масштаб і швидкість є основними показниками оцінки методів машинного навчання.

Інша важлива методика машинного навчання - класифікація послідовностей, яка застосовується до аналізу трафіку та класифікації поведінки користувачів. Хоча існують різні технології вибору об'єктів, все ж складно ефективно класифікувати послідовності функцій у великому наборі даних через обсяг даних і розмірності потенційних можливостей в межах послідовностей.

Метод опорних векторів SVM (Support vector machine) зарекомендував себе, ефективністю класифікації ознак послідовності, оскільки намагається привласнити цю послідовність в ту чи іншу площину об'єктів і визначити гіперплощину з максимальним запасом на два класи.

На відміну від традиційних методів навчання, при розгляді неструктурованої навчальної архітектури, глибоке навчання виникає за допомогою контрольованих та / або неконтрольованих методів автоматичного вивчення ієрархічних (або множинних рівнів) представлення в глибоких архітектурах для класифікації. У зв'язку з недавнім безпрецедентним зростанням даних в мережах мобільного зв'язку, величезні зусилля були зосереджені на ефективних і масштабованих паралельних алгоритмах для підготовки глибоких моделей. Необхідно використовувати глибоку довірчу мережу з глибокою архітектурою, щоб захоплювати представлення функцій не тільки міток, але й незамічених даних. У мережі глибокої довіри використовується попередня підготовка для безконтрольного навчання, а також налаштовуються стратегії нагляду за навчанням, що в кінцевому підсумку призведе до створення моделі навчання. Зокрема, це включає в себе неконтрольоване навчання для отримання розподілених даних без допомоги мічених даних, а також контролюється тонке налаштування, для покращення, як недавно доданих класифікації рівнів так і попередньо підготовлених рівнів.

Використовуючи аналіз даних, потреби в ресурсах, переходячи від одного місця до іншого в конкретний період стають прогнозованими. Отже, прогнозована інформація з аналізу даних, дає змогу операторам виділяти більше ресурсів базової станції, активувати точки доступу таким чином, що пік трафіку міг бути поглинений плавно, без погіршення QoE користувача.

Мобільні користувачі часто подорожують з одного місця до іншого по території міста (наприклад, працюють у центральному діловому районі вдень і перебувають в передмісті вночі). Це призводить до того, що трафік кожної комірки значно коливається в різний час доби, це називається ефектом "припливу". Якщо ресурси розподіляються на кожну комірку з фіксованою конфігурацією, використання ресурсів неефективне, і користувачу важко в

точці доступу отримати хороший QoE в годину пік. З іншого боку, в режимі простою в умовах низького трафіку величезна кількість ресурсів може бути незадіяна. Поточні дані історії можуть використовуватися аналітикою даних для прогнозування трафіку в мережах в районах високої щільності.

Координація інтерференції: у межах мережі HetNet, що має невеликі комірки, координація інтерференції між макро - та малими комірками повинна виконуватися в часовій області замість частотного домену, наприклад, схеми координування інтерференції між комірками (eICIC) схема, що використовується в технології LTE -Advanced [12].

Для реалізації eICIC визначено спеціальний тип субкадра - майже порожній підкадр (ABS), який не містить даних, але лише мінімальну керуючу інформацію (опорний сигнал, обов'язкова системна інформація тощо). Таким чином, не відбуваються перешкоди для сигналів даних, тоді як інтерференція, викликана керуючими сигналами, також може бути зменшена. У системі LTE одна рамкова радіостанція складається з 10 субкадрів, кожен з яких може використовуватися або як звичайний субкадр, або ABS за допомогою eNB за винятком підкадрів 0 та 5. Рішення про те, як налаштувати підкадри ABS, здійснюється оператором мережі.

Тим не менше, визначення відповідного співвідношення ABS з макро комірки в малі комірки залежить від багатьох факторів, в тому числі типів послуг, навантажень трафіку в даній області, і так далі. Як добре відомо, поведінка служб у малих комірках залежить від часу. Крім того, розподіл трафіку для індивідуальної послуги також зміниться [18]. Таким чином, міжкоміркова інтерференція не залишається постійною. Тому, оптимальне співвідношення ABS динамічно змінюється з часом.

В системі Big Data, мережева аналітика може бути використана для оптимізації розподілу ресурсів радіозв'язку [19]. Розподіл ресурсів може бути зроблено таким чином, щоб була б змога адаптуватися до навколишнього середовища як і трафіку змін на основі інформації, отриманої з аналізу даних. Отже, продуктивність кожної комірки може бути оптимізована. Це може бути зроблено шляхом періодичної обробки вихідних даних для отримання

статистики і автоматичного виявлення відхилення трафіку, орієнтовані прогнози на оптимізацію параметрів ICIC таких, як оптимальне співвідношення ABS [13].

Крім того, глобальний процес оптимізації можна досягнути шляхом окремої оптимізації розташування і мобільності вимог користувачів декількох, eNB. Наприклад, деяка eNB може бути не активна, щоб уникнути перешкод в його сусідній eNB, яка може мати велику пропускну здатність за рахунок більш високого відношення сигнал/шум (SINR). Крім того, зменшення споживання енергії може бути ще однією оптимізаційною науковою задачею яку слід враховувати.

Як правило, різні послуги і додатки управляються з допомогою набору параметрів QoS (наприклад, втрат пакетів, затримки і джитера). Тим не менше, управління може бути більш ефективним, коли оцінюється якість сприйняття кінцевих користувачів (наприклад, QoE) приймаються в якості мети оптимізації замість QoS. З цією метою, автоматична і точна оцінка QoE в реальному часі є першим кроком. Аналіз даних може дати змогу забезпечити QoE користувачів шляхом попереднього моніторингу в гетерогенному середовищі, яке має важливе значення для глобальної оптимізації мережі.

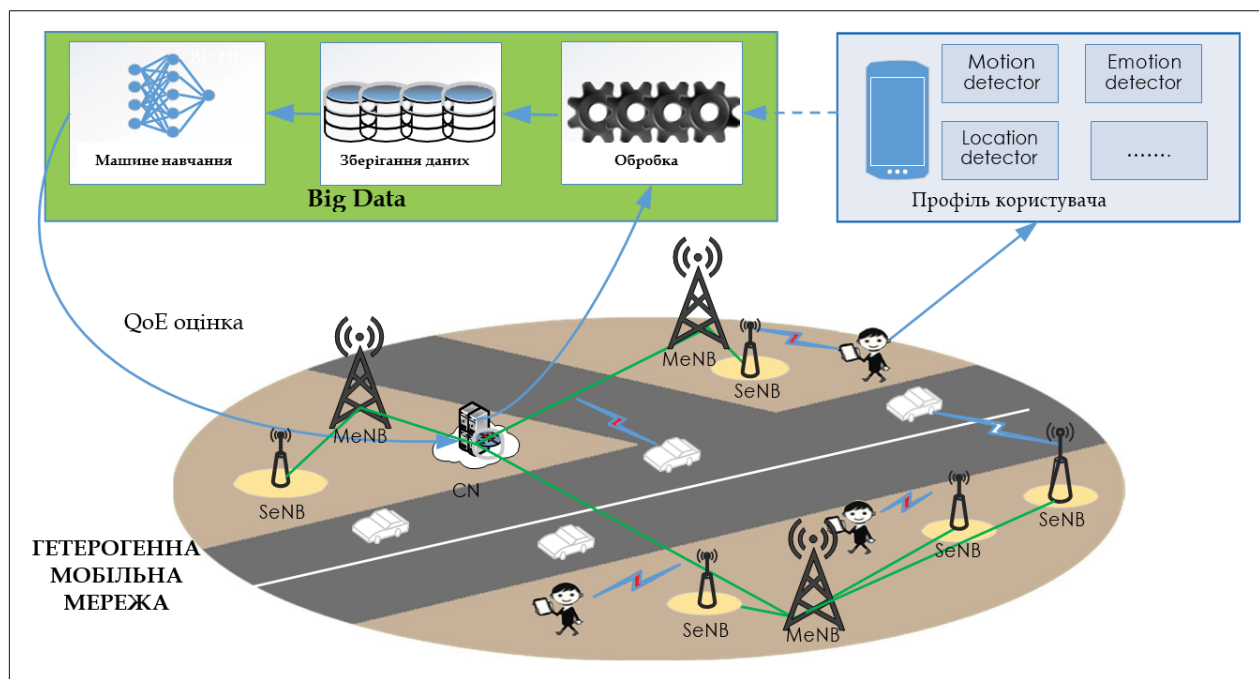


Рис. 2.9 Забезпечення QoE користувачам з допомогою обробки великих даних

Як показано на рис. 2.9, дані, необхідні для оцінки QoE приходять як від мережі так і користувачів. Крім технічних факторів, різні не технічні фактори існують, які можуть вплинути на формування кінцевого результату QoE, в тому числі, тип пристрою, емоції користувача, звички і так далі. Таким чином, в оцінці QoE, корисно створити окремий профіль для кожного користувача, який представляє собою модель користувача із звичками та інтересами. Користувач, як правило, не хоче витратити багато часу, відповідаючи на запитання, щоб створити модель профілю. Як альтернатива, профіль користувача може бути побудований і контролюється з використанням аналізу даних з неявною інформацією, зібраною колекцією профілю додатком, який встановлений на мобільних пристроях. Відповідно діяльність самих користувачів відслідковується та порівнюється, щоб визначити схожість та відмінності. Аналогічно, дані мережі, включаючи параметри QoS, збираються через вимірювання та сигналізацію в гетерогенній інфраструктурі [7]. Усі дані зберігаються в базі даних для подальшої обробки.

Потім запускається механізм машинного навчання, що використовується для встановлення взаємозв'язку між факторами впливу та QoE через штучний інтелект. Методи машинного навчання дає змогу в будь-який час приймати більш точні рішення, навіть якщо набори даних є неповними або виникають нові ситуації.

Аналіз даних дозволяє дізнатись операторам про параметри що впливають на QoE у різних пристроях, сервісах та мережевих ресурсах. Після чого використання глобальної оптимізації мережі дає змогу виявити причину проблем і вибрати найкращі відповідно дії. Загалом, метою оптимізації мережі є максимізація QoE для користувачів з належним розподілом ресурсів, при мінімізації витрат на інфраструктуру за допомогою аналізу даних.

Тим не менше, великі схеми даних також становлять серйозні проблеми. Перш за все, як зібрати зібрані великі дані не тільки від користувачів, а і від операторів. Таким чином, багато проблем, необхідно належним чином вирішити для того, щоб максимально збільшити продуктивність всієї мережі і тим самим забезпечити безвідмовне надання послуг користувача.



## 2.7. Висновки до розділу 2

У розділі детально проаналізовано критерії для ефективного управління ресурсами. Розглянуто особливості та класифікація хендовера в гетерогенних мережах мобільного зв'язку. Сформовано математичну модель задачі для побудови ефективних безпроводних мереж в заданому просторі для функціонування та роботи мобільних пристроїв в гетерогенній мережі.

Запропоновано розробити гетерогенну мережу, яка буде орієнтована на абонента та дасть змогу оператору мережі аналізувати та прогнозувати поведінку користувачів шляхом використання хмарних технологій [5].

Проведено порівняння критеріїв для ефективного управління ресурсами та здійснено вибір критерію максимального рівномірного завантаження мобільної мережі.

## **РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ФУНКЦІОНУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖІ**

### **3.1. Розроблення імітаційної моделі переміщення абонентів мобільної мережі**

Висока швидкість розвитку стільникових мереж зв'язку визначає підвищений інтерес до них як з боку розробників програмного забезпечення планування та оптимізації стільникових мереж, так і з боку фахівців технічних служб операторських компаній. Можливість збільшення ємності стільникових систем зв'язку за рахунок збільшення території, що обслуговується і числа каналів з часом знижується. У зв'язку з цим виникає завдання підвищення ефективності використання вже існуючих мереж. Існує необхідність вирішення задачі оптимізації системи стільникового зв'язку на рівні радіоінтерфейсу з метою максимально можливого збільшення пропускну здатності по обслуговуванню навантаження. Коли допустима межа навантаження на фрагмент мережі зв'язку перевищена, виникає перевантаження: деякій частині абонентів не можуть бути надані послуги зв'язку (блокування з'єднання), у інших абонентів якість зв'язку (обриви з'єднань, число помилок на біт повідомлення, рівень внутрішньо системної завади) стає нижче заданого рівня.

Крім перевантажень стільникової мережі, викликаних надзвичайними подіями регіонального рівня, масових перевантажень під час свят або очікуваних перевантажень (наприклад, при недостатній швидкості збільшення абонентської ємності станцій - відкритті нового торгового центру, де ще не забезпечена необхідна абонентська ємність), можна виділити ще один вид перевантаження - локальні перевантаження. Кожна сота мережі має межу обслуговування абонентського навантаження. Для оператора мережі зв'язку будь-яке перевантаження є не бажаним, так як це зниження ключових показників якості роботи: падає якість послуг, що надаються абонентам; зростання кількості обривів з'єднань абонентів. Для абонента виникає ризик не отримати послугу. Ймовірність відмови обслуговування будь-якого абонента у

соті при виникненні локальної перевантаженні істотно зростає. Причина локальної перевантаженні - перевищення навантаження на соту за рахунок збільшення навантаження в області розташування деякої частини абонентів стільника [1-3]. При цьому область розташування абонентів багато менше області обслуговування стільника. Локальне перевантаження може бути наслідком надзвичайної події, масового заходу або інших причин, у тому числі зовнішніх впливів на мережу зв'язку третіх осіб (в роботі наводиться класифікація локальних перевантажень і їх характеристики).

На сьогоднішній час прогресивний розвиток в галузі телекомунікацій призводить до створення різноманітних технологій радіодоступу та появи значної кількості абонентських пристроїв з підтримкою різних стандартів мобільного зв'язку, які в найближчому майбутньому дозволять об'єднати різні технології в єдиній конвергентній мережі та створити глобальну гетерогенну мережу мобільного зв'язку. Дана мережа утворюватиметься із різних сегментів безпроводних технологій, у яких накладаються зони покриття. Це дасть змогу підвищити пропускну здатність мережі та розширити зону її покриття, а для абонента надавати послуги з кращою якістю та нищою ціною.

У гетерогенних безпроводних мережах наступних поколінь абонент з універсальним терміналом матиме можливість отримувати доступ до мереж різних телекомунікаційних операторів/провайдерів. Існує актуальне науково-технічне завдання пошуку нових методів по управлінню компонентами стільникових мереж і оптимізації параметрів фрагментів стільникових мереж стандартів другого і наступних поколінь (2.5G, 4G) та підсистему забезпечення комутаційних послуг, в умовах високої активності абонентів і виникаючих в її результаті перевантажень [4-5, 11]. Стандарти, що лежать в основі концепції HetNet, розроблялися кілька років (робоча група IEEE 802.21 була створена в 2004 р). Однак оскільки сервіси HetNet охоплюють мережі, що працюють в рамках стандартів, які визначаються різними контролюючими органами (в тому числі IEEE, 3GPP, 3GPP2, ITU-T і IETF), було здійснено ряд спроб стандартизувати мережеву сумісність, які призвели до відстрочення їх широкого застосування. Хоча за наявними ініціативам вже спостерігається

певний прогрес (наприклад, 802.11i), вони ще вимагають багатьох зусиль. В рамках програми Hotspot 2.0 Wi-Fi Alliance в червні 2012 р. почалося адміністрування процесу сертифікації Passpoint™, що охоплює мобільні пристрої і точки доступу, які автоматично вибирають і авторизують доступ до Wi-Fi-мереж за допомогою SIM-карти пристрою. В даний час існує обмежене число сертифікованих пристроїв. Паралельно з цим Wireless Broadband Alliance в рамках власної ініціативи зі створення точок доступу нового покоління тісно працює з Wi-Fi Alliance з перевірки дії сертифікованих пристроїв в умовах реального світу. Передбачається, що багато операторів чекають результату цих випробувань, перш ніж почати інвестувати значні кошти в інфраструктуру, що підтримує технології HetNet (рис.3.1).

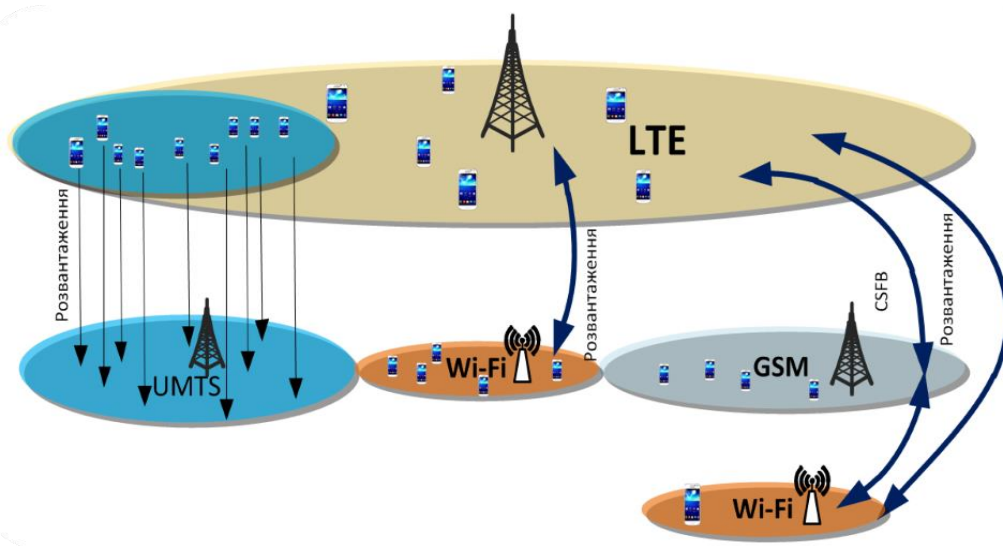


Рис. 3.1. Архітектура гетерогенної мережі

У мобільному зв'язку поширеною проблемою є вичерпання радіоресурсу комірки у моменти пікового абонентського навантаження. У таких випадках абоненти, які намагаються здійснити дзвінок чи скористатися іншими послугами зв'язку (наприклад, Інтернет), отримують відмову в обслуговуванні. Локальне перевантаження може бути наслідком надзвичайної події, масового заходу або інших причин .

Запропоновано розв'язання задачі підвищення доступності мережевих радіоресурсів методом балансування абонентського навантаження. У разі підвищеного навантаження або перевантаження одного чи більше секторів

мережі мобільного зв'язку з трисекторними антенами використовується вимушений перерозподіл радіоресурсів(рис.3.2).

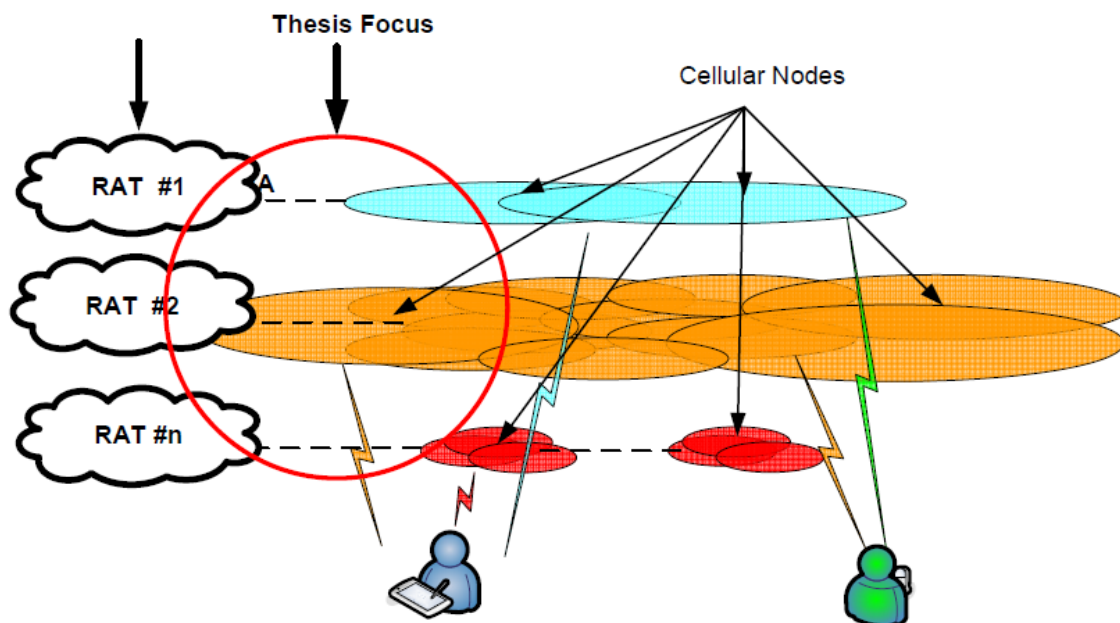


Рис. 3.2. Об'єкт моделювання та дослідження гетерогенної мережі [10]

Умови вимушеного перерозподілу радіоресурсу та моніторинг стану абонентських терміналів. Суть вимушеного перерозподілу радіоресурсу полягає у перенесенні частини абонентського навантаження з сектору з підвищеним завантаженням чи перевантаженням до сектору з меншим рівнем завантаження. Це здійснюється шляхом перенесення абонентського навантаження (вимушеного хендоверу) між суміжними секторами в межах спільної території покриття.

Для здійснення вимушеного хендоверу необхідно задовольнити дві умови:

- потужність сигналу, який абонент отримує від сусідньої базової станції, дорівнює або перевищує мінімальне робоче значення;
- переміщення абонента за середню тривалість сеансу зв'язку незначне порівняно з радіусом комірки.

Для того, щоб обмежити розмірність задачі вимушеного перерозподілу радіоресурсу, потрібно провести класифікацію активних абонентів за швидкістю переміщення (чим нижча швидкість, тим вищий пріоритет для

вимушеного хендоверу) та класом послуг (чим нижчий клас, тим вищий пріоритет для вимушеного хендоверу) [14].

Отже, запропоновано такий розподіл мобільних абонентів на групи:

Нерухомі VSPEED=0 км/год;

Рухомі VSPEED=5 км/год;

Рухомі VSPEED=20 км/год;

Рухомі VSPEED=100 км/год;

Швидкість переміщення абонента визначається за такою формулою:

$$V_{SPEED} = \frac{\sqrt{(x_i - x_{i-1})^2 + (y_i - y_{i-1})^2}}{\Delta \tau} \quad (3.1)$$

В роботі запропоновано виконувати класифікацію швидкостей руху мобільних абонентів з метою фіксування зміни потужності рівня сигналу мобільної станції протягом часу спостереження та здійснення прогнозування вимушеного хендоверу в напрямі руху до перевантаженої комірки знаючи розподіл переміщення абонентів .

У роботі розроблено оригінальний програмний продукт , який дозволяє задавати будь який розподіл руху абонентів з різними швидкостями, а також є можливість вказувати напрям траєкторії переміщення абонентів.

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

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

- координати (x,y);
- швидкість переміщення VSPEED , м/с;
- рівень потужності сигналу Psn від базових станцій із сусідніх секторів ( n = 1,2,3 )

Цей масив система ініціалізує тільки для активних абонентів у момент початку сеансу зв'язку і видаляє після його завершення. Дані в масив заносяться кожні  $\Delta \tau$  секунд.

Розроблений програмний продукт дає змогу завдяки графічному інтерфейсі динамічно конфігурувати параметри моделі, тим самим оцінити поведінку мобільної системи, що моделюється. Для цього у роботі розроблена імітаційна модель системи мобільного зв'язку структурна схема якої відображена на рис.3.3. Імітаційна модель складається з блоку генерації абонентів, який відповідно до обраного закону розподілу створює запис в «менеджер абонентів» всіх новостворених активних абонентів. Абонент в імітаційній моделі представлений як об'єкт з набором таких параметрів, як: тривалість активності, напрямок руху, швидкість пересування, місце знаходження, відстань до всіх базових станцій, потужність сигналу від усіх базових станцій та інші додаткові параметри необхідні для роботи моделі.

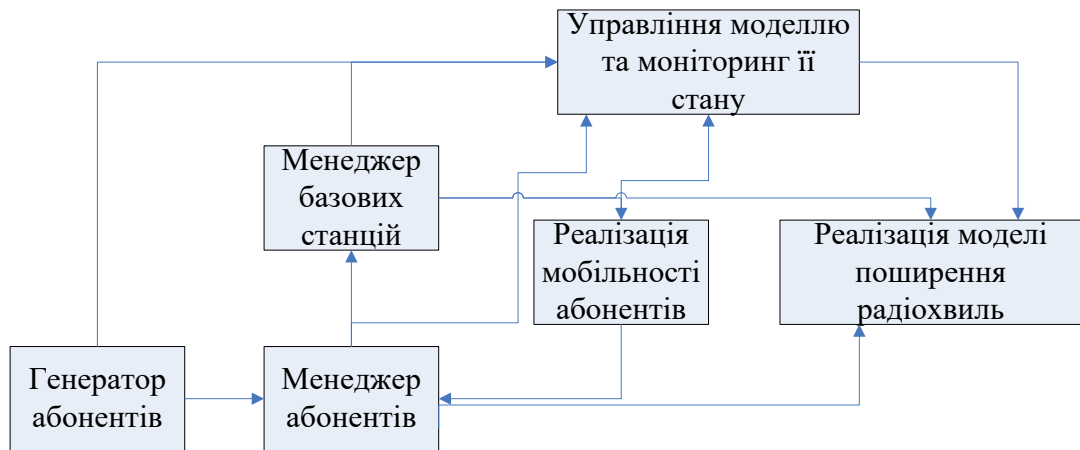


Рис. 3.3. Структурна схема імітаційної моделі

Менеджер абонентів представляє собою масив, що зберігає об'єкти класу «абонент» та здійснює моніторинг тривалості перебування кожного абонента в системі. Якщо тривалість перебування абонента (тривалість обслуговування) в буфері перевищує тривалість виклику, що встановлена генератором при створенні абонента, тоді вважається, що абонент завершив виклик, а його об'єкт видаляється з буфера. Ще одним важливим елементом моделі є блок, що відповідає за реалізацію математичної моделі поширення радіохвиль. Блок може інкапсулювати будь-які моделі і таким чином є універсальним, тобто дає змогу провести моделювання для різних систем в різних умовах. Алгоритм роботи блоку полягає у моніторингу місця розташування абонентів та їх переміщення, на основі чого він визначає згасання радіохвиль від усіх базових

станцій. В свою чергу базова станція також описана як об'єкт, який має свої параметри, такі як: висота розміщення, потужність випромінювання, частота кількість антен та ін. Важливим для проведення досліджень, описаних у цій роботі, є блок реалізації поширення абонентів. Він використовує інтерфейс менеджера абонентів та відповідно до броунівського закону розподілу здійснює зміну координат абонентів з різним інтервалом та кроком, таким чином забезпечуючи моделювання руху абонентів. Таким чином блок реалізації моделі поширення радіохвилі постійно здійснює обчислення для нового місця розташування абонента. Варто зазначити, що є такі абоненти, які можуть і не рухатися.

Для розроблення програмного забезпечення, яке реалізує імітаційну модель, описану у цій роботі, використано мову програмування C++, а середовище програмування – Borland Builder C++ 6.0. Це середовище розробки програмного забезпечення володіє всіма необхідними засобами для створення повноцінних, ефективних, багатопотокових програм.

### **3.2. Дослідження роботи мобільної мережі на основі імітаційної моделі руху абонентів для прогнозування локальних перевантажень**

Основне вікно програми, яка моделює роботу мобільної системи обслуговування відповідно до створеної імітаційної моделі, відображено на рис.3.4. Інтерфейс програми містить компонент для графічного відображення завантаженості трьох базових станцій. В програмі реалізована можливість графічного представлення завантаженості всіх базових станцій.

Для генерації адекватного навантаження на базову станцію мобільної системи було використано такі закони розподілу. Для генерації інтервалів між надходженням викликів був використаний нормальний закон розподілу, а для генерації тривалості викликів – експоненціальний. В програмі реалізована можливість коригування параметрів генератора в процесі роботи моделі, що дає змогу динамічно змінювати часові характеристики навантаження, яке створюється абонентами в комірці. На рис.3.4 відображено графік залежності зміни кількості активних абонентів в часі для трьох комірок окремо.



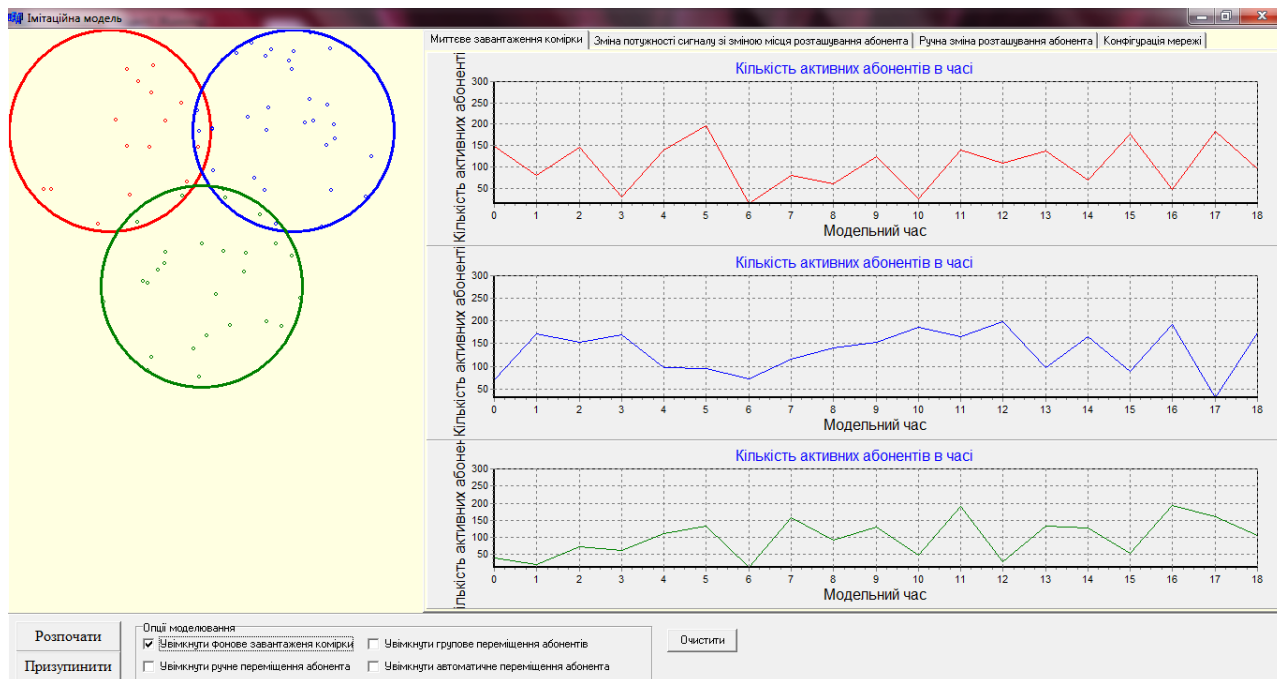


Рис.3.4. Графічний інтерфейс програми, що реалізує імітаційну модель мобільної системи обслуговування

Для оцінки параметрів потужності сигналу введена можливість нанесення на карту координат абонента, як в автоматичному так і в ручному режимі. В автоматичному режимі здійснюється переміщення абонентів у різні моменти часу з різною швидкістю. На основі даних про переміщення абонентів у майбутньому можна прогнозувати в якій комірці опиниться абонент, а відповідно прогнозувати можливе навантаження на ту чи іншу комірці.

Поширення сигналу, а відповідно і його згасання, описується за допомогою моделі Окумура-Хата для міського регіону, де найбільше проявляється ефект багатохвильового поширення.

Отже, розрахунок згасання у моделі для міста ведеться із наступних співвідношень:

$$L_{[дБ]} = 69,55 + 26,16 \cdot \lg(f_{[МГц]}) - 13,82 \cdot \lg(h_{N[M]}) - a(h_0) + \left( \left[ 49,9 - 6,55 \cdot \lg(h_{N[M]}) \right] \right) \cdot \lg(d_{[км]}) \quad , дБ \quad (3.2)$$

де  $f$ <sub>[МГц]</sub> – несуча частота, для системи GSM-900 – усереднено 900 МГц, МГц,  $d$ <sub>[м]</sub> – радіус комірки, км,  $h_0$ <sub>[м]</sub> – висота мобільної станції, м,  $h_N$ <sub>[м]</sub> – висота встановлення базової станції, м.

В автоматичному режимі переміщення програма виводить на графіки, що знаходяться праворуч від карти покриття, залежність зміни потужності отриманого сигналу від його місця знаходження для кожної базової станції різними кольорами (рис.3.5.). Отримані графіки на рис.3.5. підтверджують той факт, що зі збільшенням віддалі від базової станції потужність прийнятого сигналу зменшується.

Також у програмі реалізована можливість вручну змінювати місце розташування абонента і таким чином досліджувати зміну потужності отриманого сигналу від віддалі мобільного терміналу від базової станції (рис.3.5).

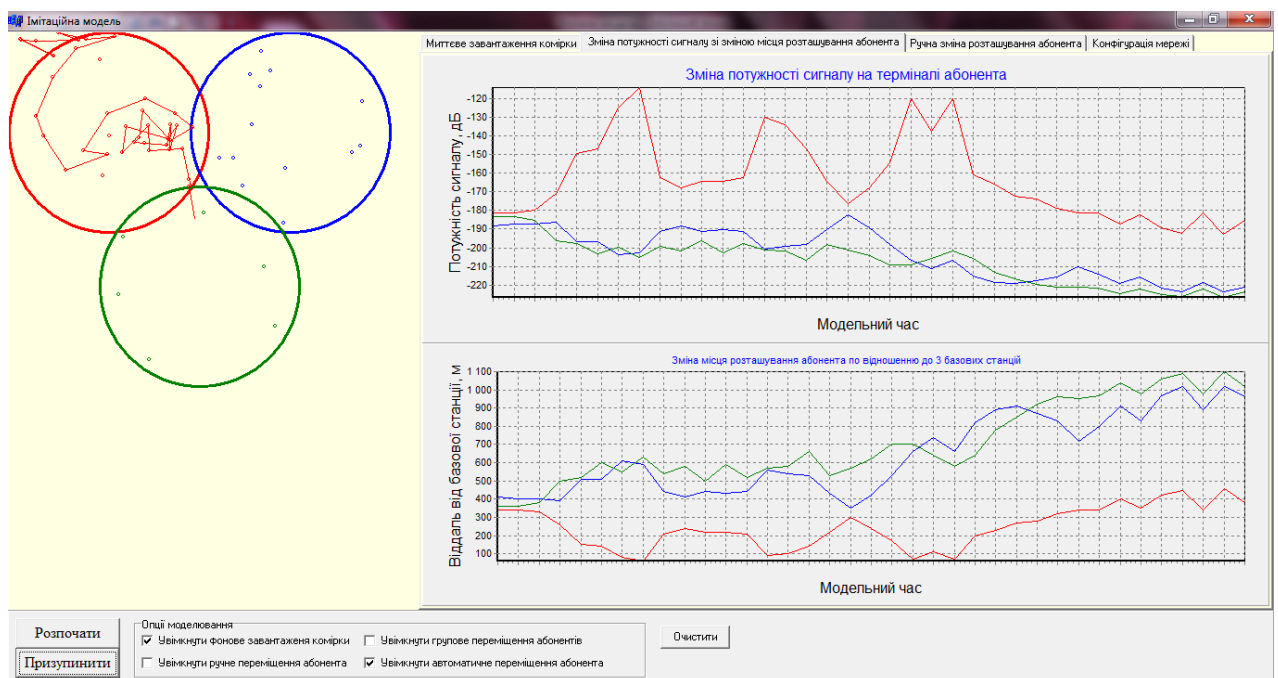


Рис.3.5. Візуалізація впливу місця розташування мобільного терміналу на потужність отриманого сигналу

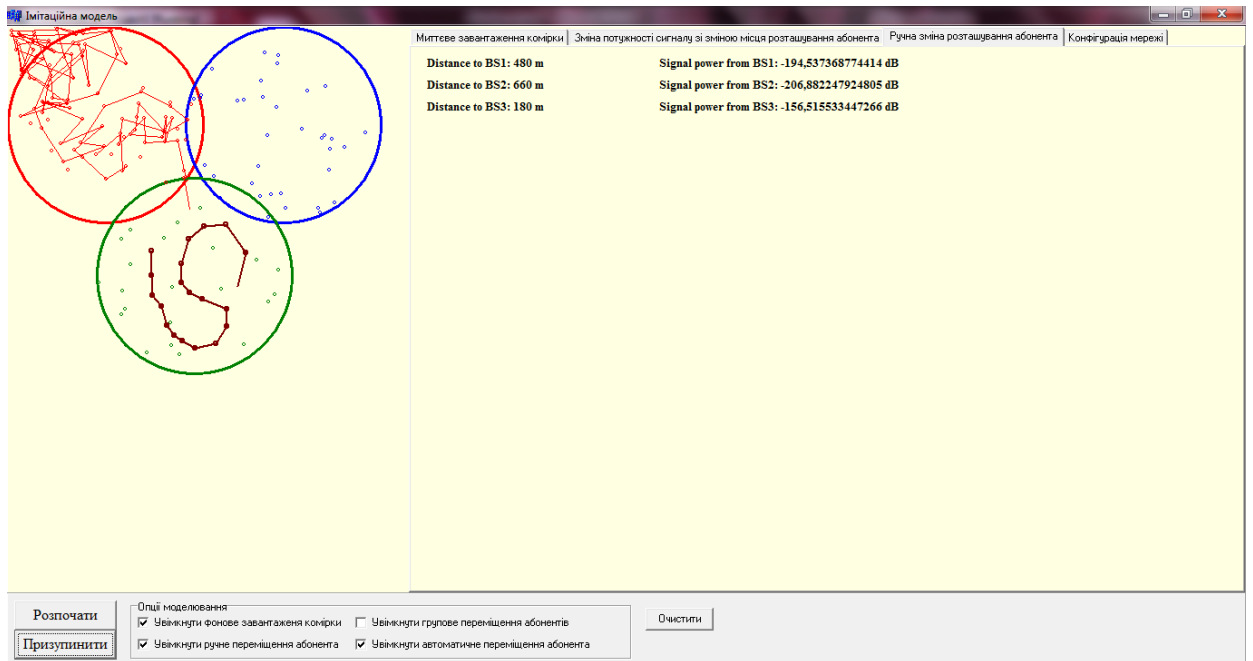


Рис.3.6. Дослідження зміни потужності сигналу від віддалі до базової станції методом ручного переміщення мобільного терміналу

Однією з основних функцій моделі є групове переміщення абонентів. На рис.3.7 можна спостерігати, як за допомогою мишки, користувач може змінювати інтенсивність переміщення абонентів у вибраному напрямку.

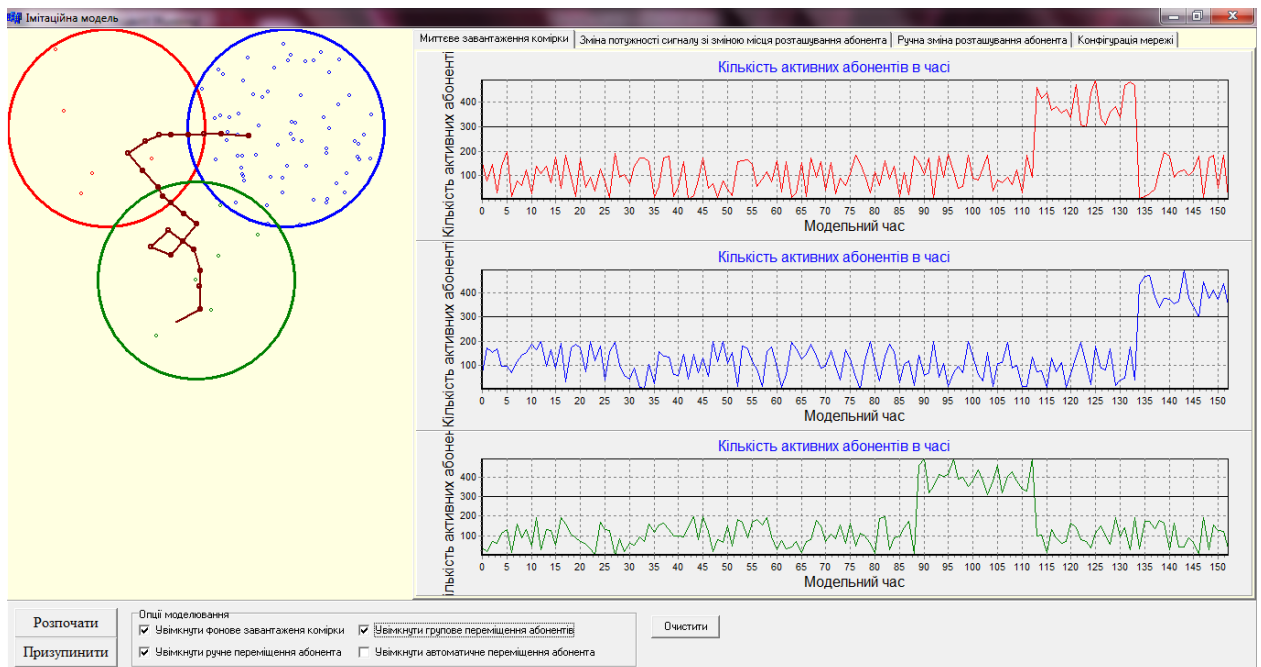


Рис.3.7. Дослідження зміни завантаженості базової станції при груповому переміщенні абонентів

В процесі імітації для отримання наглядних результатів моделювання локального перевантаження було зменшено кількість абонентів, які може обслуговувати базова станція, та згенеровано зростання кількості мобільних абонентів. З отриманих результатів з рис.3.7. можна зробити висновок, що в різні часові інтервали, абоненти, які швидко змінюють своє місце розташування, можуть значно вплинути на завантаження не тільки на базову станцію, в межах дії якої вони знаходяться, але і на сусідні базові станції, оскільки імовірність переміщення їх в сусідню комірку зростає. Для прогнозування можливості переходу абонента в сусідню комірку необхідно враховувати вектор переміщення абонентів, який складається з швидкості абонента, напрямку його руху, імовірності зміни першого та другого параметру, потужності сигналу.

### 3.3. Модель емуляції роботи гетерогенної системи мобільного зв'язку

В роботі розроблено модель гетерогенної мережі із реалізацією механізмів розвантаження систем LTE/GSM/UMTS [15], забезпечуючи необхідні показники якості обслуговування на основі запропонованого адаптивного алгоритму управління радіо ресурсами (рис. 3.8).

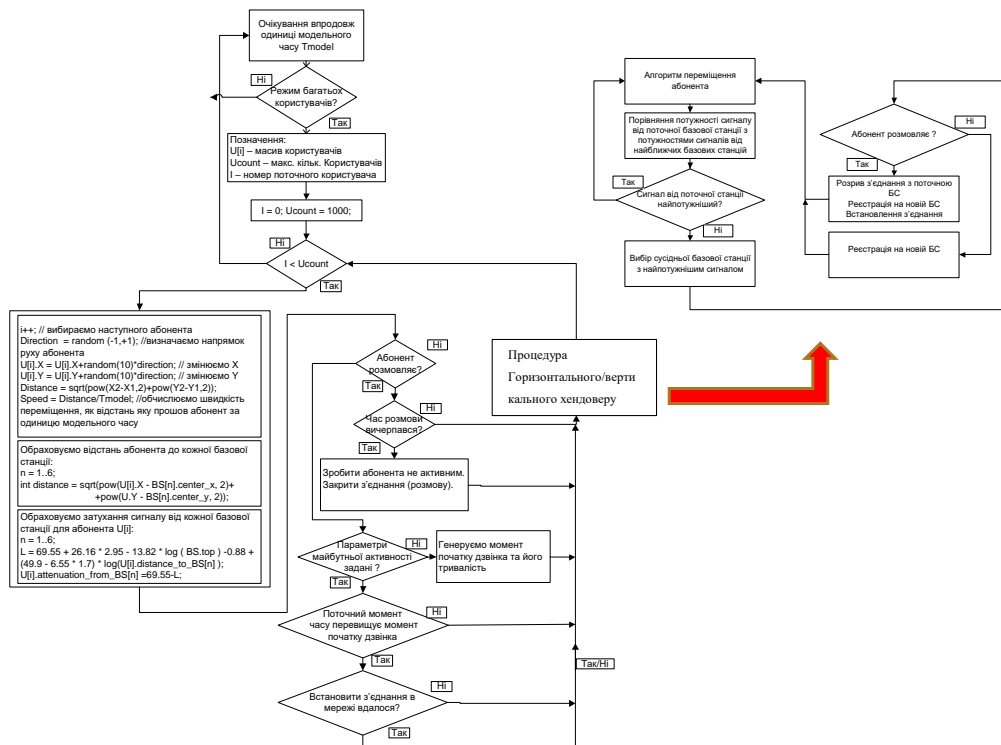


Рис. 3.8. Алгоритм управління радіоресурсами гетерогенної системи мобільного зв'язку [15]

Суть вимушеного перерозподілу радіоресурсу полягає у перенесенні частини абонентського навантаження з сектору з підвищеним завантаженням чи перевантаженням до сектору з меншим рівнем завантаження для однорідних та неоднорідних мереж (3.11) . Це здійснюється шляхом перенесення абонентського навантаження (вимушеного хендоверу) між суміжними секторами в межах спільної території покриття. Для здійснення вимушеного хендоверу необхідно задовольнити дві умови:

- потужність сигналу, який абонент отримує від сусідньої базової станції, дорівнює або перевищує мінімальне робоче значення;
- переміщення абонента за середню тривалість сеансу зв'язку незначне порівняно з радіусом комірки [16].

Для реалізації вимушеного перерозподілу радіоресурсів, потрібно провести класифікацію абонентів за мобільність, а саме за швидкістю переміщення (чим нижча швидкість, тим вищий пріоритет для вимушеного хендоверу) та класом послуг (чим нижчий клас, тим вищий пріоритет для вимушеного хендоверу) [9].

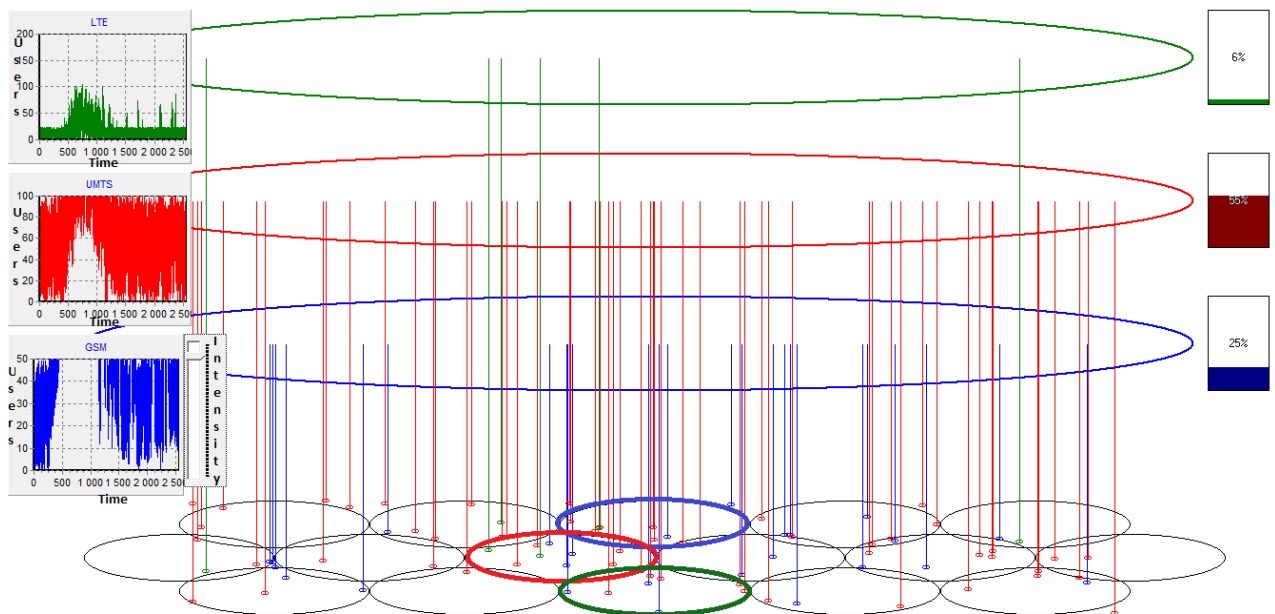


Рис. 3.9. Графічний інтерфейс програми, що реалізує імітаційну модель мобільної гетерогенної системи обслуговування [16]

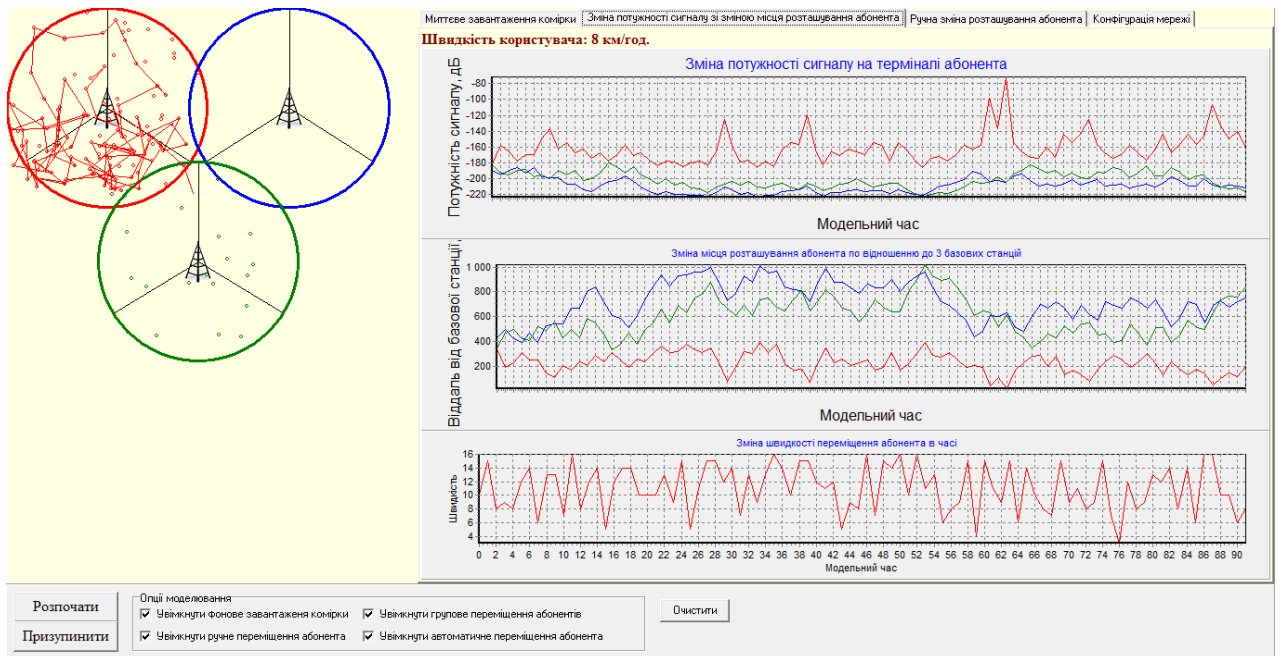


Рис. 3.10. Візуалізація впливу місця розташування мобільного терміналу на потужність отриманого сигналу

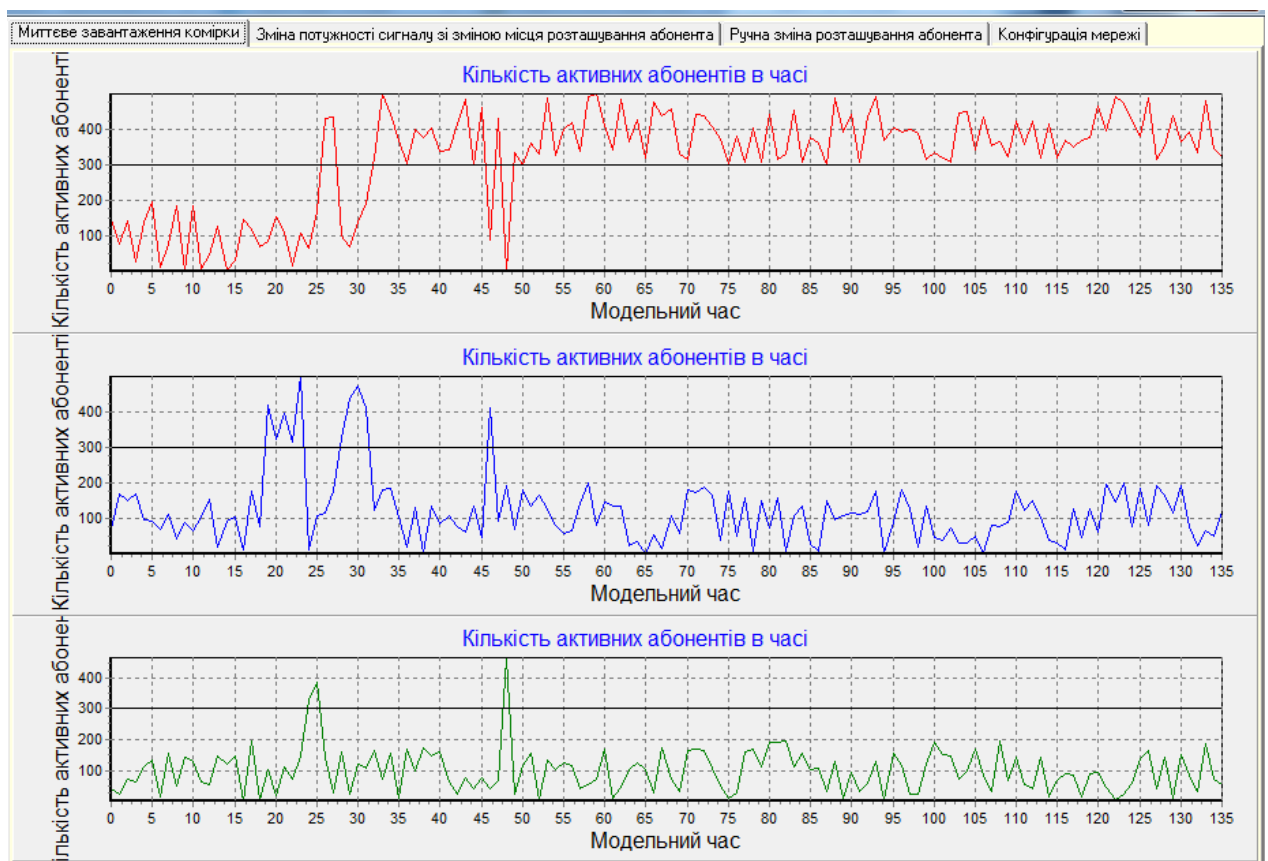


Рис. 3.11. Дослідження зміни навантаженості базової станції при груповому переміщенні абонентів гетерогенної системи

Запропоновано розв'язання задачі підвищення доступності мережевих радіоресурсів методом балансування абонентського навантаження на базі

імітаційної моделі. У разі підвищеного навантаження або перевантаження одного чи більше секторів мережі мобільного зв'язку з трисекторними антенами використовується вимушений перерозподіл радіоресурсів.

### 3.4. Імітаційне моделювання процесів динамічного розподілу ресурсів у гетерогенній мережній платформі безпроводного доступу

В роботі розроблено імітаційну модель гетерогенної мережної платформи безпроводного доступу з використанням методу адаптивного вибору безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі на основі застосування теорії нечітких множин. Структурну схему імітаційної моделі представлено на рис. 3.12.

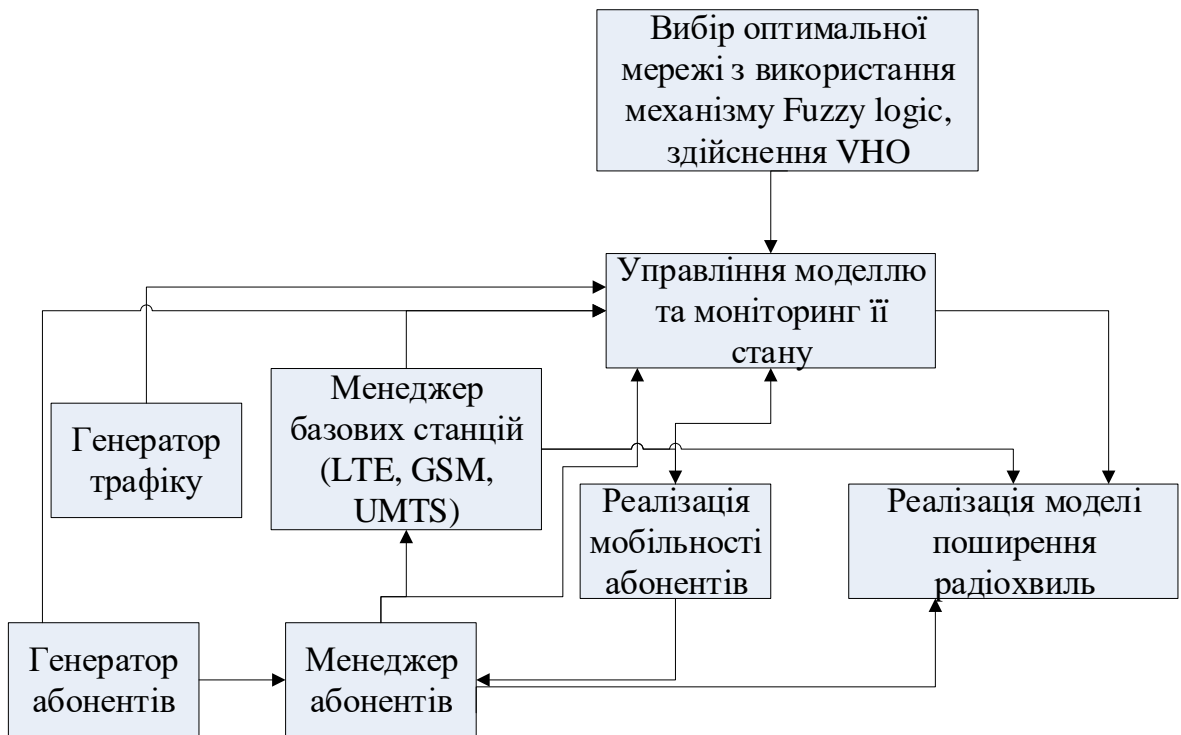


Рис. 3.12. Структурна схема імітаційної моделі гетерогенної мережної платформи безпроводного доступу

Одним із основних блоків структурної схеми імітаційної моделі є моделювання поведінки абонентів в мобільній мережі, який також пов'язаний із блоком генерації трафіку. Сформовані об'єкти-абоненти передаються «менеджеру абонентів». Якщо абонент перебуває в стані реєстрації в мережі і не здійснює активних сесій передавання, то він позначається в графічному інтерфейсі імітаційної моделі, як сіра точка. Якщо абонент має активне

з'єднання з базовими станціями мобільної мережі, тоді він позначається кольоровою точкою з певним кольором в залежності від того, до якої радіотехнології він підключений до: GSM - зелений колір, LTE - синій колір, UMTS - розовий колір.

Головне вікно програми, що реалізує моделювання відповідно до створеної імітаційної моделі показано на рис. 3.13. Інтерфейс містить компонент для відображення використання трьох базових станцій типу GSM, UMTS і трьох базових станцій типу LTE. Для розроблення такого програмного забезпечення в даній роботі використовується мова програмування C ++, базуючись на середовищі розроблення Borland Builder C ++ [2,3].

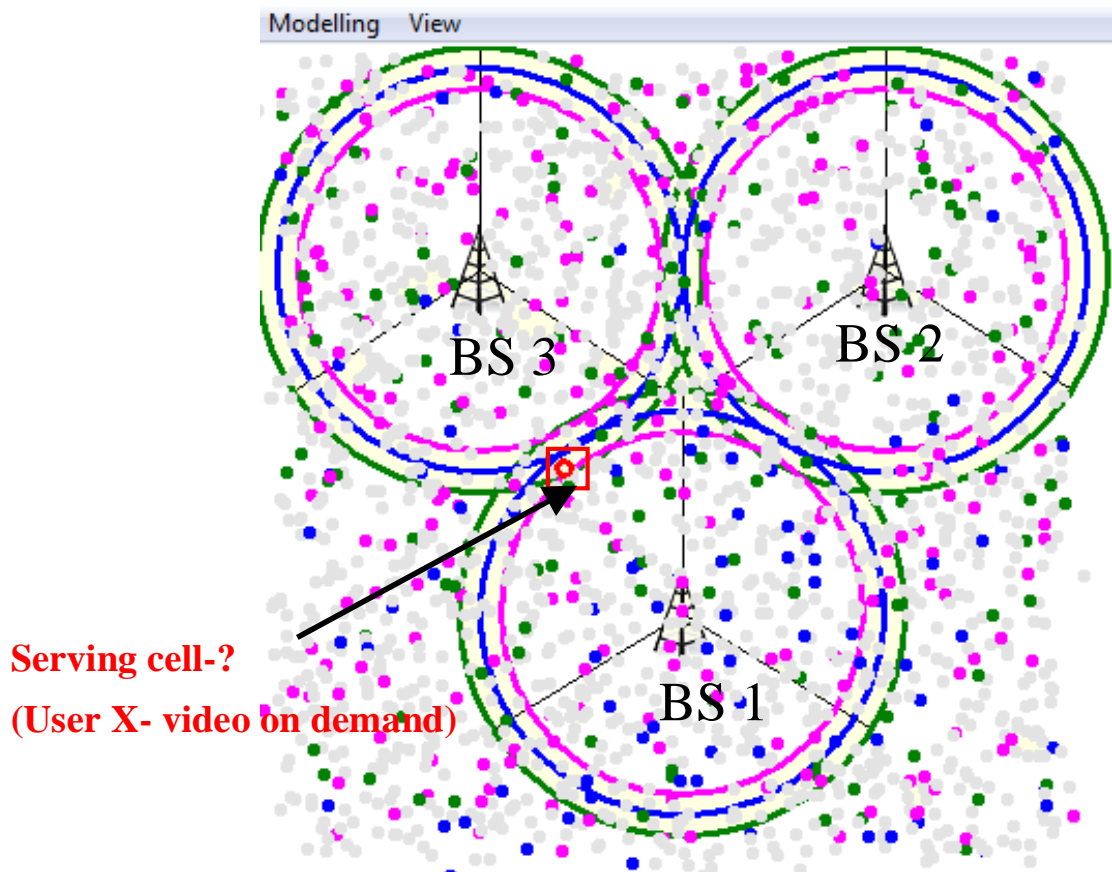


Рис. 3.13. Інтерфейс імітаційної моделі гетерогенної мережної платформи з можливістю зміни рівня вхідного навантаження для LTE, UMTS та GSM систем (в умовах високого системного завантаження)



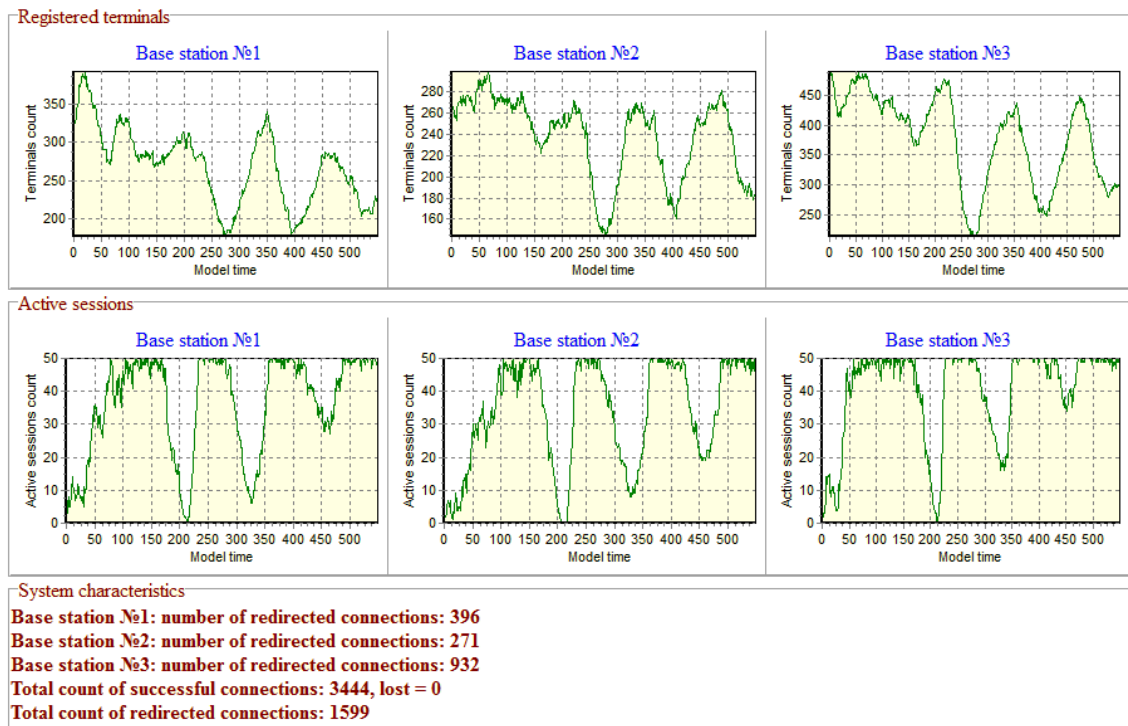


Рис. 3.14. Інтерфейс імітаційної моделі гетерогенної мережної платформи з можливістю зміни рівня вхідного навантаження для GSM систем (в умовах низького системного завантаження)

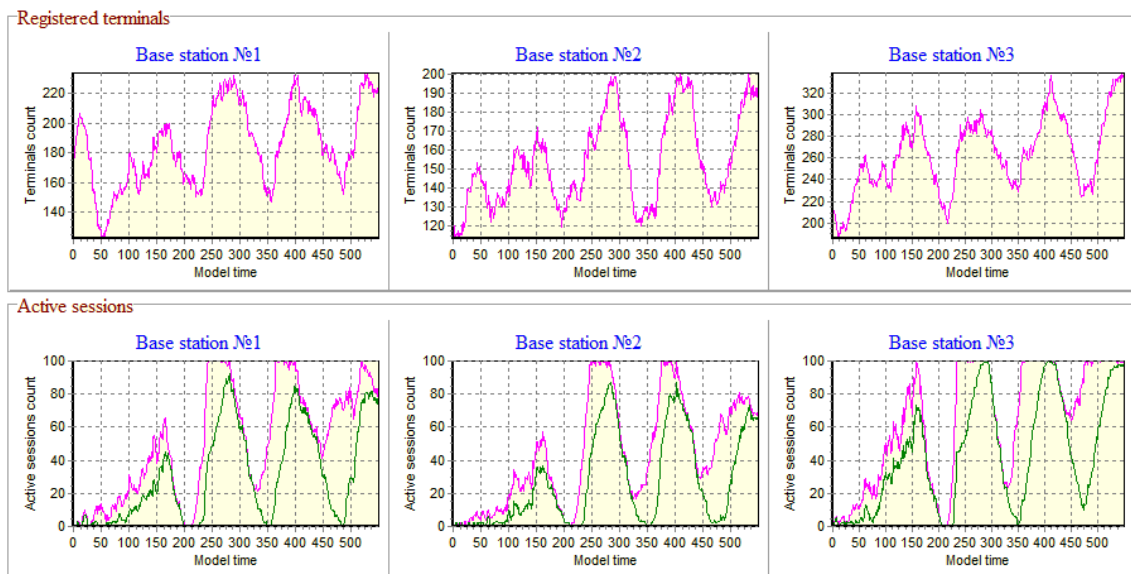
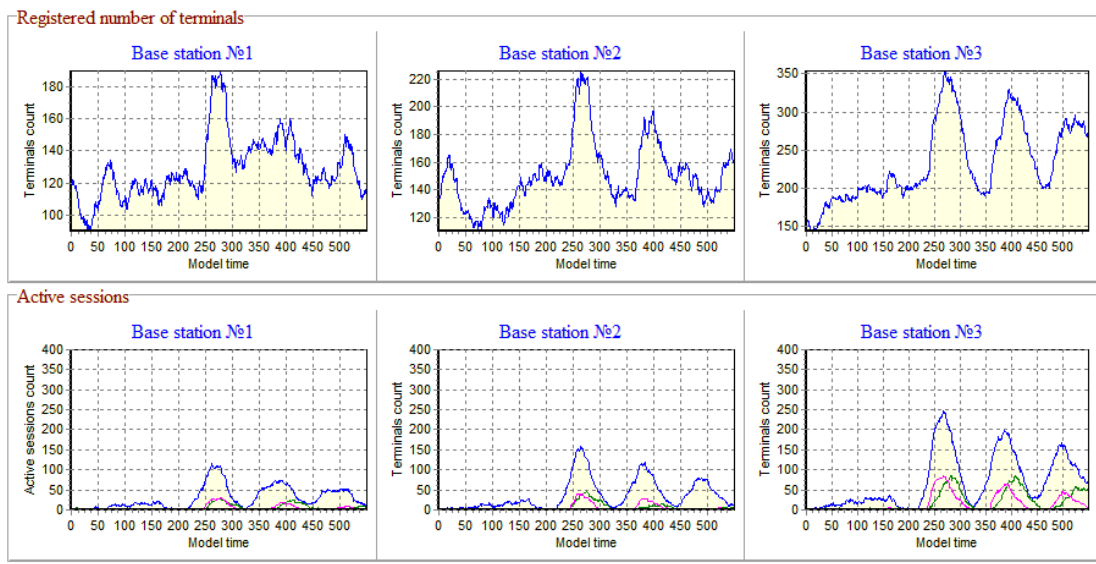


Рис. 3.15. Інтерфейс імітаційної моделі гетерогенної мережної платформи на основі UMTS систем, представлено моніторинг зареєстрованих та переключених груп користувачів у GSM комірках



**Характеристика**  
 Base station №1: connection lost count: 0  
 Base station №2: connection lost count: 0  
 Base station №3: connection lost count: 0  
 Total count of successful connections: 4215  
 Total percentage of losses in the network: 0%

Рис. 3.16. Інтерфейс імітаційної моделі гетерогенної мережної платформи на основі LTE, UMTS та GSM систем, представлено моніторинг зареєстрованих та переключених груп користувачів у LTE комірках

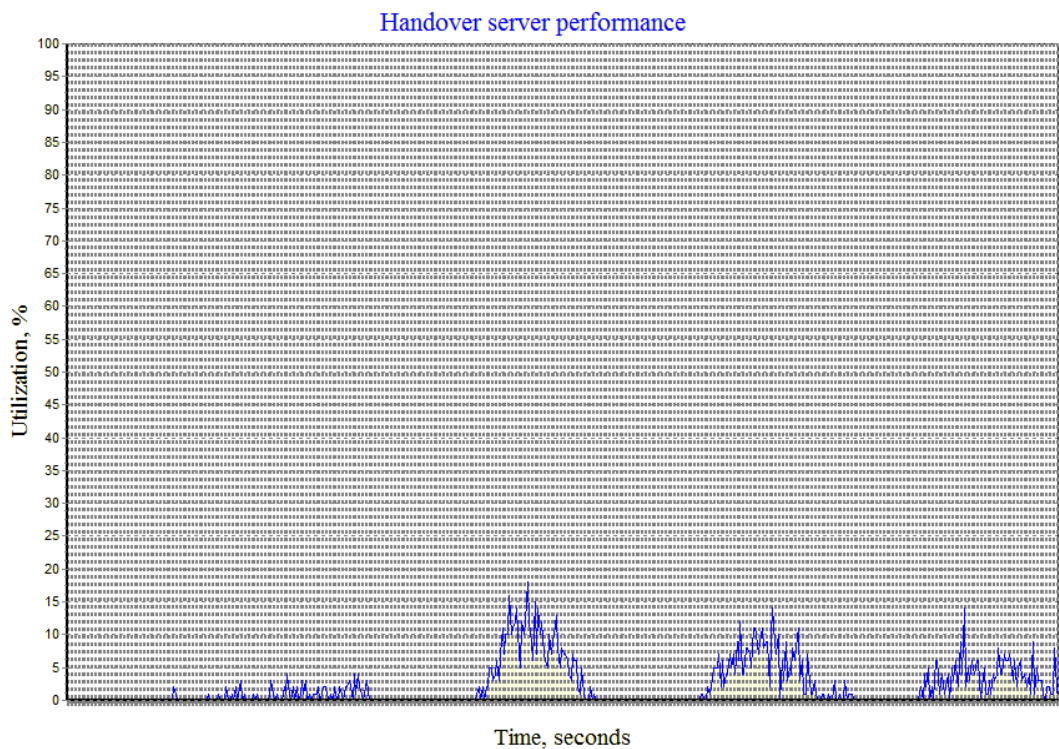


Рис. 3.17. Завантаження хмарного сервера, що містить програмне забезпечення, яке відповідає за проведення інтелектуальної вертикальної передачі даних

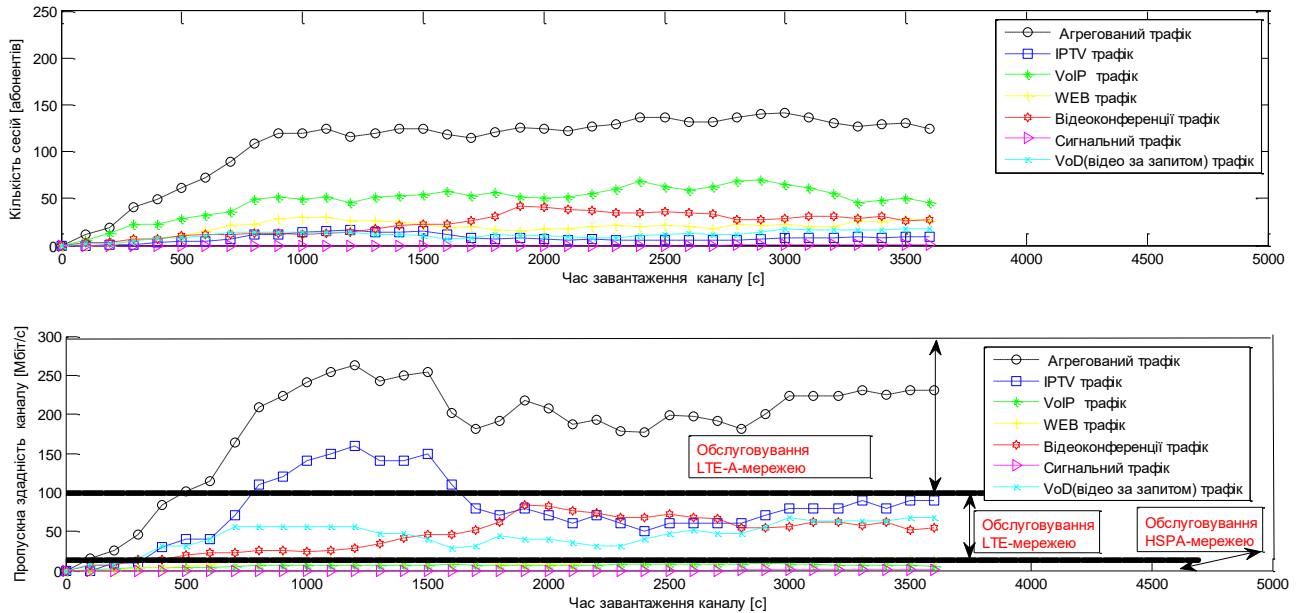


Рис. 3.18. Навантаження на гетерогенну інфраструктуру від різних мережних систем доступу та поріг ініціювання інтелектуального вертикального хендвера

Для того, щоб порівняти продуктивність системи без інтелектуальної вертикальної передачі, та з нею, програма має можливість відключити цей алгоритм. Таким чином, застосування запропонованого методу, який базується на теорії нечітких множин кількісно демонструє різницю між параметрами QoS (затримкою та джитером) відеосервісу реального часу випадкового користувача. При стандартному методі вибрано вузол доступу - UMTS BS1 (рис. 3.19а), середня затримка становить 0,6 с (рис. 3.19б), а джитер - 30 мс. (рис. 3.19в). Для запропонованого методу переключення, який базується на теорії нечіткої логіки вибрано вузол доступу - LTE BS1 (рис. 3.19г), затримка становить 104 мс. (рис. 3.19д) і джитер - 5 мс. (рис. 3.19е).

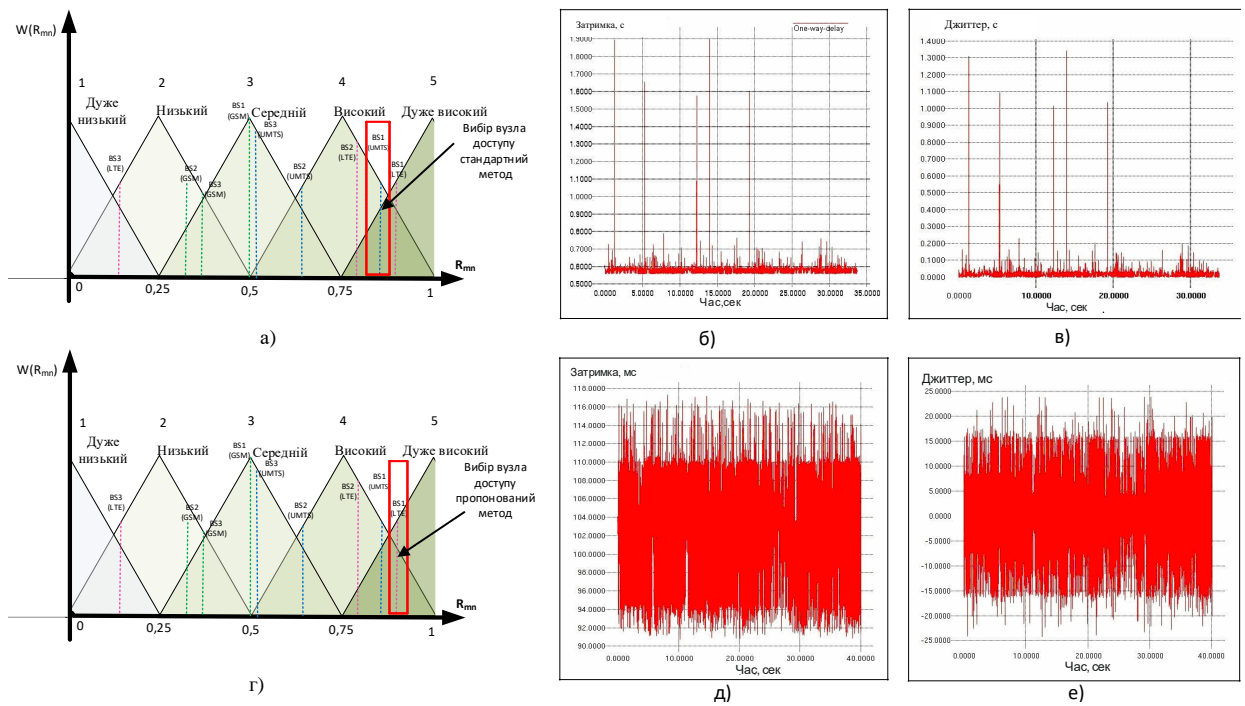


Рис. 3.19. Визначення оптимального вузла мережної системи доступу для виконання хендвера за шкалою Лікерта а), середня затримка пакетів б), та джитер в) при перегляді IPTV за стандартним методом , вибір мережної системи доступу г) середня затримка пакетів д) та джитер е) при перегляді IPTV із запропонованим методом

Отже, з допомогою імітаційної моделі проведено дослідження не тільки процесів балансування навантаження між БС різних типів, але і підвищено якість обслуговування клієнтів операторами стільникового зв'язку.

### 3.5. Висновки до розділу 3

Для прийняття оптимального за критеріями групи QoS рішення щодо процедури ресурсного перерозподілу під час обслуговування користувачів мережних платформ безпроводного доступу автоматизовано централізований метод управління хендвером. Запропонований підхід дає змогу уникати двозначності у трактуванні нечітко заданих, двозначних та суб'єктивних суджень у процесі багатокритерійної оптимізації. Для дослідження процесів функціонування реальних гетерогенних мережних систем в умовах високої мобільності користувачів розроблено імітаційну модель, яка, своєю чергою,

реалізує запропоновану в роботі метод прийняття рішення щодо вертикального хендовера. Це дає змогу налаштовувати велику кількість параметрів моделювання, використовуючи допоміжні математичні моделі, зокрема для опису та прогнозування процесів руху (мобільності) користувачів, а також поширення радіохвиль до їх термінального обладнання. Як показано, вибір оптимального мережного вузла доступу на основі вирішення багатокритерійного завдання прийняття рішення щодо хендоверу є нетривіальним, оскільки на результати цього розв'язання впливають одночасно кілька динамічно-змінних і взаємопов'язаних факторів, тому їх агрегація згідно із запропонованими у роботі підходами є необхідною. В амбівалентній ситуації, коли користувач знаходиться на границі покриття комірки, запропонований в роботі алгоритм дав змогу прийняти обґрунтоване рішення щодо проведення процедури вертикального хендовера, базуючись на групі QoS-залежних критеріїв [2,3].

## **РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ВЕЛИКИХ ОБ'ЄМІВ ДАНИХ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ**

### **4.1. Етапи підвищення ефективності функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку**

На сьогоднішній день обсяги мобільного трафіку стрімко зростає у зв'язку з тотальним поширенням різноманітних мобільних пристроїв. Основний обсяг мережного трафіку складає мобільне відео в інтернеті, соціальні медіа та популярні сервіси Інтернету речей. Тому, необхідне рішення, що дозволить оператору перейти на централізовану і гнучку архітектуру гетерогенної мережі, в якій управління ресурсами відіграє вирішальну роль, з використанням останніх досягнень в області збереження інформації та в хмарних обчисленнях [19]. Велика кількість мобільних пристроїв, широко використовується і щодня виробляє величезну кількість даних. Це здійснює глибокий вплив на суспільство та соціальну взаємодію, а також створює величезні труднощі для мобільних операторів мережі (Mobile Network Operators, MNOs). Об'єм, швидкість та різноманітність даних як мобільних користувачів, так і мереж зв'язку збільшуються в геометричній прогресії. Відповідно, в найближчому майбутньому постає потреба збору даних та їх аналізу для прийняття рішення щодо гнучкого управління ресурсами в гетерогенних системах. Що дасть змогу MNOs аналізувати та прогнозувати поведінку та вимоги мобільних користувачів, що, у свою чергу, дозволяє приймати інтелектуальні рішення у режимі реального часу у широкому колі додатків. Аналізуючи ці дані, мобільні мережі можуть фактично надавати та підтримувати різні інтелектуальні служби. Нові технології необхідні для обробки великих даних у високомасштабній, економічно ефективній та неструктурованій формі. Важливим елементом є відомості про унікальні характеристики великих даних у мобільних гетерогенних мережах, тому що це має вирішальне значення для їх оптимізації. Розробка аналітичних методів дасть змогу допомогти MNOs відслідковувати та аналізувати різноманітні типи даних, а також повідомлення

про стан ресурсів в мережах. Логіка управління і важливі статистичні дані можна отримати як з миттєвих, так і з даних, що знаходяться в історії зібраних статистик. Корисна інформація, така як співвідношення між поведінкою користувачів та мережевим трафіком, може допомогти MNOs не тільки приймати рішення на основі довгострокових стратегій, але й оптимізувати розподіл ресурсів, щоб мінімізувати розміщення та експлуатаційні витрати. Однак важливим завданням є розуміння вимог використання великих аналітичних даних для надання користувацьких послуг із високою якістю обслуговування та забезпечення високоефективного використання ресурсів у майбутніх гетерогенних мережах.

Тому в даній дисертаційній роботі запропоновано алгоритм оптимізації гетерогенної мережі із використанням технології обробки великого об'єму даних (Big Data). Запропонована схема дає змогу під час оптимізації інфраструктури використовувати дані, як користувача, так і мережі, що в свою чергу дасть змогу покращити ефективність функціонування мережі в цілому. Структура мережі необхідної для роботи алгоритму, у спрощеному вигляді, представлена на Рис.4.1.

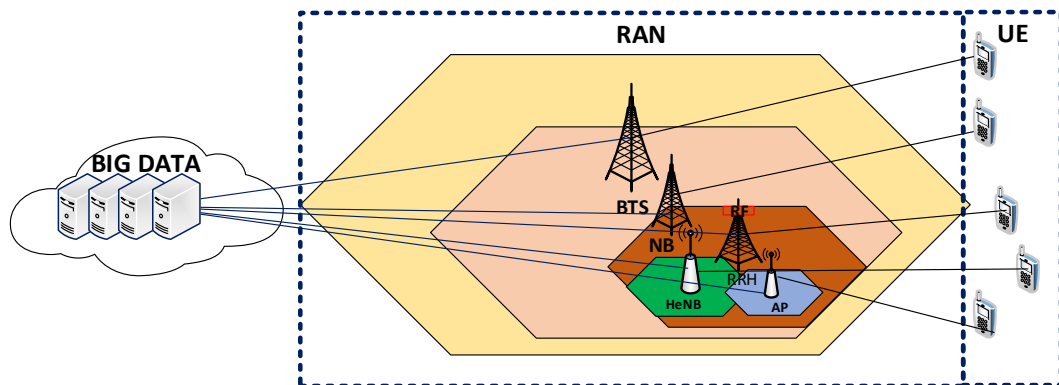


Рис. 4.1. Спрощена архітектура гетерогенної мережі

Гетерогенна мережа зазвичай складається з багатьох комірок різних технологій. Така багатошарова мережева архітектура може забезпечити високу ємність, надати необхідний рівень якості обслуговування. Шляхом використання BD та адаптації різних мережевих ресурсів відповідно до динамічно змінних часових характеристик можна покращити пропускну здатність всієї мережі. З метою підвищення ефективності мережевої

інфраструктури в умовах зростаючого навантаження на MNOs рекомендується класифікувати запити трафіку користувачів до необхідних мережних ресурсів та покращити ефективність їх розподілу за допомогою використання інтелектуальної та аналітичної інформації на основі великих даних. На Рис.4.2 представлено загальний принцип роботи запропонованого алгоритму для оптимізації гетерогенної мережі із використанням Big Data .

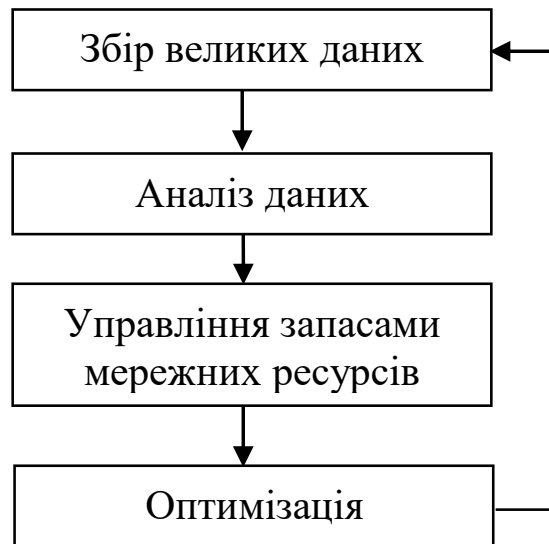


Рис. 4.2. Етапи процесу оптимізації гетерогенної мережі

На **першому** етапі відбувається збір великих даних. Збір даних може бути досягнутий за допомогою користувацького обладнання (UE), мережі радіодоступу (RAN) та постачальників послуг Інтернету (ISP). Події, що відбуваються в UE, збираються або за допомогою користувацьких програм, або через керуючий сигнал. В мережі радіодоступу RAN з NodeB (eNB), збираються миттєві звіти про вимірювання даних параметрів наведених у другому розділі. MNOs володіє величезною кількістю даних, що відносяться до носіїв/послуг користувачів у гетерогенній мережі.

Крім того, велика інфраструктура зберігання даних повинна мати масштабовану потужність, а також масштабовану продуктивність. Таким чином, керування затримками має бути простим та ефективним, щоб легко зберігати та сортувати великі дані.

На **другому** етапі проводиться аналіз зібраних даних. Після збирання та зберігання даних, ще одним серйозним викликом для MNOs є обробка таких



величезних обсягів даних. Зібрані дані є багаторазовими, неоднорідними, в реальному часі та об'ємними. З цієї причини технологія аналізу даних і технології вилучення інформації необхідна для обробки даних та їх перетворення для оптимізації мережі. Отже, ця інформація може бути використана для розробки адаптивних схем управління ресурсами. Аналіз даних дає змогу MNOs систематично керувати різними мережами доступу та надавати послуги клієнтам. Функції оптимізації мережі BD здатні аналізувати великі дані для виявлення проблем та вирішувати, що і як оптимізувати на відповідному рівні гетерогенної мережі. Заходи по вдосконаленню, засновані на результатах оптимізації, потім реалізуються за допомогою контрольних функцій в RAN. Крім того, може бути виконана оптимізація на рівні користувача. Зокрема, для користувачів, які знаходяться в одній комірці, оптимізація може бути налаштована для кожного користувача залежно від класу обслуговування (пріоритетні та не пріоритетні користувачі). Також, функція оптимізації мережі BD здатна передбачати коливання трафіку як в локальній зоні так і в глобальній зоні покриття мережі, що в кінцевому підсумку допоможе покращити функціонування мережі і якість наданих послуг користувачам.

На **третьому** етапі відбувається управління ресурсами оператора мережі радіодоступу. MNOs повинні бути проінформовані про свої довгострокові цілі щодо розгортання мережі з точки зору пропускної здатності, покриття, кількості і локалізації базових станцій, і т.д. Вони також потребують нових стратегій розподілу ресурсів, щоб виконати різні вимоги до трафіку по всій території покриття. Таким чином, використання великих аналітичних даних може стати новим способом вирішення цих проблем. Мережева аналітика включає в себе моніторинг та аналіз статистичних даних користувачів, які дають змогу прогнозувати критичні точки та стан мобільних мереж в режимі реального часу. На основі отриманих даних MNOs приймаються інтелектуальні рішення, щодо обслуговування користувачів, шляхом балансування навантаження та пріоритезації трафіку для підвищення ефективності

функціонування та забезпечення необхідної якості обслуговування в гетерогенній мережі [4].

На **четвертому** етапі вирішується задача оптимізації гетерогенної мережі шляхом застосування комплексного методу, який включає процедуру ініціації вертикального хендоверу, перерозподілу потоків та відкидання неперіоритетних сеансів користувачів.

#### 4.2. Постановка імітаційного моделювання процесу оптимізації гетерогенної мережі

Для простоти розуміння у роботі запропоновано ієрархічне представлення вхідних даних щодо проведення імітаційного моделювання розробленого комплексного методу оптимізації гетерогенної мережі.

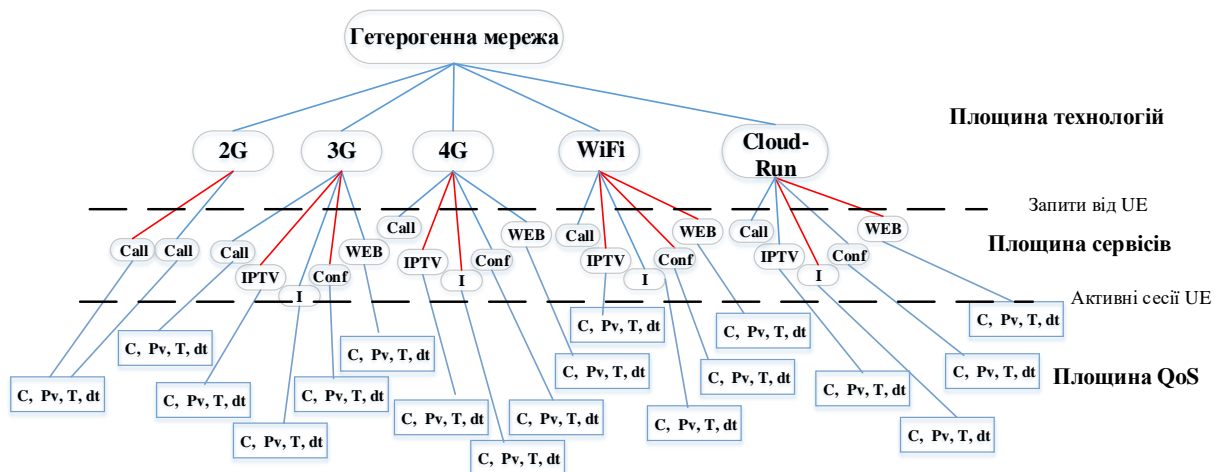


Рис. 4.3. Ієрархічна структура вхідних даних моделювання досліджуваної гетерогенної мережі

На рис. 4.3. представлена ієрархічна структура вхідних даних моделювання досліджуваної гетерогенної мережі, яка складається з:

- Площини технологій;
- Площини сервісів;
- Площини QoS.

До **площини технологій** відносяться мобільні технології оператора зв'язку 2G, 3G, LTE, Cloud-RAN, WiFi. Для моделювання прийнято, що всі технології працюють в межах радіусу дії комірки 2G. Також, в дисертаційній

роботі розглядаються лише одна базова станція, яка працює з представленими технологіями.

На кожну з базових станцій поступають запити від UE, які умовно розділені на пріоритетні запити (на рис. 4.3 позначені червоним кольором) та непріоритетні (позначені синім кольором).

Для прикладу було прийнято, що від абонентів можуть поступати запити на такі типи послуг:

- Дзвінки (Call) – передавання мови по IP мережах (Voice over IP).
- Цифрове інтерактивне телебачення (IPTV).
- Інтернет дані (I), що включає в себе завантаження та скачування даних з інтернет ресурсів.
- Відео-конференції (Conf).
- WEB.

Дані типи сервісів утворюють **площину сервісів**. Кожна базова станція отримує запити від UE з типом сервісів, відповідно запити від абонентів можуть утворити активні та неактивні сесії. Для підключення та обслуговування UE потрібно надати йому необхідну якість обслуговування, яка представлена в площині QoS.

В **площині QoS** використовуються допустимі параметри якості обслуговування сесій згідно рекомендацій ITU-T, для забезпечення користувачам гарантованої якості (Табл.4.1).

- Пропускна здатність (C).
- Ймовірність втрат (Pv).
- Час затримки (T).
- Джитер (dt).

Параметри QoS

Тип трафіку	Ймовірність Втрат пакетів (P <sub>v</sub> )%	Затримка (T)мс	Джитер (dt)мс	Пропускна здатність C(кбіт/с)
Голос	0.1	150	10	64
Відео-конференція	0.8	100	20	2048
IPTV	1.5	1000	50	4096
Інтернет дані	0.1	1000	1000	2048
WEB	0.05	500	30	10240

Для обробки великих об'ємів даних розроблено декілька платформ, найпопулярнішим з яких є Hadoop. Apache Hadoop - це проект Apache Software Foundation, що являє собою велику платформу для аналізу даних, яка орієнтована на аналітику історичних даних на основі часу та періодичності. Хоча найбільшою популярністю в сфері розподіленого аналізу даних користується Hadoop, існують альтернативи, які пропонують деякі важливі переваги в порівнянні з типовою Hadoop-платформою. Spark - це масштабована платформа аналізу даних, яка включає в себе примітиви для обчислень в оперативній пам'яті та має деякі переваги в частині продуктивності по відношенню до підходу Hadoop, заснованому на кластерній схемі зберігання даних.

Як і в традиційних додатках реляційної бази даних, в сучасних додатках Web, mobile і IOT зазвичай потрібно база даних, для онлайн-операцій (включаючи аналітику по гарячим даним) і пакетного сховища даних, яка підтримує обробку не термінових даних для аналітичних цілей.

Apache Cassandra - ідеальний вибір бази даних для онлайн-додатків в Інтернеті і мобільних додатках, тоді як Hadoop націлений на обробку статистичних даних не критичних до часу. Це дає змогу ІТ-організаціям ефективно підтримувати різні аналітичні «темпи», необхідні для задоволення вимог клієнтів і управляти бізнесом.

HBase - це open source, NoSQL, розподілена база даних, змодельована після BigTable від Google і написана на Java. Вона входить до складу Apache Hadoop проекту Apache Software Foundation і працює поверх HDFS (розподіленої файлової системи Hadoop), надаючи можливості BigTable для Hadoop. HBase призначений для підтримки випадків застосування сховища даних і зазвичай не використовується для розподілених веб-додатків і мобільних додатків, яким необхідна високопродуктивна онлайн-база даних [63-66].

HBase іноді використовується для онлайн-додатків, оскільки існуюча реалізація Hadoop існує на сайті, а не тому, що вона підходить для додатка. HBase, як правило, не є хорошим вибором для розробки постійно діючих онлайн-додатків і майже через 2-3 роки відстає від Cassandra в багатьох технічних аспектах.

У порівнянні з HBase, Cassandra виграє в:

- Високій продуктивності
- Неперервній обробці, «завжди увімкнена» без єдиної точки відмови
- Потужній і простій підтримці декількох центрів обробки даних/хмарної доступності
- Простій архітектурі (без майстрів) з більш простими налаштуваннями і меншими вимогами
- Простій мові програмування (SQL-подібна мова з CQL, більше)

Для гетегоренної мережі, яка є критичною до часу обробки вибрано базу даних Cassandra, та масштабовану платформу для аналізу даних Apache Spark. Apache Cassandra - це масштабована, відмовостійка база даних NoSQL, що підходить для швидкого запису та читання великої кількості неструктурованих даних. Apache Spark - це швидкий і загальний двигун для великомасштабної обробки даних.

### 4.3. Практична реалізація технології обробки великих об'ємів даних отриманих шляхом імітаційного моделювання гетерогенної мережі

Для практичної реалізації дисертаційної роботи, вирішено застосувати рішення Cloud, а саме DigitalOcean cloud.

Після успішного проходження реєстрації у сервісі хмарних рішень переходимо до створення нашого серверу (Droplet).

#### 1) Вибираємо сервер з ОС Ubuntu 16.04 x64

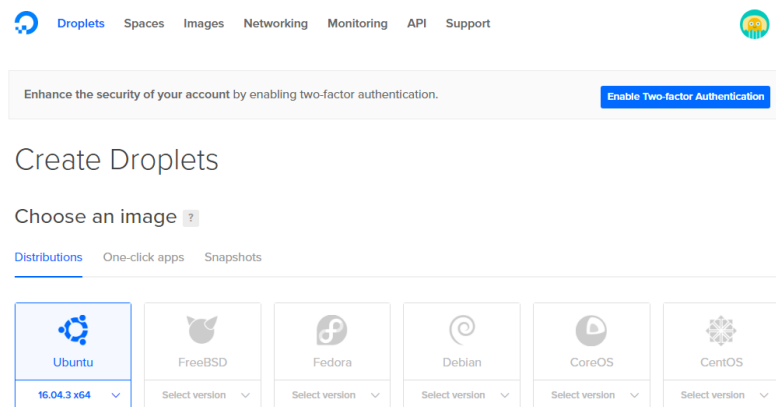


Рис. 4.4. Створення серверу. Вибір ОС

#### 2) Вибираємо тарифний план за 10 \$, який надає наступні ресурси: 1 gb RAM, 30 GB SSD Disk, 2 TB трафіку.

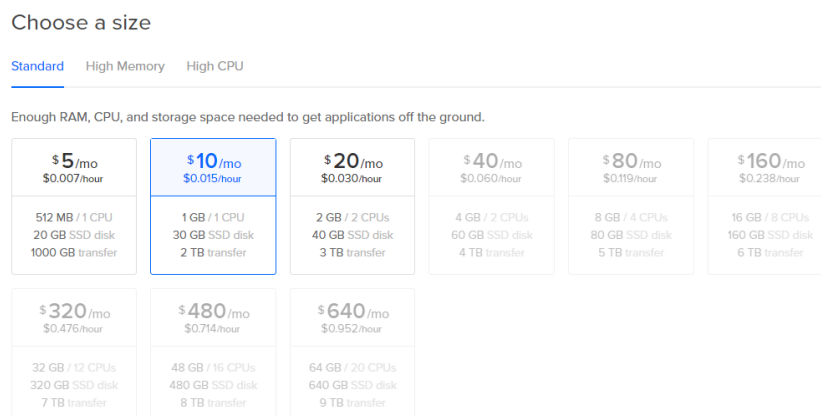


Рис. 4.5. Створення серверу. Вибір тарифного плану

#### 3) Переходимо до етапу вибору регіону та встановлюємо додаткові функції: моніторинг та бекапи.

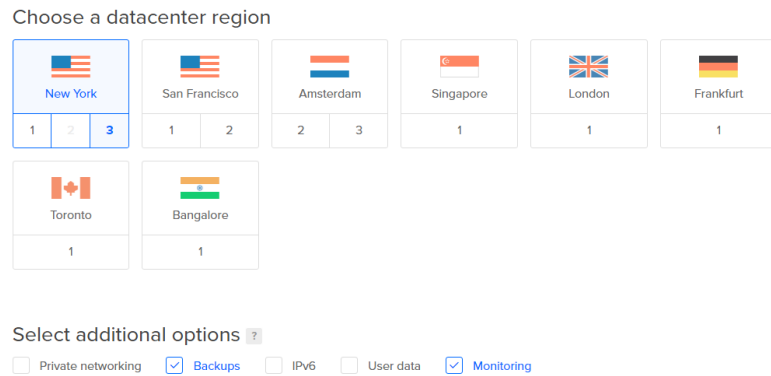


Рис. 4.6. Створення серверу. Вибір регіону

4) Додаємо попередньо згенерований ssh ключ, для зручності входу на сервер. Та створюємо сам сервер.

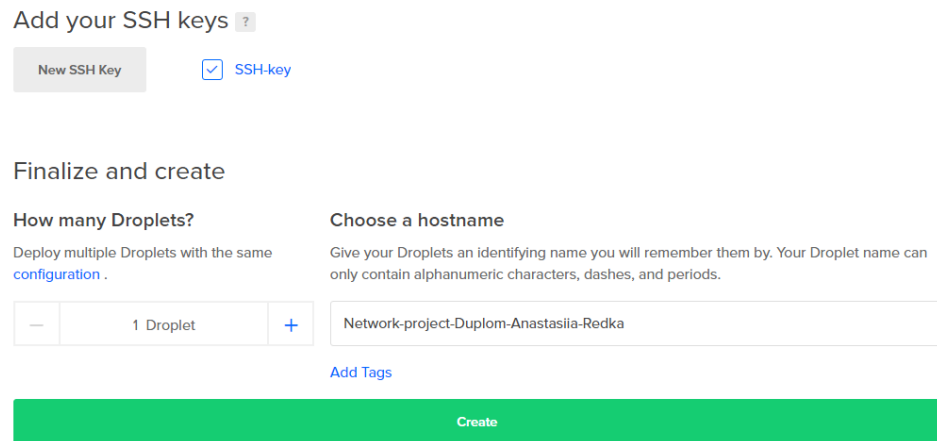


Рис. 4.7. Створення серверу та додавання ssh ключа

Створений Droplet (сервер) представлений на рисунку 4.8.

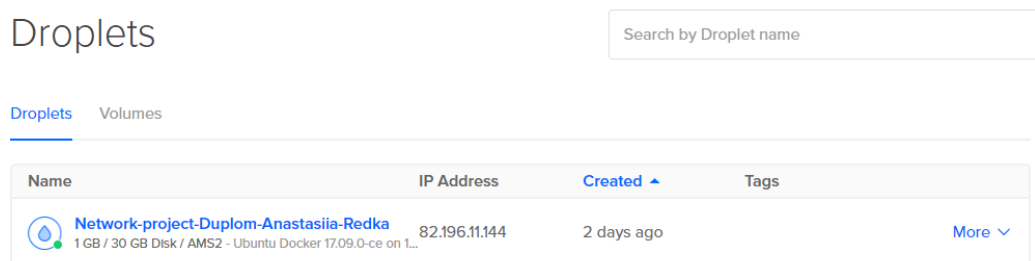


Рис. 4.8. Створений сервер на DigitalOcean з ОС Ubuntu 16.04

Після створення акаунту в DigitalOcean, переходимо до початкового налаштування серверу з ОС Ubuntu 16.04. Після проведення налаштування,

переходимо до встановлення програмного забезпечення необхідного для моделювання.

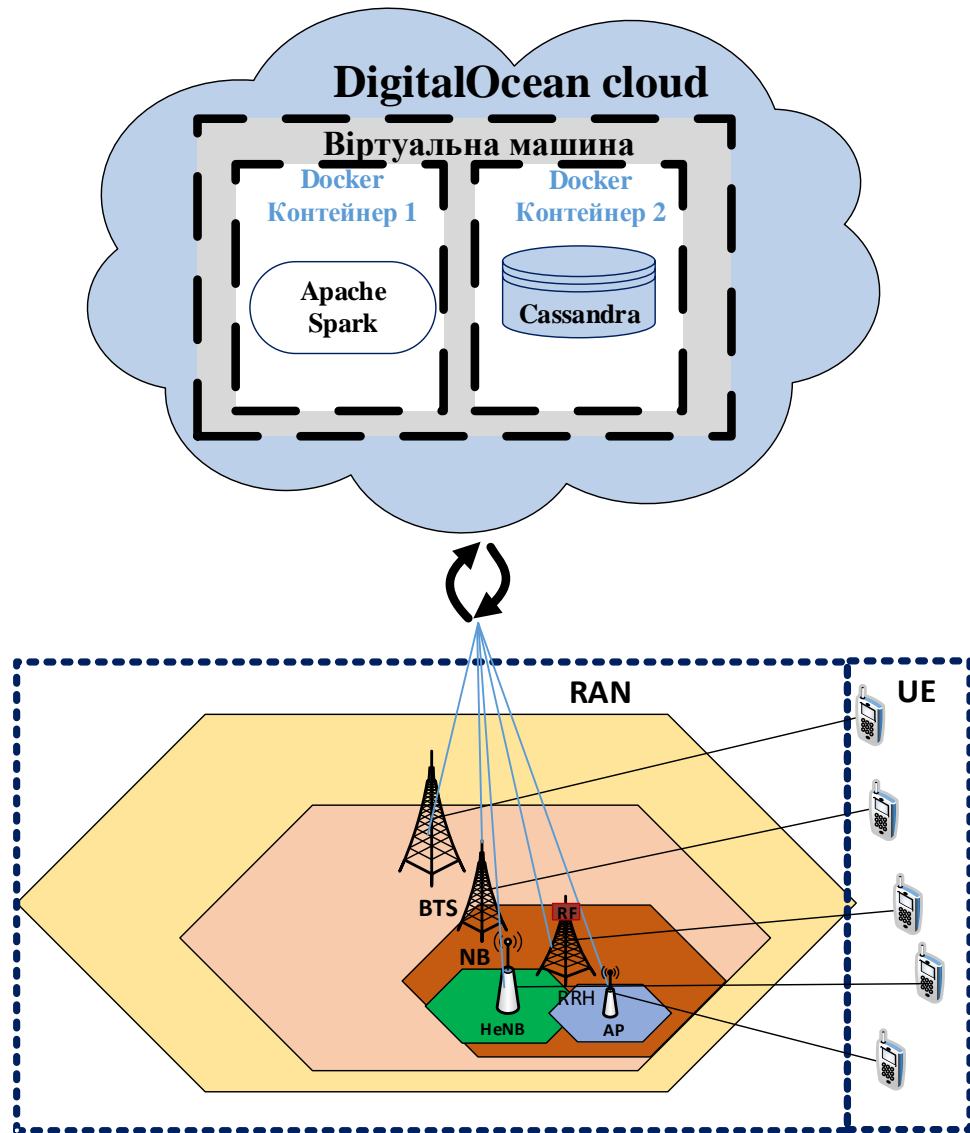


Рис. 4.9. Схема імітаційної моделі гетерогенної мережі з використанням практичної реалізації Big Data

У цьому розділі продемонстровано дослідження ефективності платформи Spark, для забезпечення аналізу великих об'ємів даних з базою даних Cassandra для гетерогенних мереж. На рис. 4.9 представлено схему імітаційної моделі для обробки великих даних.

Для розробки імітаційної моделі використано версії програмного забезпечення, наведені у таблиці 4.2.



## Програмне забезпечення використане в імітаційній моделі

Програмне забезпечення	Версія
Cassandra	2.2.5
Cqlsh	4.1.1
Cassandra Spark Connector	1.5
Spark	1.6.1
Docker	1.11.1
Docker-compose	1.7.1
Python	2.7.5

*Процес налаштування**Docker:*

По-перше, нам потрібно встановити та запустити `docker` та `docker-compose`. Щоб перевірити, що `docker` працює належним чином, набираємо команду `docker ps`.

*Cassandra:*

- 1) Необхідно розпочати роботу з контейнеру Cassandra.

Для запуску контейнера з БД Cassandra ми написали `docker-compose` конфігурацію, що представлена на рис. 4.10.

```

cassandra:
  image: cassandra:2.2.5
  container_name: "cassandra"
  restart: always
  environment:
    - CASSANDRA_CLUSTER_NAME=spark_demo
    - CASSANDRA_ENDPOINT_SNITCH=SimpleSnitch
    - CASSANDRA_START_RPC=true
  ports:
    - "127.0.0.1:9160:9160"

```

Рис. 4.10. Конфігурація для запуску контейнера з БД Cassandra.

Для того щоб використовувати `cqlsh` утиліту для Cassandra ми використовуємо порт 9160 на зовні з контейнера до 127.0.0.1:9160, ми будемо

використовувати цей порт для підключення до БД Cassandra через cqlsh від хоста.

Для запуску БД Cassandra за допомогою створеного конфігураційного файлу, виконуємо команду

```
docker-compose -f compose/cassandra.yml up -d
```

Перевіряємо, чи контейнер 2 (рис.4.4) створений за допомогою команди `docker ps`.

```
root@docker-1gb-ams2-01:~# docker ps
```

CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	STATUS
AMES 5e010f02ec3a	cassandra:2.2.5	"/docker-entrypoin..."	2 days ago	up 22 hours
assandra				

Рис. 4.11. Створений docker контейнер з БД Cassandra

## 2) Встановлюємо Cqlsh утиліту

Для встановлення утиліти Cqlsh необхідно:

- Встановити cqlsh командою `pip install --user cqlsh == 4.1.1`.
- Перевірити доступ утиліти до БД Cassandra за допомогою команди `cqlsh 127.0.0.1`

```
[cqlsh 4.1.1 | Cassandra 2.2.5 | CQL spec 3.1.1 | Thrift protocol 20.1.0]  
Use HELP for help.  
cqlsh> █
```

Рис. 4.12. Встановлена утиліта cqlsh

## 3) Створюємо схему БД

Для створення схеми для бази даних Cassandra використовуємо команду для створення кейспейс в БД:

```
cqlsh> CREATE KEYSPACE network_demo WITH replication = { 'class':  
'SimpleStrategy', 'replication_factor': '1' };
```

Для створення таблицю `active_user` використовуємо фрагмент коду:

```
cqlsh> CREATE TABLE active_user ( id int, service_type text, latency float,  
load float, capacity float, p_loss float, time timestamp, technology text,  
PRIMARY KEY (id, service_type, technology) ) WITH  
bloom_filter_fp_chance=0.010000 AND caching={'keys':"ALL",  
"rows_per_partition":"NONE"} AND comment="" AND  
dclocal_read_repair_chance=0.100000 AND gc_grace_seconds=864000 AND  
read_repair_chance=0.000000 AND default_time_to_live=0 AND  
speculative_retry='99.0PERCENTILE' AND memtable_flush_period_in_ms=0 AND  
compaction={'class': 'SizeTieredCompactionStrategy'} AND  
compression={'sstable_compression': 'LZ4Compressor'};
```

```

cqlsh:network_demo> DESCRIBE TABLE network_demo.active_user
CREATE TABLE active_user (
  id int,
  service_type text,
  technology text,
  capacity float,
  latency float,
  load float,
  p_loss float,
  time text,
  PRIMARY KEY (id, service_type, technology)
) WITH
bloom_filter_fp_chance=0.010000 AND
caching={'keys':"ALL", "rows_per_partition":"NONE"} AND
comment=" AND
dclocal_read_repair_chance=0.100000 AND
gc_grace_seconds=864000 AND
read_repair_chance=0.000000 AND
default_time_to_live=0 AND
speculative_retry='99.0PERCENTILE' AND
memtable_flush_period_in_ms=0 AND
compaction={'class': 'SizeTieredCompactionStrategy'} AND
compression={'sstable_compression': 'LZ4Compressor'};

```

Рис. 4.13. Результат створеної таблиці active\_user в БД

Для створення таблицю таблицю request\_user:

```

cqlsh> CREATE TABLE request_user ( id int, service text, time timestamp,
PRIMARY KEY (id, service) ) WITH bloom_filter_fp_chance=0.010000 AND
caching={'keys':"ALL", "rows_per_partition":"NONE"} AND comment=" AND
dclocal_read_repair_chance=0.100000 AND gc_grace_seconds=864000 AND
read_repair_chance=0.000000 AND default_time_to_live=0 AND
speculative_retry='99.0PERCENTILE' AND memtable_flush_period_in_ms=0 AND
compaction={'class': 'SizeTieredCompactionStrategy'} AND
compression={'sstable_compression': 'LZ4Compressor'};

```

```

cqlsh:network_demo> DESCRIBE TABLE network_demo.request_user
CREATE TABLE request_user (
  id int,
  service text,
  time text,
  PRIMARY KEY (id, service)
) WITH
bloom_filter_fp_chance=0.010000 AND
caching={'keys':"ALL", "rows_per_partition":"NONE"} AND
comment=" AND
dclocal_read_repair_chance=0.100000 AND
gc_grace_seconds=864000 AND
read_repair_chance=0.000000 AND
default_time_to_live=0 AND
speculative_retry='99.0PERCENTILE' AND
memtable_flush_period_in_ms=0 AND
compaction={'class': 'SizeTieredCompactionStrategy'} AND
compression={'sstable_compression': 'LZ4Compressor'};

```

Рис. 4.14. Результат створеної таблиці request\_user в БД

Після цього проводиться імпортування статистичних даних в БД Cassandra, отриманих шляхом комп'ютерного моделювання з використанням утиліти «Макароо».

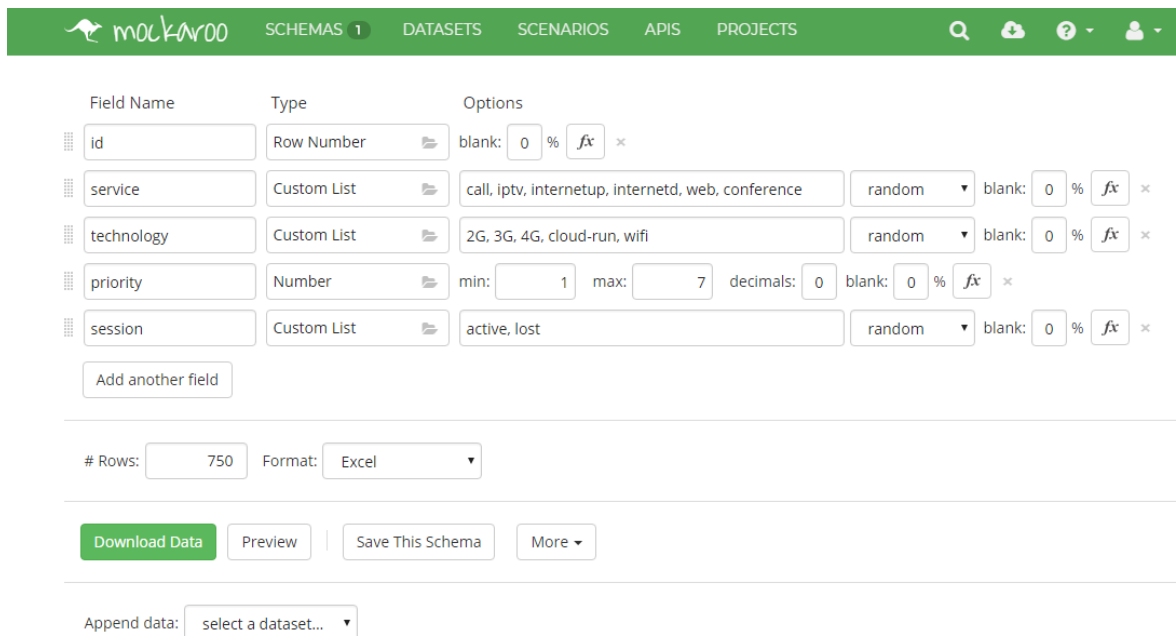


Рис. 4.15. Генерування статистичних даних гетерогенної мережі з допомогою утиліти «Makaroo»

Відповідно фрагмент коду наведено нижче.

```
echo "use network_demo; COPY active_user (id, service_type, latency, load, capacity, p_loss, time, technology) FROM 'active_user.csv' WITH HEADER=true;" | cqlsh 127.0.0.1;
```

```
echo "use network_demo; COPY request_user (id, service, time) FROM 'request_user.csv' WITH HEADER=true;" | cqlsh 127.0.0.1
```

```
cqlsh> SELECT * FROM network_demo.active_user ;
```

id	service_type	technology	capacity	latency	load	p_loss	time
769	call	4c	138.6	249	51.2	0.2	1:05:32 AM
23	conference	4c	148.9	93.6	53.2	0.6	10:12:42 AM
114	iptv	wifi	169.7	365.5	23.6	0.1	8:11:34 AM
660	conference	wifi	100.6	420.1	20.4	0.4	10:00:04 AM
893	internetup	3c	121.7	304.9	65.2	0.5	3:57:19 AM
53	web	4c	78.8	229.1	81.7	0	12:03:25 AM
987	call	2c	131.7	176.8	36.2	0.9	10:20:05 AM
878	call	2c	95.4	450	2.1	0.5	5:39:52 AM
110	web	wifi	157.3	297.5	96.8	0.4	3:10:20 AM
91	web	4c	191.9	330.7	30.2	0.7	8:46:06 AM
128	iptv	4c	68.1	304.1	33.3	1	5:35:25 AM
363	internetup	wifi	31.9	83.3	76.5	0.4	6:13:18 AM
251	internetd	4c	188	287.2	68.8	0.2	2:22:50 AM
744	internetup	4c	159.8	417	62.8	0.6	7:27:30 AM
778	call	wifi	127.9	331.3	71.3	0.7	9:12:38 AM
819	conference	cloud_run	191.6	323.7	1.5	0	5:45:32 AM
310	internetup	4c	51.9	300.6	78.1	0.4	12:10:47 AM
849	call	4c	93.4	192.4	41.2	0.3	8:22:35 AM
247	call	2c	44.7	116	62.2	0.8	9:58:12 AM
796	internetup	wifi	53.1	438.1	41.3	0.7	1:48:06 AM
919	iptv	3c	56.5	385.7	47.9	0.8	10:47:54 AM
214	call	2c	119	177.4	93	0.5	1:40:00 AM
429	call	2c	94.9	286.7	95.9	0.5	11:56:29 AM
117	call	2c	18.9	96.7	5.7	0.1	1:16:58 AM
998	web	wifi	70.4	325.7	15.9	0.8	11:00:09 AM
547	call	3c	133.5	135.5	91	0.2	2:45:07 AM
144	internetup	cloud_run	139.2	290.8	17.6	0.7	9:23:52 AM
948	internetd	3c	4.2	114	37.6	0.5	4:19:40 AM
718	call	2c	127.3	358.9	13.2	0.9	10:30:10 AM
567	internetup	wifi	105.2	304.1	71.1	0.8	5:31:19 AM
120	web	cloud_run	181.4	286.2	95.4	0.2	4:22:06 AM
504	internetup	wifi	135.3	137.6	71.3	0.5	2:28:45 AM
729	internetup	4c	140.8	397.3	88.3	0.3	8:49:12 AM
219	call	3c	54.6	83.7	30.5	0.6	9:10:04 AM
695	internetd	wifi	4.4	305.1	12.7	0.2	12:15:22 AM
475	conference	wifi	50.4	235.2	36.1	0.8	10:23:49 AM
140	conference	wifi	69	123.3	79.7	0.3	10:03:47 AM
308	internetd	4c	36	341.3	4.1	0.1	5:13:19 AM
782	web	3c	183.5	454.3	67.3	0.8	7:52:25 AM
860	iptv	3c	1.1	245.6	61.3	0.5	2:17:17 AM
483	internetup	4c	58.2	240.4	54.1	0.8	4:05:12 AM
55	web	cloud_run	70.1	139.1	12.5	0.8	2:48:13 AM
441	web	cloud_run	1.5	117.8	84.2	0.9	8:15:20 AM
779	iptv	4c	189.1	432.2	9	0.9	7:05:24 AM
976	internetup	cloud_run	195.7	163.9	42.6	0.8	6:05:49 AM
662	conference	4c	117.9	385.4	51.8	0.2	8:40:03 AM
255	call	4c	136.9	454.1	3.4	0.7	6:30:19 AM
331	web	cloud_run	134.2	465.9	30.7	0.1	2:23:46 AM
129	call	3c	2	348.8	64	0.2	8:15:15 AM
530	web	3c	188.4	238.3	56.3	0.7	11:39:28 AM

Рис. 4.16. Наповнена таблиця active\_user

```
cqlsh> SELECT * FROM network_deno.request_user
```

id	service	time
769	iptv	5:49:59 AM
23	conference	4:22:35 AM
114	internetd	10:03:29 AM
660	internetd	8:29:55 AM
893	internetd	5:33:57 AM
53	call	4:38:21 AM
987	iptv	7:46:02 AM
878	web	11:55:17 AM
110	call	6:25:26 AM
91	call	8:09:08 AM
128	web	8:41:37 AM
363	conference	11:12:03 AM
251	internetup	2:53:12 AM
744	conference	11:53:18 AM
778	internetd	8:17:31 AM
819	conference	9:54:49 AM
310	internetd	1:46:59 AM
849	web	6:09:25 AM
247	call	1:27:47 AM
796	internetd	4:48:45 AM
919	iptv	9:07:12 AM
214	iptv	3:52:22 AM
429	web	12:52:08 AM
117	conference	12:31:12 AM
998	conference	8:55:42 AM
547	internetup	5:16:17 AM
144	iptv	1:38:15 AM
948	conference	5:44:44 AM
718	web	5:15:12 AM
567	web	10:26:02 AM
120	web	2:59:59 AM
504	iptv	8:49:33 AM
729	conference	10:21:02 AM
219	call	2:34:00 AM
695	internetd	5:09:48 AM
475	call	12:09:16 AM
140	internetup	4:46:39 AM
308	call	11:49:23 AM
782	web	4:35:59 AM
860	internetd	4:21:34 AM
483	internetup	12:41:44 AM
55	internetup	2:12:49 AM
441	conference	5:37:58 AM
779	internetup	8:30:53 AM
976	call	5:52:08 AM
662	web	4:19:26 AM
255	conference	5:09:32 AM
331	web	12:21:08 AM
129	conference	7:58:49 AM
530	call	9:46:53 AM

Рис. 4.17. Наповнена таблиця request\_user

Для повноцінного запуску моделі та швидкої обробки статистичних даних необхідно забезпечити взаємодію БД Cassandra із платформою Spark.

Таким чином, переходимо до налаштування платформи Spark. Запускаємо Spark з написаного нами конфігураційного файлу для docker-compose.

```
spark:
  image: danpilch/spark:0.2
  container_name: "spark"
  restart: always
  volumes:
    - /root/cassandra-spark-diplom/scripts:/jobs/
```

Рис. 4.18. Вміст конфігураційного файлу для запуску Spark

Виконуємо команду про запуск:

```
docker-compose -f spark.yml up -d
```

Перевіряємо, чи контейнер розпочав роботу шляхом відображення на графічному вікні статусу роботи.

```
root@docker-1gb-ams2-01:~# docker ps
```

CONTAINER ID	IMAGE	COMMAND	CREATED	STATUS
b5edc8d913f8	danpilch/spark:0.2	"/bin/bash start.sh"	2 days ago	Up 20 seconds
spark				

Рис. 4.19. Створений docker контейнер з Spark

Отже, Spark контейнер працює в звичайному режимі. Далі переходимо до аналізу даних.

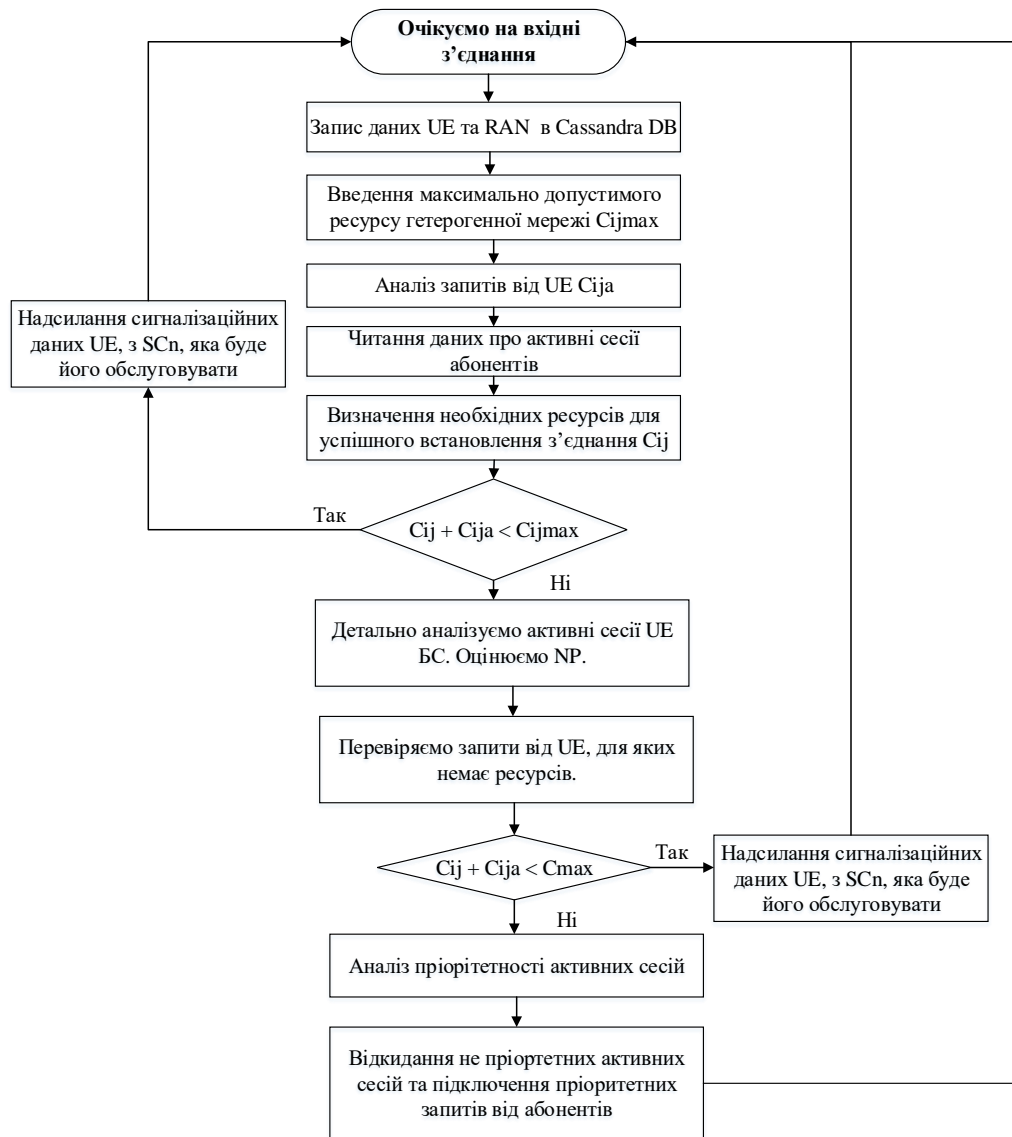


Рис. 4.20. Алгоритм роботи імітаційної моделі гетерогенної мережі з використанням Big Data

На рис. 4.20 представлено алгоритм роботи імітаційної моделі, що дає змогу оптимально управляти ресурсами гетерогенної мережі.

Робота алгоритму розпочинається із запису вхідних даних у БД Cassandra. До вхідних даних належать запити на обслуговування від UE, а також дані про стан гетерогенної мережі (активні сесії для кожної технології).

Після запису статистичних даних переходимо до їх аналізу та порівняння з максимально допустимими значеннями для кожної з технологій. За допомогою аналізу даних, оцінюються критичні точки в мережі, та

приймаються рішення про підключення запитів від UE (якщо є вільні ресурси в мережі), що поступають в конкретний момент часу.

У випадку завантаження гетерогенної мережі проводиться детальний аналіз NP (Network Parameters) активних сесій та запитів, що поступили. Далі обчислюються вільні ресурси в гетерогенній мережі та порівнюються із необхідною кількістю ресурсів для обслуговування вхідних запитів. Якщо є необхідна кількість ресурсів, тоді відбувається перерозподіл та балансування навантаження в гетерогенній мережі, кожному з UE надсилаються сигналізаційні дані з оптимальною БС, яка може його обслужити. В іншому випадку, аналізується пріоритетність активних сесій та вхідних запитів. Непріоритетні сесії та запити відкидаються та будуть опрацьовані пізніше, а пріоритетні запити обслуговуються із необхідною якістю обслуговування. Після цього через час  $\Delta t$  алгоритм виконується знову.

#### **4.4. Генерація, збір та аналіз даних процесу функціонування гетерогенної мережі із реалізованим рішенням обробки великих даних**

##### **4.4.1. Генерація даних процесу функціонування гетерогенної мережі**

Для генерації аналізу даних використовуємо розроблений математичний метод.

$$\begin{aligned} P_{\text{areq.ij}}(t) &= P_{\text{max.ij}}(t) - P_{\text{cur.ij}}(t), \\ P_{\text{max.ij}} &= \text{const}. \end{aligned} \quad (4.1)$$

де  $P_{\text{areq.ij}}(t)$  – кількість запитів від абонентів, які можуть бути обслужені БС в конкретний момент часу,  $P_{\text{max.ij}}(t)$  – максимально допустима кількість активних сесій абонентів без погіршення якості обслуговування QoS, де  $i$  – технологія,  $j$  – тип сервісу,  $P_{\text{cur.ij}}(t)$  – поточна кількість активних сесій в момент часу  $t$ .

$$P_{\text{input.ij}}(t) = P_{\text{req.ij}}(t) + P_{\text{cur.ij}}(t), \quad (4.2)$$

де  $P_{\text{input.ij}}(t)$  – кількість вхідних запитів від абонентів, на БС в конкретний момент часу

$$P_{lost.ij}(t) = P_{req.ij}(t) - P_{areq.ij}(t), \quad (4.3)$$

де  $P_{lost.ij}(t)$  – кількість відкинутих запитів від абонентів, для надання певного типу сервісу в момент часу  $t$ ,  $P_{req.ij}(t)$  – кількість вхідних запитів від абонентів, для надання певного типу сервісу в момент часу  $t$ .

Для простоти проведення досліджень щодо оцінки ефективності запропонованих рішень в роботі введено значення  $P_{max.ij}(t)$  для кожного типу сервісу та відповідної технології з розрахунку на одну базову станцію. Значення максимально допустимої кількості активних сесій представлено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Максимально допустима кількість активних сесій

Технологія \ Тип сервісу	2G	3G	4G	WiFi	Cloud-RAN
Дзвінки	1000	500	500	200	500
Відео-конференція	0	100	200	150	400
IPTV	0	50	100	150	200
WEB	0	50	100	100	200
Інтернет дані (завантаження)	0	50	100	150	200
Інтернет дані (скачування)	0	100	200	250	400

На основі отриманих даних від аналізу роботи мережі, були побудові графіки завантаження гетерогенної мережі. Аналіз проводився для кожної технології та сервісу окремо.

#### *Проведемо генерацію даних для технології 2G*

В дисертаційній роботі розглядається спрощена схема гетерогенної мережі і вважається, що для кожної технології є одна базова станція. Оскільки, БС з технологією 2G має обмежені ресурси, вважаємо, що даною базовою станцією можуть обслуговуватись тільки абоненти з сервісом VoIP.



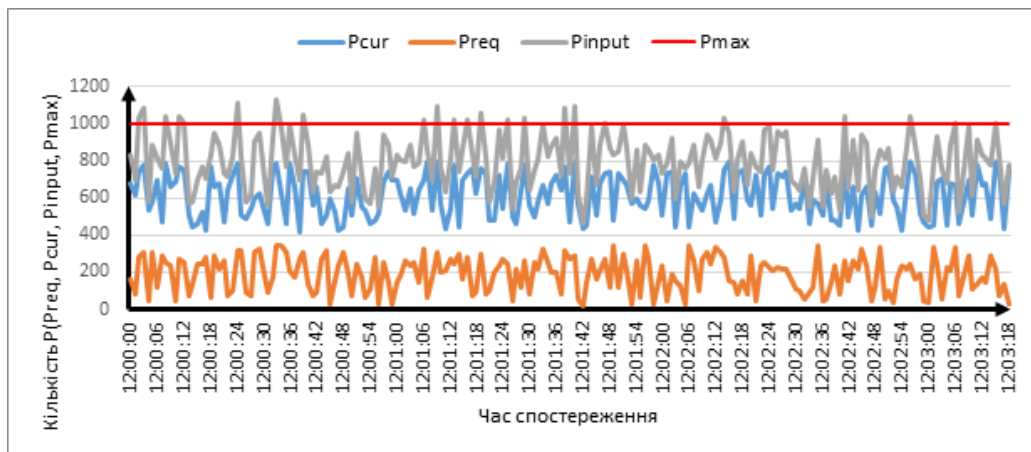


Рис. 4.21. Вхідне навантаження на 2G

На рис. 4.21 представлено динамічну зміну кількості активних сесій та запитів від користувачів на встановлення з'єднання. Також, на даному рисунку зображено вхідне навантаження у вигляді суми запитів від абонентів та активних сесій. Відповідно у деякі моменти часу, з допомогою системи моніторингу даних, що знаходиться у площині Big Data, фіксується перевантаження БС. Оскільки максимальна кількість активних сесій для базової станції, що працює з технологією 2G та VoIP становить 1000, то у моменти часу де фіксується перевищення цього значення деякі запити від абонентів відкидаються, що призводить до погіршення якості наданих послуг користувачам.

*Проведемо аналіз даних для технології 3G*

Розглянемо динамічну зміну вхідного навантаження для технології 3G для кожного типу сервісу окремо.

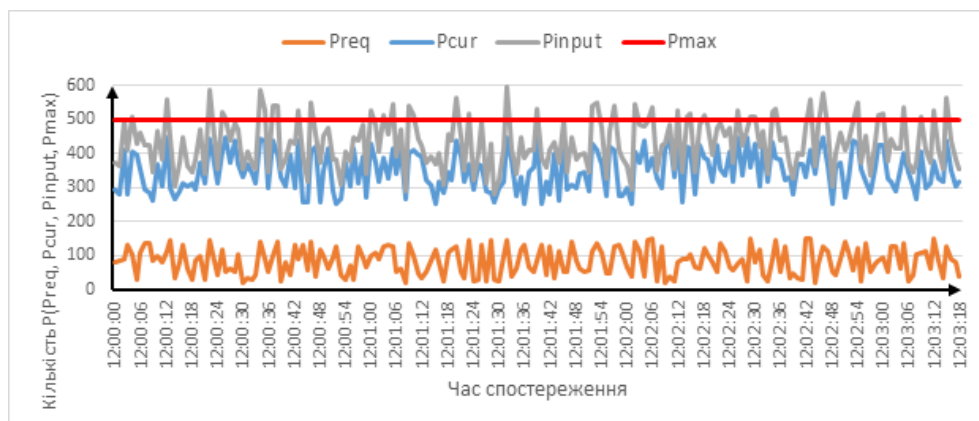


Рис. 4.22а. Вхідне навантаження VoIP на 3G

На рис. 4.22а представлено динамічну зміну кількості активних сесій та запитів від користувачів на встановлення з'єднання та вхідного навантаження. Оскільки максимальна кількість активних сесій для базової станції, що працює з технологією 3G та VoIP становить 500, то у моменти часу де фіксується перевищення цього значення деякі запити від абонентів відкидаються, що призводить до погіршення якості наданих послуг користувачам.

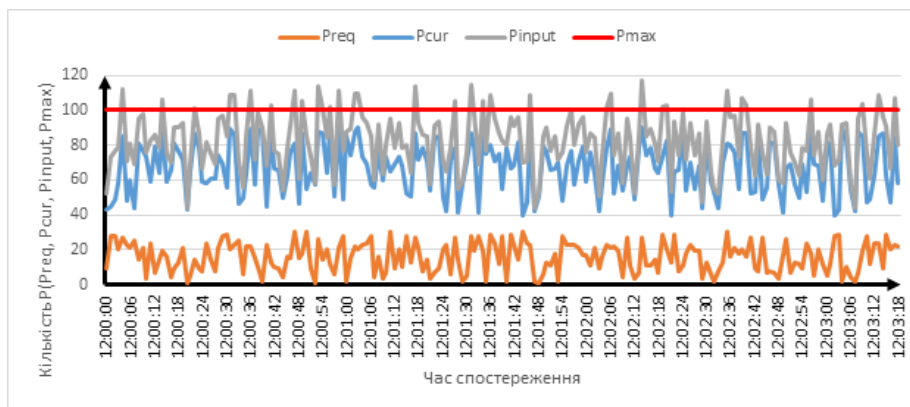


Рис. 4.22б. Вхідне навантаження інтернет даних (скачування) на 3G

На рис. 4.22б представлено динамічну зміну кількості активних сесій та запитів від користувачів на встановлення з'єднання та вхідного навантаження. Максимальна кількість активних сесій для базової станції, що працює з технологією 3G та інтернет дані (скачування) становить 100, то у моменти часу де фіксується перевищення цього значення деякі запити від абонентів відкидаються, що призводить до погіршення якості обслуговування.

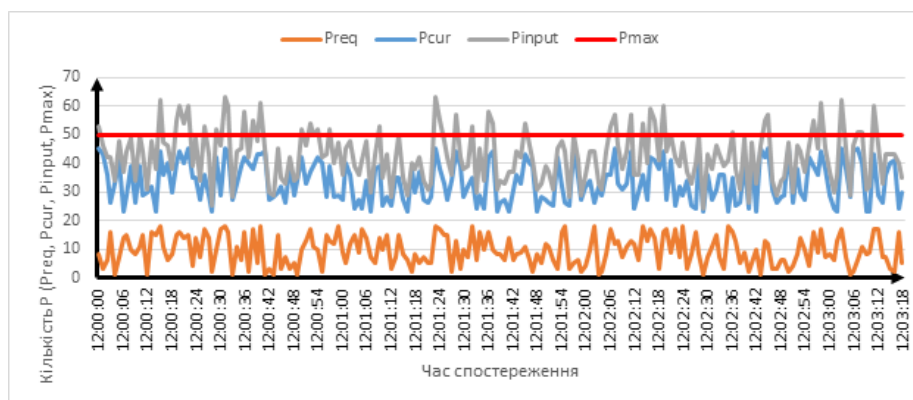


Рис. 4.22в. Вхідне навантаження інтернет даних (завантаження) на 3G

На рис. 4.22в представлено динамічну зміну кількості активних сесій та запитів від користувачів на встановлення з'єднання та вхідного навантаження.

Оскільки максимальна кількість активних сесій для базової станції, що працює з технологією 3G та даного сервісу становить 50, то у моменти часу де фіксується перевищення цього значення деякі запити від абонентів відкидаються, що призводить до погіршення якості наданих послуг користувачам.

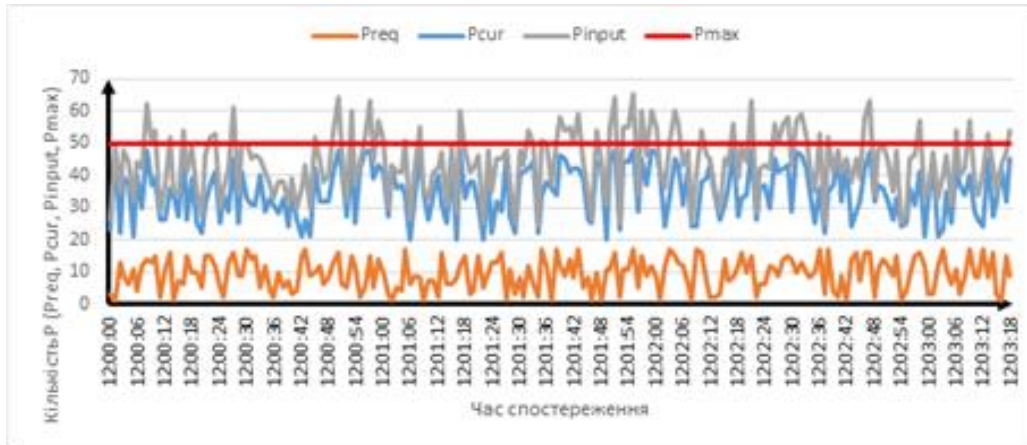


Рис.4.22г. Вхідне навантаження IPTV на 3G

На рис. 4.22г представлено динамічну зміну кількості активних сесій та запитів від користувачів на встановлення з'єднання та вхідного навантаження. Максимальна кількість активних сесій для БС, що працює з технологією 3G та даним сервісом становить 50. У моменти часу де фіксується перевищення зарезервованого значення запити від абонентів відкидаються.

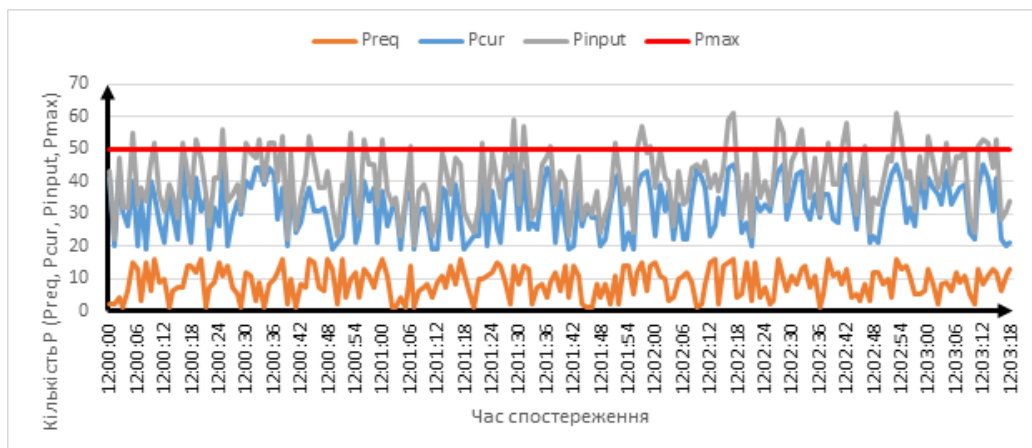


Рис. 4.22д. Вхідне навантаження WEB на 3G

На рис. 4.22д представлено динамічну зміну кількості активних сесій та запитів від користувачів на встановлення з'єднання та вхідного навантаження. Максимальна кількість активних сесій для БС, що працює з технологією 3G та

даним сервісом становить 50. У моменти часу де фіксується перевищення зарезервованого значення запиту від абонентів відкидаються.

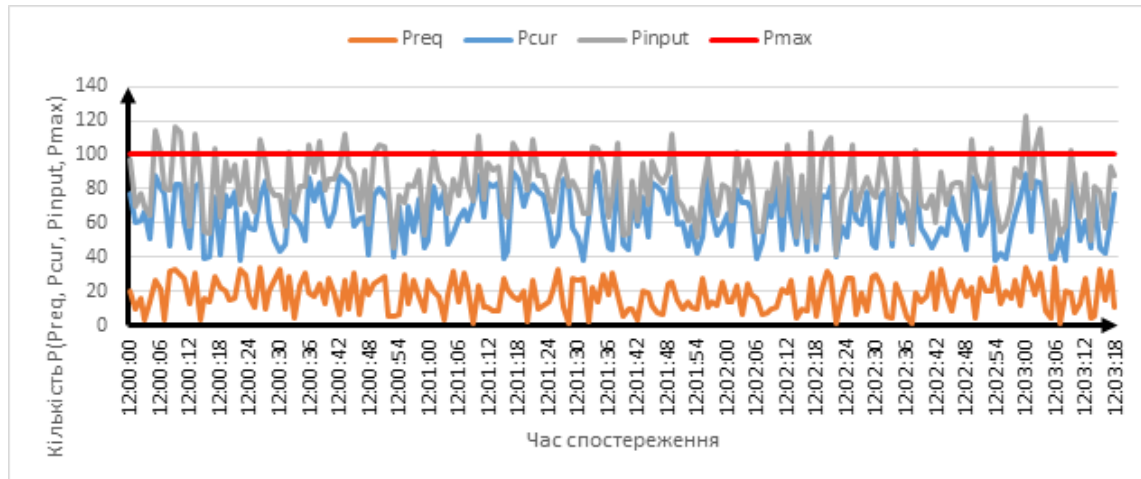


Рис. 4.22е. Вхідне навантаження відео- конференцій на 3G

На рис. 4.22е представлено динамічну зміну кількості активних сесій та запитів від користувачів на встановлення з'єднання та вхідного навантаження. Оскільки максимальна кількість активних сесій для базової станції, що працює з технологією 3G та даного сервісу становить 100, то у моменти часу де фіксується перевищення цього значення деякі запити від абонентів відкидаються, що призводить до погіршення якості наданих послуг користувачам. Аналогічно отримано результати для інших технологій мобільного зв'язку, які задіяні в досліджуваній гетерогенній мережі.

#### 4.4.2. Збір та аналіз даних процесу функціонування гетерогенної мережі із реалізованим рішенням обробки великих даних

Для обрахунку та аналізу даних, написані Jobs-скрипти на мові програмування Python для Spark.

При роботі job-1 Spark виконує запит на читання даних з БД Cassandra та обробляє їх, обраховуючи кількість активних сесій в мережі. Результат представлений на рисунку 4.23.

```

17/11/16 19:15:26 INFO TaskSchedulerImpl: Removed TaskSet 1.0, whose tasks have
17/11/16 19:15:26 INFO DAGScheduler: Job 0 finished: showString at NativeMethod
+-----+-----+-----+
|technology|service_type|_c2|
+-----+-----+-----+
|          |          |    |
|        2G|        call|199|
|        3G|    internetd|27|
|        3G|    conference|28|
|        3G|        call|31|
|        3G|        web|36|
|        3G|        iptv|32|
|        3G|    internetup|33|
|        4G|    conference|32|
|        4G|        iptv|31|
|        4G|    internetd|32|
|        4G|    internetup|42|
|        4G|        call|36|
|        4G|        web|30|
|cloud_run|        iptv|41|
|cloud_run|    internetd|36|
|cloud_run|        web|36|
|cloud_run|    conference|23|
|cloud_run|    internetup|32|
|cloud_run|        call|18|
|        wifi|    internetd|36|
|        wifi|    conference|41|
|        wifi|        iptv|36|
|        wifi|        web|38|
|        wifi|        call|34|
|        wifi|    internetup|40|
+-----+-----+-----+
17/11/16 19:15:27 INFO SparkUI: Stopped spark web UI at http://172.17.0.3:4040

```

Рис. 4.23. Результат обрахунку кількості активних сесій

При роботі job-2 Spark виконує запит на читання даних з БД Cassandra та обробляючи їх, ми отримуємо кількість запитів від UE. Результат представлений на рисунку 4.24.

```

17/11/16 19:21:57 INFO DAGScheduler: Job 1 finished: showString at NativeMethod
17/11/16 19:21:57 INFO TaskSchedulerImpl: Removed TaskSet 3.0, whose tasks have
+-----+-----+
|  service|_c1|
+-----+-----+
|        call|169|
|        iptv|157|
|    internetup|171|
|    internetd|160|
|    conference|170|
|        web|173|
+-----+-----+
17/11/16 19:21:57 INFO SparkUI: Stopped spark web UI at http://172.17.0.3:4040
17/11/16 19:21:57 INFO MapOutputTrackerMasterEndpoint: MapOutputTrackerMasterEn
17/11/16 19:21:57 INFO MemoryStore: MemoryStore cleared
17/11/16 19:21:57 INFO BlockManager: BlockManager stopped

```

Рис. 4.24. Результат обрахунку поступлених запитів від UE

При роботі job-3 Spark використовуючи результат виконання job-1 обраховуються вільні ресурси. Результат представлений на рисунку 4.25.

```

17/11/16 19:41:27 INFO DAGScheduler: ResultStage 1 (showString at NativeMethodAC
17/11/16 19:41:27 INFO TaskSetManager: Finished task 199.0 in stage 1.0 (TID 200
17/11/16 19:41:27 INFO TaskSchedulerImpl: Removed TaskSet 1.0, whose tasks have
17/11/16 19:41:27 INFO DAGScheduler: Job 0 finished: showString at NativeMethodA

```

technology	service_type	_c2	technology	service	kpi
2G	call	199	2G	call	1000
3G	internetd	27	3G	call	500
3G	conference	28	3G	iptv	50
3G	call	31	3G	internetd	100
3G	web	36	3G	internetup	50
3G	iptv	32	3G	conference	100
3G	internetup	33	3G	web	50
4G	conference	32	4G	internetup	100
4G	iptv	31	4G	conference	200
4G	internetd	32	4G	iptv	100
4G	internetup	42	4G	internetd	200
4G	call	36	4G	call	500
4G	web	30	4G	web	100
cloud_run	iptv	41	cloud_run	iptv	200
cloud_run	internetd	36	cloud_run	call	500
cloud_run	web	36	cloud_run	web	200
cloud_run	conference	23	cloud_run	conference	400
cloud_run	internetup	32	cloud_run	internetd	400
cloud_run	call	18	cloud_run	internetup	200
wifi	internetd	36	wifi	internetd	250
wifi	conference	41	wifi	internetup	150
wifi	iptv	36	wifi	web	100
wifi	web	38	wifi	call	200
wifi	call	34	wifi	conference	150
wifi	internetup	40	wifi	iptv	150

```

17/11/16 19:41:27 INFO SparkUI: Stopped Spark web UI at http://172.17.0.3:4040
17/11/16 19:41:27 INFO MapOutputTrackerMasterEndpoint: MapOutputTrackerMasterEnd
17/11/16 19:41:27 INFO MemoryStore: MemoryStore cleared
17/11/16 19:41:27 INFO BlockManager: BlockManager stopped

```

Рис. 4.25. Виведення максимального доступного та поточного ресурсу гетерогенної мережі

При роботі job-4 Spark моделює активне велике навантаження на мережу. Результат представлений на рисунку 4.26.

```

17/11/16 20:04:04 INFO DAGScheduler: Job 0 finished: showString at NativeMethod

```

technology	service_type	_c2
2G	call	995
3G	internetd	135
3G	conference	140
3G	call	155
3G	web	180
3G	iptv	160
3G	internetup	165
4G	conference	160
4G	iptv	155
4G	internetd	160
4G	internetup	210
4G	call	180
4G	web	150
cloud_run	iptv	205
cloud_run	internetd	180
cloud_run	web	180
cloud_run	conference	115
cloud_run	internetup	160
cloud_run	call	90
wifi	internetd	180
wifi	conference	205
wifi	iptv	180
wifi	web	190
wifi	call	170
wifi	internetup	200

```

17/11/16 20:04:04 INFO SparkUI: Stopped Spark web UI at http://172.17.0.3:4040
17/11/16 20:04:04 INFO MapOutputTrackerMasterEndpoint: MapOutputTrackerMasterEn
17/11/16 20:04:04 INFO MemoryStore: MemoryStore cleared

```

Рис. 4.26. Активні сесії в ГНН

#### 4.5. Управління ресурсами в гетерогенній мережі

В роботі для аналізу даних, проведено обчислення завантаження в мережі на основі кількості активних сесій, а також враховувався тип сервісу, який потрібно надати абоненту. Для того, щоб приймати інтелектуальні рішення щодо вибору технології, яка буде обслуговувати абонента, оцінка вільних

ресурсів на основі кількості активних сесій є недостатньою, оскільки вимоги щодо якості обслуговування сесій є різнорідними. Тому необхідно обрати параметр, який зможе найбільш точно оцінити стан гетерогенної мережі. В роботі для гнучкого управління ресурсами пропонується оцінювати пропускну здатність системи, оскільки зі зростанням кількості користувачів пропускну здатність зменшується, а це у свою чергу призводить до збільшення часу затримки на обслуговування та до зростання кількості втрачених даних, як показано на рис.4.24.

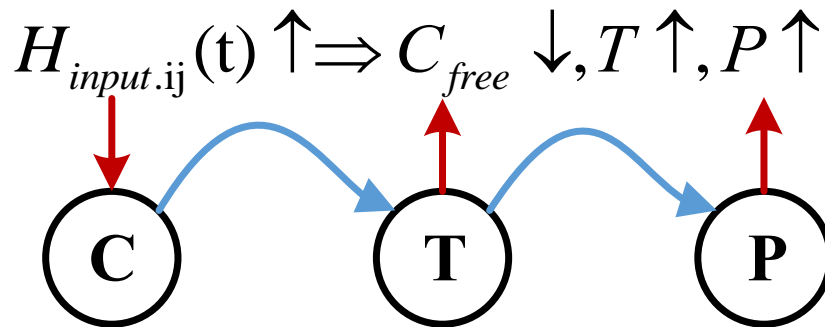


Рис. 4.27. Вплив параметра поточного використання пропускну здатності системи на час затримки та втрат даних

Кожен тип сервісу має необхідне значення пропускну здатності, яка має бути надана абоненту для якісного обслуговування. Значення необхідної пропускну здатності подані в таблиці 4.1.

Для оптимального управління ресурсами в роботі запропоновано комплексний метод розрахунку, що дає змогу рівномірно розподіляти вхідне навантаження в гетерогенній мережі. Для визначення максимальної пропускну здатності гетерогенної мережі використовуємо формулу (4.4).

$$C_{\max} = \sum_{n=1}^5 C_{\max.ij}, \quad (4.4)$$

де  $C_{\max}$  – максимальна пропускну здатність мережі,  $C_{\max.ij}$  – максимальна пропускну здатність  $i$ -тої технології  $j$ -того сервісу,  $n$  – кількість технологій в гетерогенній мережі.

$$C_{\max.ij} = P_{\max.ij} \cdot C_{QoS.j}, \quad (4.5)$$

де  $C_{QoS.j}$  – пропускну здатність необхідна для надання  $j$ -того сервісу.

Після обчислення максимальної пропускної здатності мережі, переходимо до розрахунку пропускної здатності, яка виділена для обслуговування поточних активних сесій.

$$C_{cur.ij} = P_{cur.ij} \cdot C_{QoS.j}, \quad (4.6)$$

де  $C_{cur.ij}$  – пропускна здатність  $i$ -тої технології  $j$ -того сервісу, виділена для активних сесій.

$$C_{cur} = \sum_{n=1}^5 C_{cur.ij} = C_{cur.2G} + C_{cur.3G} + C_{cur.4G} + C_{cur.w} + C_{cur.c}, \quad (4.7)$$

де  $C_{cur}$  – сумарна пропускна здатність, що виділяється гетерогенною мережею для обслуговування поточного навантаження.

Для кожної з технологій необхідно визначити поточну пропускну здатність. Розглянемо приклад розрахунку пропускної здатності для кожної з технологій:

$$C_{cur.2G} = P_{cur.call} \cdot C_{QoS.call}, \quad (4.8)$$

$$C_{cur.3G} = P_{cur.3Gcall} \cdot C_{QoS.call} + P_{cur.3Gconf} \cdot C_{QoS.3Gconf} + (P_{cur.3Gid} + P_{cur.3Giup}) \cdot C_{QoS.i} + P_{cur.3Gweb} \cdot C_{QoS.web} + P_{cur.3Giptv} \cdot C_{QoS.iptv}, \quad (4.9)$$

$$C_{cur.4G} = P_{cur.4Gcall} \cdot C_{QoS.call} + P_{cur.4Gconf} \cdot C_{QoS.4Gconf} + (P_{cur.4Gid} + P_{cur.4Giup}) \cdot C_{QoS.i} + P_{cur.4Gweb} \cdot C_{QoS.web} + P_{cur.4Giptv} \cdot C_{QoS.iptv}, \quad (4.10)$$

$$C_{cur.c} = P_{cur.ccall} \cdot C_{QoS.call} + P_{cur.cconf} \cdot C_{QoS.4Gconf} + (P_{cur.cid} + P_{cur.ciup}) \cdot C_{QoS.i} + P_{cur.cweb} \cdot C_{QoS.web} + P_{cur.ciptv} \cdot C_{QoS.iptv}, \quad (4.11)$$

$$C_{cur.w} = P_{cur.wcall} \cdot C_{QoS.call} + P_{cur.wconf} \cdot C_{QoS.4Gconf} + (P_{cur.wid} + P_{cur.wiup}) \cdot C_{QoS.i} + P_{cur.wweb} \cdot C_{QoS.web} + P_{cur.wiptv} \cdot C_{QoS.iptv}. \quad (4.12)$$

Переходимо до обчислення пропускної здатності, яку необхідно виділити для запитів, що поступають від абонентів.

$$C_{req} = \sum_{j=1}^6 P_{req.j} \cdot C_{QoS.j}, \quad (4.13)$$

де  $C_{req}$  – пропускна здатність необхідна для обслуговування вхідних запитів від абонентів в гетерогенній мережі.



$$C_{\text{loss}} = C_{\text{max}} - (C_{\text{req}} + C_{\text{cur}}), \quad (4.14)$$

де  $C_{\text{loss}}$  – пропускна здатність, яка втрачається якщо кількість запитів перевищує допустиме значення.

Після опису математичного апарату для упавління ресурсами в гетерогенній мережі, перейдемо до аналізу використання ресурсів в гомогенних мережах зв'язку для обслуговування запитів на певний тип сервісу.



Рис. 4.28. Пропускна здатність 2G

На рис. 4.28 представлено зміну пропускної здатності БС з технологією 2G, яка виділена для обслуговування користувачів. З даного рисунку можна зробити висновок, що в деякі моменти часу спостереження завантаженість базової станції наближається до максимального значення.

Для інших технологій кількість сервісів для яких виділяється певне значення пропускної здатності є великою. Для проведення детального аналізу необхідно розглянути пропускну здатність, що виділяється для кожного типу сервісу, а також сумарне значення пропускної здатності виділене для обслуговування поточного навантаження від абонентів.

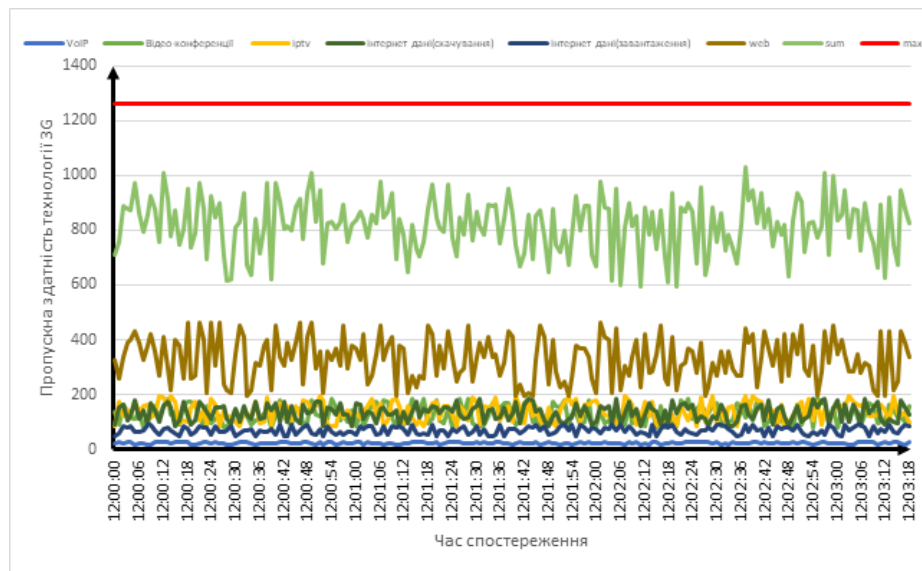


Рис. 4.29. Пропускна здатність 3G

На рис. 4.29 представлено зміну пропускної здатності БС з технологією 3G, яка виділена для обслуговування абонентів відповідно до типу сервісу. З даного рисунку можна зробити висновок, що в деякі моменти часу спостереження завантаженість базової станції наближається до максимального значення.

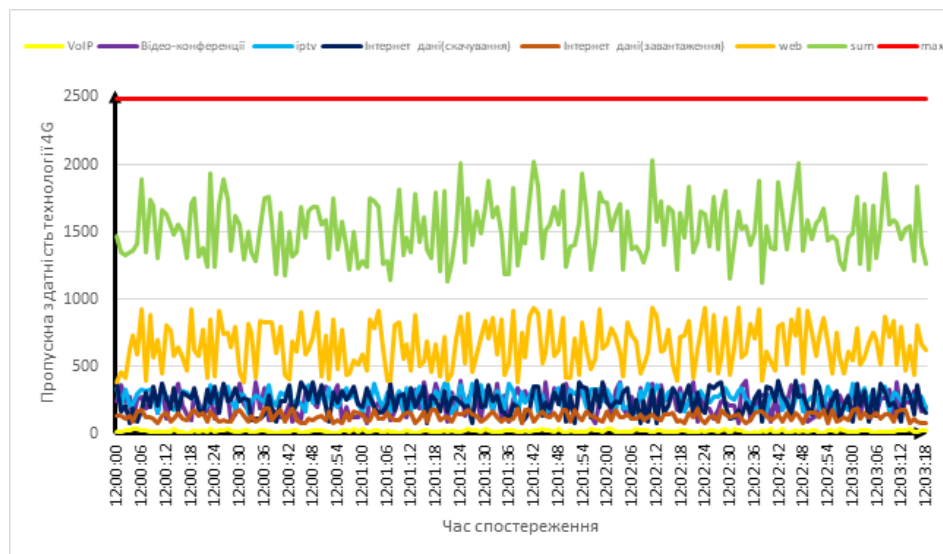


Рис. 4.30. Пропускна здатність 4G

На рис. 4.30 представлено зміну пропускної здатності БС з технологією 4G, яка виділена для обслуговування абонентів відповідно до типу сервісу. З даного рисунку можна зробити висновок, що в деякі моменти часу спостереження завантаженість базової станції наближається до максимального значення.

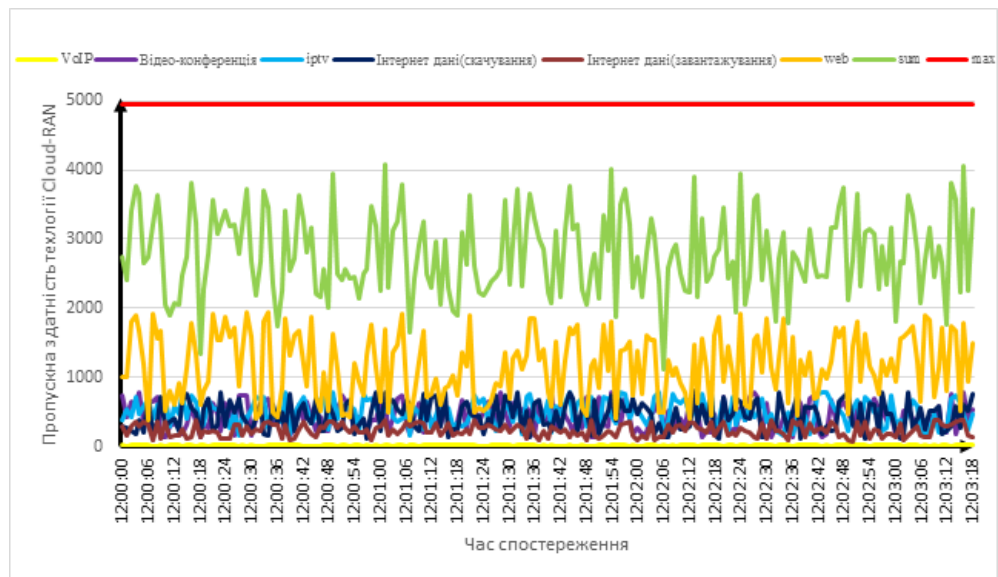


Рис. 4.31. Пропускна здатність Cloud-RAN

На рис. 4.31 представлено зміну пропускної здатності БС з технологією Cloud-RAN, яка виділена для обслуговування абонентів відповідно до типу сервісу. З даного рисунку можна зробити висновок, що в деякі моменти часу спостереження завантаженість базової станції наближається до максимального значення.

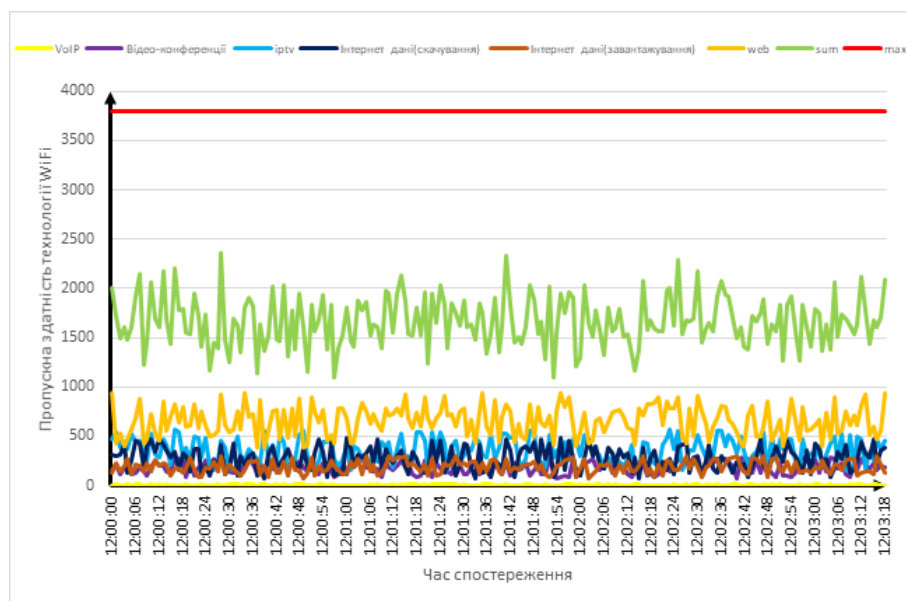


Рис. 4.32. Пропускна здатність wi-fi

На рис. 4.32 представлено зміну пропускної здатності БС з технологією wi-fi яка виділена для обслуговування абонентів відповідно до типу сервісу. З даного рисунку можна зробити висновок, що в деякі моменти часу

спостереження завантаженість базової станції наближається до максимального значення. Підрахуємо завантаженість кожної базової станції в момент часу  $t$ .

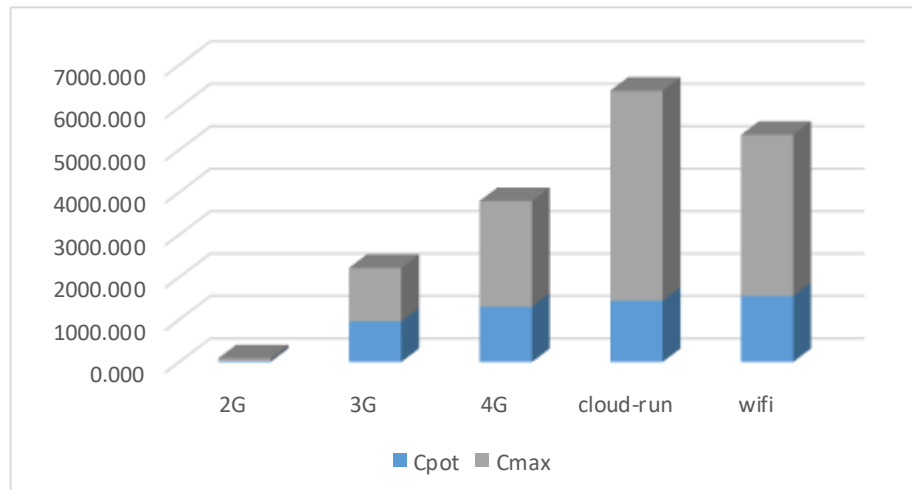


Рис. 4.33. Завантаженість базових станцій в момент часу  $t$

На рис. 4.33 представлено завантаженість базових станцій із різними технологіями в момент часу вибраний для проведення оптимізації. Завантаженість БС була виражена через поточне значення пропускної здатності та максимальної значення  $C_{max}$ . З даного рисунка видно, що БС працюють в нормальному режимі.

#### 4.6. Оптимізація гетерогенної мережі та оцінка ефективності використання запропонованих рішень

Продуктивність мобільних мереж головним чином залежить від динаміки експлуатаційного середовища. Часові рамки цієї динаміки коливаються від мікросекунд (наприклад, шум, інтерференція), секунди (наприклад, мобільність користувача), аж до годин, днів та місяців (наприклад, зміна концентрації користувачів в одній області до іншої протягом днів і ночей, а також у вихідні, сезони). Набагато ефективніший системний підхід може бути використаний шляхом розробки рішення SON (Self-Organizing Network) для більш тривалого часу в гетерогенних мережах. Отже, гетерогенна мережа потребує самоорганізаційних можливостей, щоб адаптуватися до змін у концентрації

користувачів, моделі мобільності користувачів та схем використання даних протягом години, днів, тощо.

Поки що стільникова індустрія не має спільної основи для кількісного визначення ефективності мережі. Існує стільки показників ефективності для безпроводних мереж, скільки є постачальників обладнання та операторів. У мережах наступного покоління очікується, що SON буде фактично прогнозованим, і функція SON повинна буде працювати на терміналі з мультирежимним доступом і, можливо, багатокористувальницькою та багатомережевою шкалою. Значення виграшу, якого може досягти SON залежить від змістовності та однорідності KPI, оптимізованих функціями SON. Для того, щоб усвідомити повний потенціал функцій SON у гетерогенних мережах, необхідно розробляти нові, цілісні та загальнодоступні KPI, які можуть точно відобразити досвід користувачів, а також кількісну оцінку інтересів зацікавлених сторін мережі.

Задача полягає не лише в величезному обсязі даних, а й у тому, що вони досягають різної швидкості з неоднорідною структурою та можуть містити в собі невідповідність - повна та неоднозначна інформація, отримана з різних джерел. Основна ідея BSON (Big Data Self-Organizing Networks) (рис.4.34) розробляє наскрізну видимість мережі за допомогою вилучення інформації з великих даних за допомогою застосування відповідних ресурсів машинного навчання.

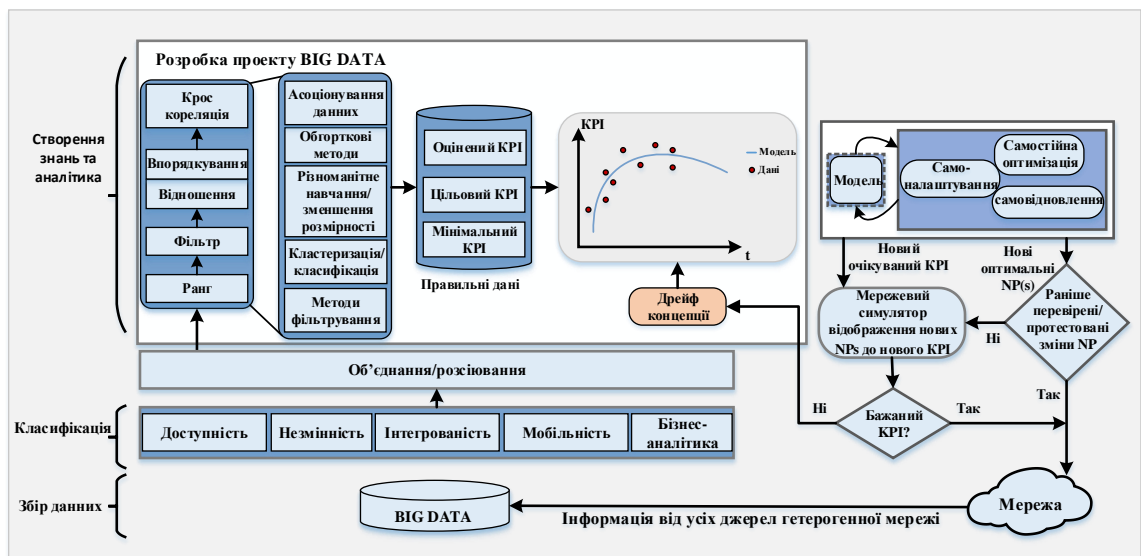


Рис. 4.34. Запропонована структура гетерогенної BSON мережі

Три основні функції які виконуються BSON на відміну від сучасних SON:

- Повний інтелект поточного стану мережі;
- Можливість прогнозування поведінки користувачів на основі обробки великих об'ємів даних;
- Можливість динамічного зв'язування відповіді мережі до параметрів мережі (NPs)

Розглянемо функціональні блоки системи BSON, що представлена на рис.4.34.

Структура BSON передбачає наступні кроки:

- 1) Запис даних із усіх джерел інформації в сукупний набір даних «великі дані».
- 2) Перетворення «великих даних» у необхідні дані, відповідно до розробленого методу. Розглянемо кроки необхідні для побудови знань:
  - a) Класифікація (**Classify**). Першим кроком на етапі побудови знань буде класифікація даних щодо основних операційних та бізнес-цілей (OBOs, operational and business objectives), а саме доступність даних, незмінність та інтегрованість сервісу, яким відповідає як QoS, так і QoE, мобільність та бізнес-аналітика.
  - b) Об'єднання/розсієння (Unify/diffuse). Після проведення класифікації даних необхідно об'єднати декілька показників ефективності (PI) у більш значущі KPI, що дасть змогу відображати фактичний рівень роботи користувачів та адекватну продуктивність системи.
  - c) Ранг (Важливість)(Rank): необхідно здійснити ранжування KPI для кожної ОВО та визначити їх вплив на ОВО.
  - d) Фільтр (Filter). Після встановлення важливості KPI, проводиться операція фільтрації для того, щоб відфільтрувати KPI, які знаходяться нижче порогового рівня. Мета полягає в тому, щоб звести до мінімуму складність даних, а також покращити ефективність подальшої аналітики даних та алгоритмів машинного навчання.

- e) Відношення (Relate). Далі необхідно визначити відношення кожного KPI до значення NP, який впливає на цей KPI.
  - f) Впорядкування (Order): Наступним кроком є оцінка ступеня асоціації KPI з відповідним NP, що є ключовим кроком до перетворення великих даних у правильні дані.
  - g) Крос-кореляція (Cross-correlate): Після впорядкування даних необхідно встановити взаємозв'язки кожного NP із кожним KPI.
- 3) Модель (Model). Наступним кроком є розробка моделей поведінки системи для взаємодії KPI та відповідних NP. Для цього система BSON використовує правильні дані, отримані за допомогою вищенаведених етапів пункту (2.a-g), для розробки онлайн-моделі системи для прогнозування та оптимізації поведінки системи.
- 4) Запустити процес роботи SON (Run SON engine):, щоб визначити новий NP та очікувані нові KPI.
- 5) Підтвердження (Validate): На даному кроці відбувається перевірка нових NPs, якщо дані мережеві параметри були раніше протестовані та перевірені експертними знаннями або попереднім досвідом оператора, проводимо зміни в гетерогенній мережі. В іншому випадку необхідно провести імітацію поведінки мережі для нових NP. Якщо симульована поведінка відповідає очікуваній поведінці (KPI), тоді змінюємо NPs у мережі.
- 6) Відновлення/покращення (Relearn/improve): Якщо нові NP не відповідають очікуваному значенню KPI, необхідно оновити поведінку імітаційної моделі за допомогою блоку дрейфу концепції. Даний блок необхідно запускати періодично для забезпечення точності роботи моделі.

Детально розглянемо блок «Модель» для різних випадків:

На рис.4.35 відображено блок – схему роботи гомогенних мереж.

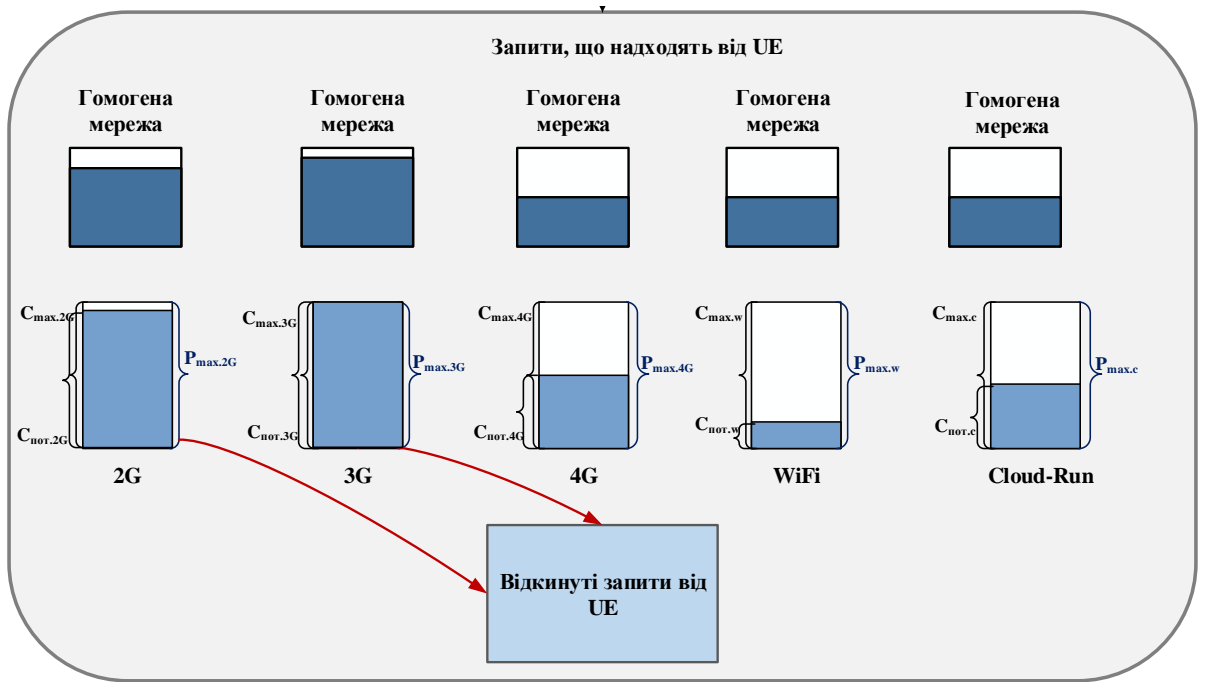


Рис. 4.35. Блок-схема роботи кожної технології окремо

На основі аналізу роботи гомогенних мереж побудовано гістограми розподілу за кількістю активних і втрачених запитів на кожний доступний сервіс, які показують стан кожної окремо взятої мережі.

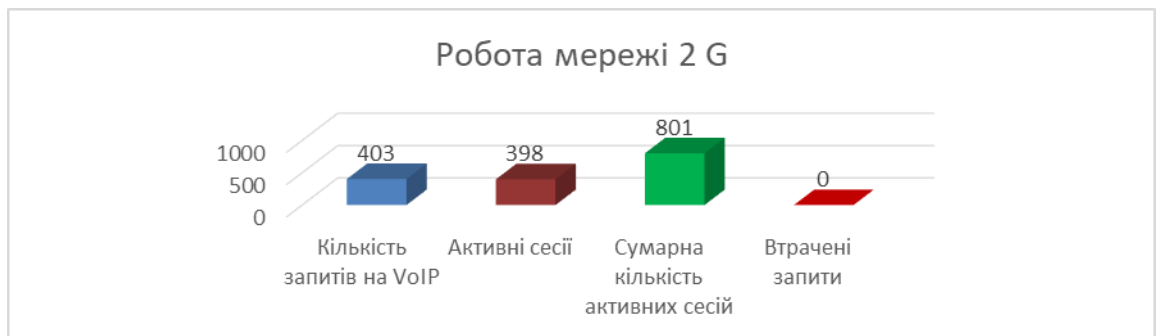


Рис. 4.36. Гістограма для випадку роботи мережі 2G.

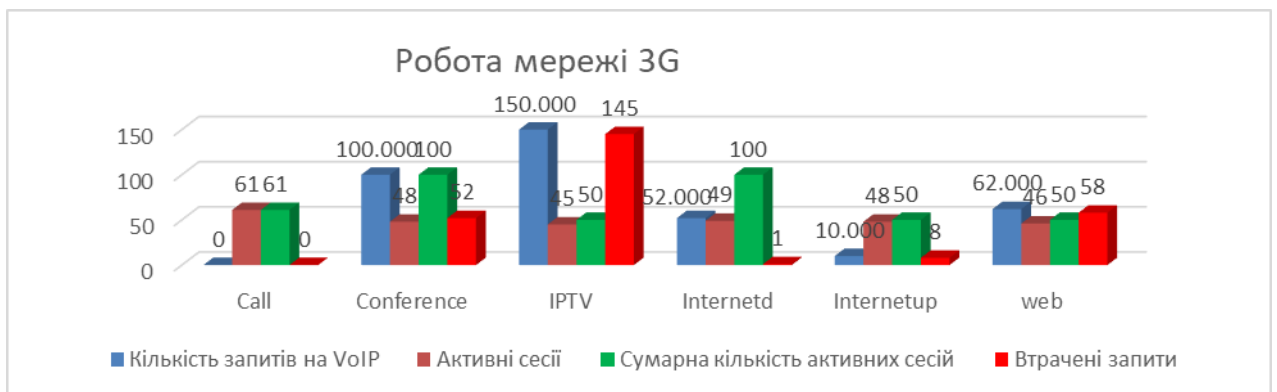


Рис. 4.37. Гістограма для випадку роботи мережі 3G



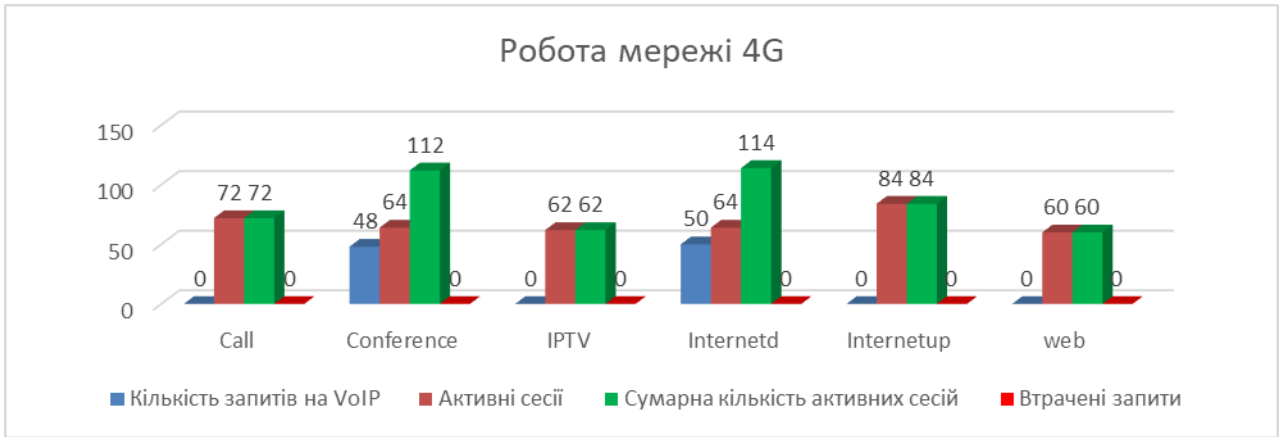


Рис. 4.38. Гістограма для випадку роботи мережі 4G

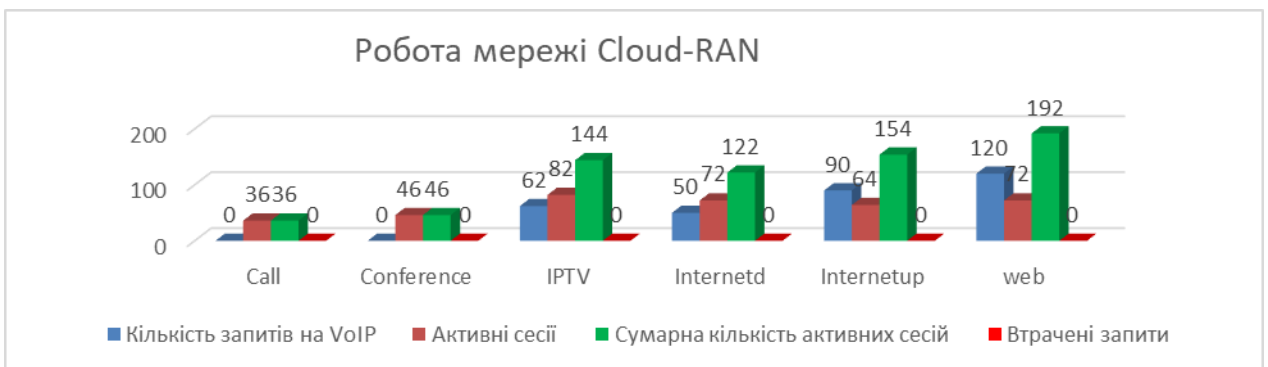


Рис. 4.39. Гістограма для випадку роботи мережі Cloud-RAN

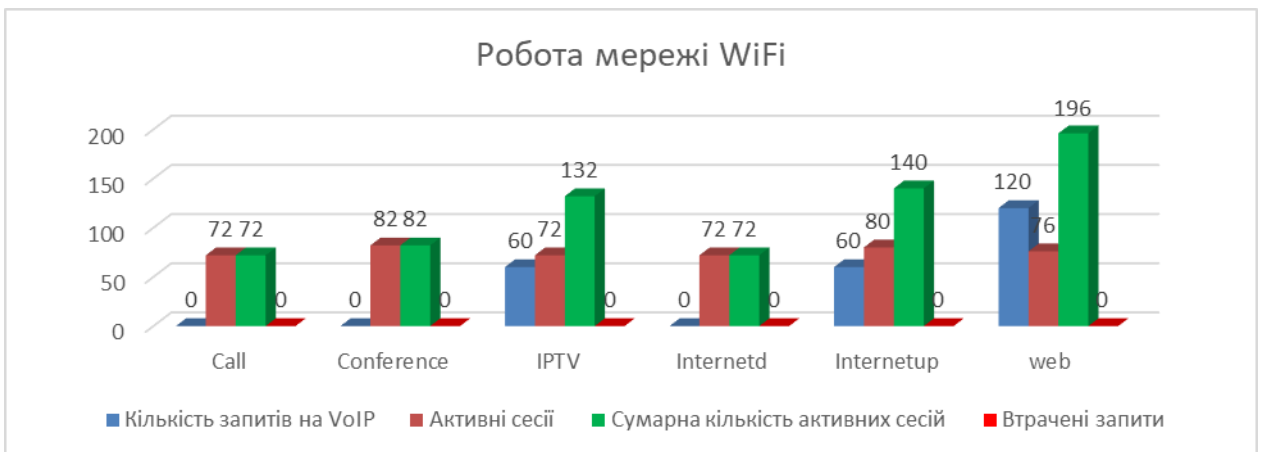


Рис. 4.40. Гістограма для випадку роботи мережі WiFi

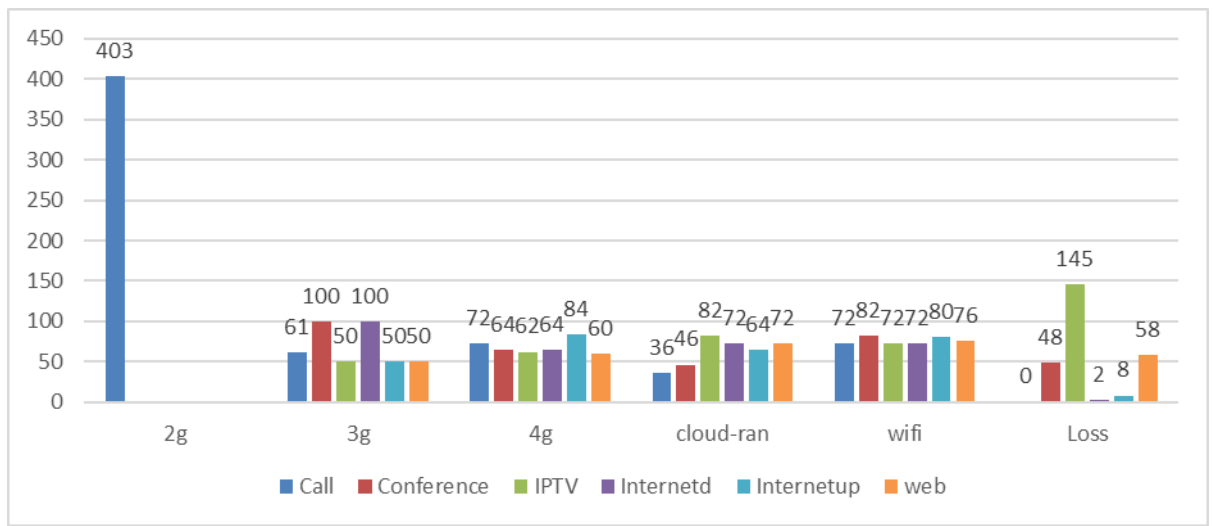


Рис. 4.41. Сумарна кількість запитів в гомогенних мережах

З рис. 4.36-4.41 видно, що базова станція з технологією 3G є перевантаженою, при чому всі інші базові станції простоюють.

Отже, використання гомогенних мереж є неоптимальним, адже в разі перевантаження деяких технологій запити від абонентів відкидаються, що призводить до погіршення якості обслуговування, а також зменшення продуктивності мережі. Тому в даній дисертаційній роботі запропоновано використовувати гетерогенну мережу, для підвищення якості обслуговування, а також, для зниження кількості незадоволених клієнтів.

- 1) Початок роботи гетерогенної мережі зі статичним резервуванням ресурсів, представленим в табл. 4.2

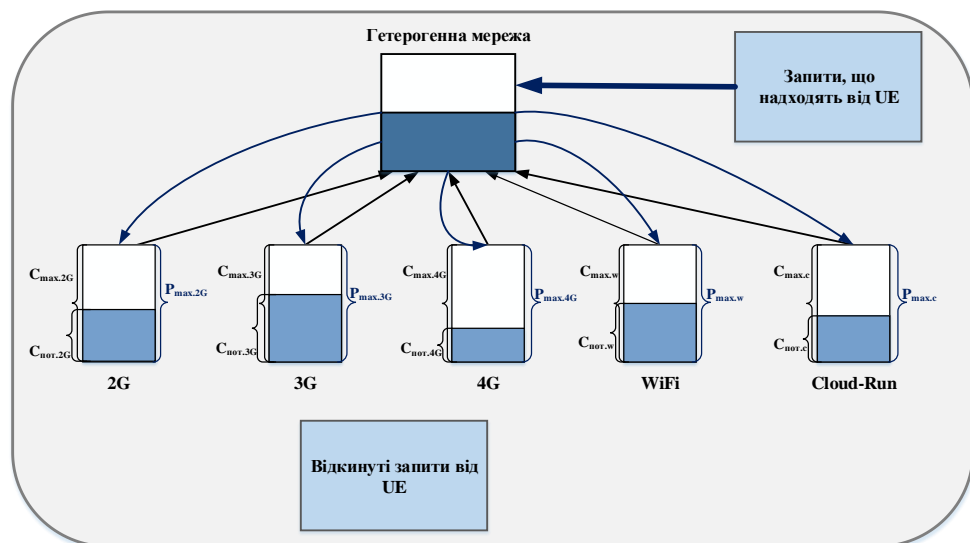


Рис. 4.42. Блок-схема роботи гетерогенної мережі

На рис. 4.42 зображено роботу гетерогенної мережі, в даному випадку сумарне навантаження, що поступає від користувачів розподіляється між базовими станціями відповідно до типу сервісу та зарезервованого ресурсу на БС кожної з технологій.

Розглянемо роботу гетерогенної мережі у випадку поступлення навантаження, що наведено в попередньому прикладі для сукупності гомогенних мереж.

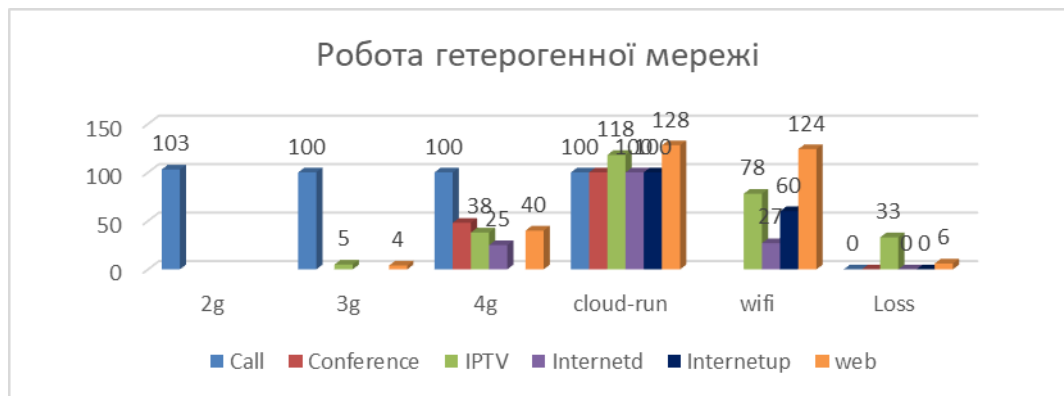


Рис. 4.43. Гістограма для випадку роботи гетерогенної мережі

Як бачимо з рис. 4.43 кількість навантаження від абонентів перерозподілилось. Перерозподіл відбувався відповідно до статистичного резервування кількості сеансів, що виділена для певного типу сервісу. Вхідні запити перерозподілились між БС в гетерогенній мережі, кількість втрачених запитів суттєво зменшилась та зросла продуктивність гетерогенної мережі.

- 2) Використання рівномірного завантаження гетерогенної мережі з динамічним резервуванням ресурсів.

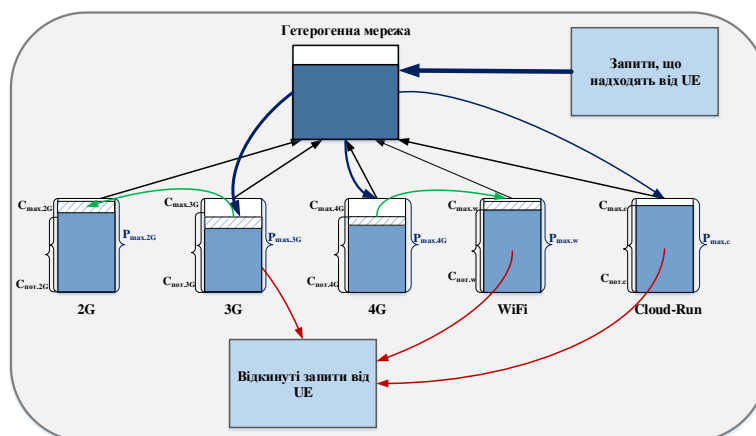


Рис. 4.44. Функціональна блок-схема роботи гетерогенної мережі із банансуванням навантаження

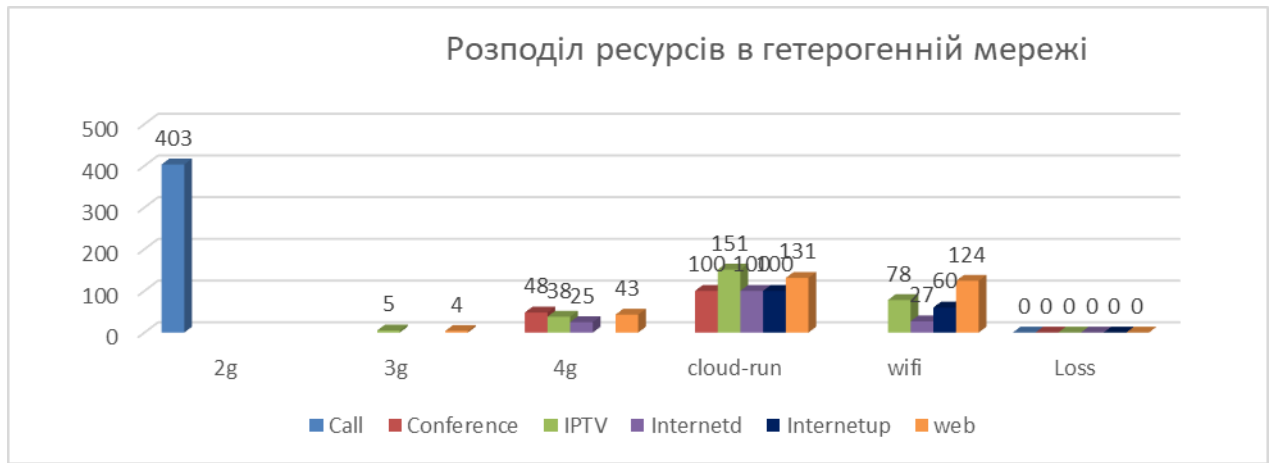


Рис. 4.45. Гістограма для випадку роботи мережі гетерогенної мережі із балансуванням навантаження

На рис. 4.45 представлений розподіл ресурсів в гетерогенній мережі, який базується на динамічному резервуванні кількості сеансів для різних типів сервісу. Рішення про необхідну кількість сеансів для кожної технології приймається після оцінки ресурсів необхідних для обслуговування вхідного навантаження в момент часу  $t$ . Даний перерозподіл дає змогу підвищити продуктивність гетерогенної мережі, використовувати всі наявні ресурси та адаптуватись до вхідного навантаження.

Для оцінки оптимізації мережі враховується нормоване значення ресурсів кожної з технологій.

На рис. 4.46 представлено результат роботи комплексного методу оптимізації гетерогенної мережі.

На ньому  $K_1$  – показник, що визначає сумарну продуктивність гомогенних мереж;

$K_2$  – показник, що визначає продуктивність гетерогенної мережі з статичним резервуванням кількості сеансів для кожного типу сервісу;

$K_3$  – показник, що визначає продуктивність гетерогенної мережі з динамічним резервуванням кількості сеансів для кожного типу сервісу.

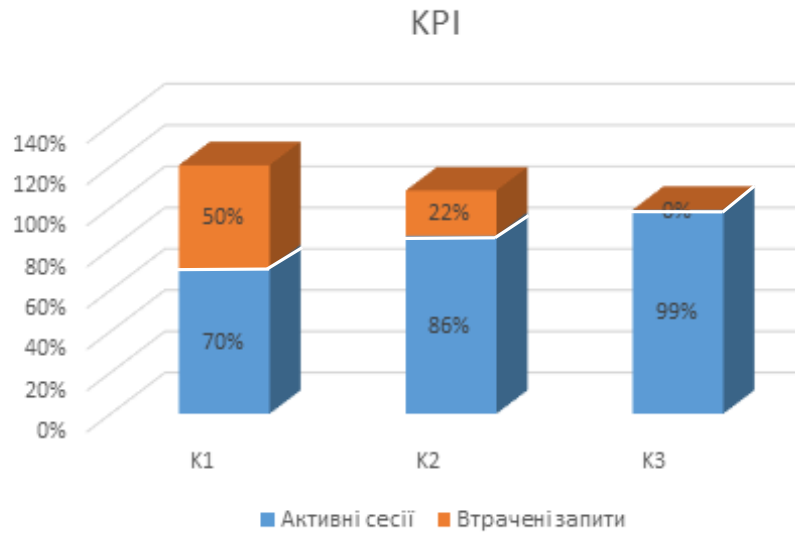


Рис. 4.46. Оцінка ефективності роботи запропонованого комплексного методу

З рис. 4.46 видно, що врахування динамічного резервування дозволяє максимально використовувати ресурси гетерогенної мережі.

3) Відкидання неперіоритетних користувачів для обслуговування та підключення пріоритетних запитів.

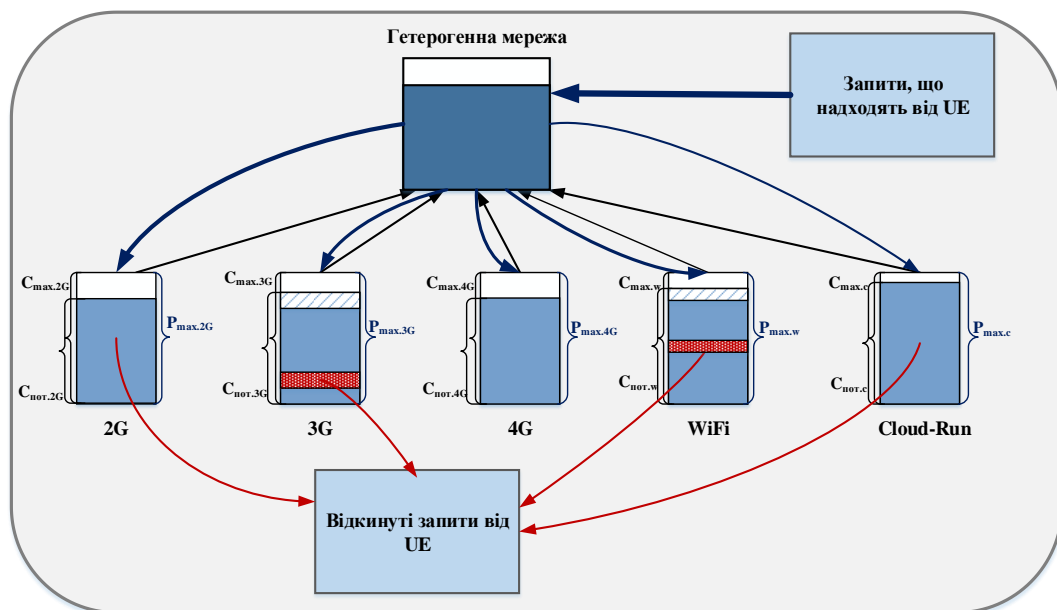


Рис. 4.47. Функціональна блок-схема роботи гетерогенної мережі із оцінкою пріоритетності користувачів

На рис. 4.47 представлена блок-схема розподілу вхідних запитів відповідно до пріоритетності користувача. Для оператора зв'язку важливим є задоволення потреб пріоритетних користувачів. Коли вхідне навантаження у гетерогенній мережі перевищує ресурси даної мережі запити від абонентів

відкидаються, при цьому необхідно враховувати пріоритетність запитів щоб зменшити рівень незадоволеності користувачів. Відповідно в роботі пропонується аналізувати пріоритетність запитів від UE [9]. При цьому пріоритетні запити будуть переходити в активні сесії, а не пріоритетні – відкидатись, якщо ресурсів мережі не буде вистачати для обслуговування пріоритетних запитів, тоді проводимо аналіз активних сесій та відкидаємо непраіоритетні сесії.



Рис. 4.48. Діаграма кількості пріоритетних і непраіоритетних користувачів.

На рис. 4.48 представлено діаграму роботи мережі з аналізом пріоритетності користувачів. В даному випадку гетерогенна мережа є максимально завантаженою, при цьому в момент часу  $t$  поступає 100 пріоритетних запитів від абонентів, які вже не можуть бути обслужені. Для того, що виділити ресурси для пріоритетних користувачів проводимо аналіз пріоритетності поточних сесій, що є непраіоритетними, але займають велику кількість ресурсів. В даному випадку для обслуговування 50 запитів на відео-конференцію та 50 запитів на інтернет дані, було відкинуто 15 поточних сесій (web) та 12 сесій (iptv). Отже, нехтуючи малою кількістю непраіоритетних запитів, досягається забезпечення гарантованої пропускнуої здатності запитам, що поступили від пріоритетних клієнтів тим самим зменшується кількість незадоволених користувачів.

#### 4.7. Висновки до розділу 4

В даному розділі проведено дослідження технологій для ефективного функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку. На основі даних отриманих в результаті дослідження, розроблено модель підвищення продуктивності роботи гетерогенної мережі із використанням системи обробки великих даних.

Вперше в роботі розроблено комплексний метод гнучкого управління ресурсами в гетерогенній мережі, який включає в себе: статичне резервування ресурсів для певного типу сервісу в кожній з технологій, динамічне резервування ресурсів, аналіз пріоритетності користувачів, що дає змогу зменшити кількість незадоволених клієнтів.

Розроблено структурну схему етапів оптимізації гетерогенної мережі, що дає змогу підвищити ефективність функціонування гетерогенних мереж мобільного зв'язку.

Як практичний результат, у дисертаційній кваліфікаційній роботі реалізовано систему обробки великих об'ємів даних. На мові програмування Python розроблено скрипти, що дають змогу аналізувати великі об'єми даних та шляхом фільтрації та впорядкування виводити правильні дані, що дають змогу приймати інтелектуальні рішення для управління ресурсами та прогнозувати поведінку гетерогенної мережі.

Оцінено ефективність запропонованих рішень та досягнуто підвищення продуктивності гетерогенної мережі на 16% із використанням методу статистичного резервування ресурсів мережі в порівнянні з гомогенними мережами; на 13% із використанням рівномірного розподілу ресурсів та динамічним процесом резервування, в порівнянні з попереднім методом. За допомогою пріоритезації користувачів підвищено якість обслуговування користувачів в гетерогенній мережі та зменшено кількість незадоволених клієнтів.

## ВИСНОВОК

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, становить розв'язок наукового завдання підвищення ефективності функціонування безпроводних гетерогенних мережних систем і покращення якості обслуговування користувачів за рахунок удосконалення методу адаптивного вибору систем радіодоступу та розроблення моделі спільного управління ресурсами з використанням технологій оброблення великих обсягів даних.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Проведено аналіз існуючих проблем у сучасних мережах зв'язку та встановлено, що основною проблемою мереж мобільного зв'язку є орієнтованість на площу покриття, а не на користувача, а також неможливість мережі адаптивно реагувати на сплески великих об'ємів інформації, створених абонентами.

2. Представлена математична постановка задачі вибору мережі доступу для покращення якості надання послуг мобільного зв'язку за рахунок ефективного використання ресурсів гетерогенної бездротової мережі та оптимальної процедури горизонтально-вертикального хендовера, на основі якої запропоновано метод адаптивного вибору вузла безпроводної мережі доступу в гетерогенному середовищі шляхом застосування теорії нечітких множин, що дало змогу забезпечити глобальний доступ та безшовну мобільність між безпроводними мережами із забезпеченням необхідної якості обслуговування, а користувачеві – ефективно використовувати власний мобільний пристрій в різних типах мереж.

3. Розроблено централізований алгоритм хендовера в гетерогенних мобільних мережах на основі хмарних обчислень. Таким чином, використовуючи можливості та засоби хмарних сервісних платформ, необхідні розрахунки для оптимального вибору мережної системи забезпечується в межах кількох мілісекунд.

4. Для дослідження процесів функціонування гетерогенних мережних систем в умовах високої мобільності користувачів розроблено імітаційну



модель, яка, в свою чергу, реалізує запропонований метод прийняття рішення щодо хендвера на основі механізму нечіткої логіки та оцінює якість обслуговування користувачів. Це дає змогу здійснювати налаштування великої кількості параметрів моделювання, використовуючи допоміжні математичні моделі, зокрема для опису та прогнозування процесів руху користувачів, а також ефективно використовувати ресурси операторів і надавати послуги з кращою якістю, а саме, у процесі дослідження зменшено середню затримку та джитер пакетів при обслуговуванні відео потоків реального часу до 6 разів.

5. Розроблено структурну схему етапів оптимізації безпроводних гетерогенних мереж, що дає змогу підвищити ефективність їх функціонування. Як практичний результат, у роботі реалізовано систему обробки великих об'ємів даних. На мові програмування Python розроблено скрипти, що дають змогу аналізувати великі об'єми даних та шляхом їх фільтрації і впорядкування виводити узагальнення, що дають змогу приймати інтелектуальні рішення для управління мережними ресурсами та прогнозувати поведінку гетерогенної мережної системи з використанням технологій Big Data.

6. Оцінено ефективність запропонованих рішень та досягнуто підвищення продуктивності гетерогенної мережі на 16% із використанням методу статичного резервування ресурсів мережі в порівнянні з гомогенними мережами; додатково на 13% – із використанням рівномірного розподілу ресурсів та динамічним процесом їх резервування, та у порівнянні з попереднім методом. Підвищено якість обслуговування користувачів в гетерогенній мережі за допомогою їх пріоритезації за групами.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Masiuk A. The method of adaptive selection of a wireless access network in a heterogeneous environment based on the theory of fuzzy sets / A. Masiuk, M. Klymash, I. Demydov, M. Beshley, H. Beshley, O. Panchenko // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2018. – Vol. 3. – Issue 1. – P. 11-22.
2. Strykhalyuk B. Service provisioning by using a structure stability algorithm in a virtualized data center based on cloud technology / Bogdan Strykhalyuk, Olga Shpur, Andriy Masiuk // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2014. – Volume 4, Number 1. – P. 81–86.
3. Масюк А. Р. Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень / А. Р. Масюк, І.Б. Стрихалюк, М. В. Брич, І. О. Кагало, Г. В. Бешлей // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. — № 874. — С. 110–121.
4. Бешлей М.І. Оцінка адекватності функціонування програмного маршрутизатора у процесі обслуговування мультимедійного трафіку // М.І. Бешлей, О.М. Селюченко, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк, Г.В. Холявка// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. - № 818. - С. 162-173.
5. Лунтовський А. О. Етапи розвитку сучасних інфокомунікаційних сервісів та енергетична ефективність мережевих технологій / А.О. Лунтовський, П. О. Гуськов, А. Р. Масюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. - № 796. - С. 131-139.
6. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk and M. Klymash // "2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2016. - P. 33-35.

7. Beshley M. Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization / M. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk // 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016. - P. 1-3.
8. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masiuk // IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015)], (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, Ukraine – P. 69-72. (Scopus)
9. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network test bed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko and A. Masiuk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv, 2015. - P. 1-4.
10. Masiuk A. Common radio resource management model for heterogeneous cellular networks / Masiuk, M. Beshley, O. Lavriv and Y. Deschynskiy // IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2016), Feb. 23-26, 2016, Lviv, Ukraine. - P. 661-663.
11. Krasko O. Enhanced MAC design for convergence of 5G backhaul network / O. Krasko, H. Al-Zayadi, A. Masyuk and M. Klymash // 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017. - P. 213-216.
12. Klymash M. Concept for ensuring effective functioning of mobile communication system in heterogenous 5G infrastructure / M. Klymash, H. Beshley, A. Masiuk and I. Strykhalyuk // 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, 2017. - P. 272-274.
13. Masiuk A. Resource management method in LTE heterogeneous networks / A. Masiuk, H. Beshley, B. Koval and R. Basa // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 2018. - P. 1131-1134.

14. Бешлей М.І. Підвищення ефективності роботи гетерогенних мереж методом динамічного перерозподілу ресурсів між різними безпроводовими технологіями / Бешлей М.І., Селюченко М.О., Гуськов П.О., Масюк А.Р. // Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології»: матеріали науково-технічної конференції (17-20 листопада 2015 р. м.Київ), Т.2 – К: ДУТ. – 2015. – С. 49–50.
15. Бешлей М.І. Розробка і дослідження імітаційної моделі безпроводної гетерогенної мережі / Климаш М.М., Масюк А.Р. // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р., м. Київ, Україна), 2016. - К.: НТТУ «КПІ». – С. 70-72.
16. Климаш М.М. Модель адаптивного управління радіоресурсами в безпроводних гетерогенних мережах / М.М. Климаш, М.І. Бешлей, А.Р. Масюк // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015: збірник матеріалів конференції (22-25 квітня 2015р., м. Київ, Україна), 2015 - К.: НТТУ «КПІ». – С.40-42.
17. Селюченко М.О. Багаторівневе управління ресурсами в гетерогенній мульти - операторській мережі // Селюченко М.О., Бешлей Г.В., Масюк А.Р., Бешлей М.І. // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT'2015). Conference proceedings. (29 October – 01 November, Lviv, Ukraine), 2015. – P. 125-128.
18. Климаш М.М. Аналіз властивостей вихідного потоку в системі розподілу інформації із самоподібним вхідним трафіком і обслуговуванням за порядком черги / Климаш М.М., Бугиль Б.А, Масюк А.Р. // Науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій": Програма. К.: НТУУ "КПІ", 2011. - С. 37-38.
19. Кожуров, Д. В. Модель обміну керуючою інформацією в сервісно-орієнтованій Cloud-мережі / Д.В. Кожуров, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій-2013 (СПТЕЛ-2013), 30 жовт.- 2 листоп. 2013 р. — Львів, 2013. — С. 105-108.

20. Бешлей М.І. Концепція програмно конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR / Климаш М.М., Масюк А.Р., Бешлей Г.В., Бешлей М.І. // Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (3-5 листопада 2016 р. м. Чернівці), 2016. - С. 35-36.
21. R. K. Lomotey, and R. Deters, "Towards Knowledge Discovery in Big Data," IEEE Int'l. Symp. Service Oriented System Engineering , 2014, pp. 181–91.
22. L. Gu et al., "Cost minimization for Big Data processing in Geo-distributed data centers," IEEE Trans. Emerging Topics in Computing, vol. 2, no. 3, Sept. 2014, pp. 314–23.
23. L. Lei et al., "Challenges on Wireless Heterogeneous Networks for Mobile Cloud Computing," IEEE Wireless Commun., vol. 20, no. 3, June 2013, pp. 34–44.
24. S. Samulevicius, T. B. Pedersen, and T. B. Sorensen, "MOST: Mobile Broadband Network Optimization Using Planned Spatio-Temporal Events," Proc. IEEE VTC-Spring, May 2015, pp. 1–5.
25. A. Ramaprasath, A. Srinivasan, and C. Lung, "Performance Optimization of Big Data in Mobile Networks," Proc. IEEE Canadian Conf. Electrical and Computer Engineering (CCECE), May, 2015, pp. 1364–68.
26. K. Zheng et al., "Heterogeneous Vehicular Networking: A Survey on Architecture, Challenges and Solutions," IEEE Commun. Surveys & Tutorials, vol. 17, no. 4, Fourth Quarter 2015, pp. 2377–2396.
27. G. P. Fettweis, "A 5G Wireless Communications Vision," Microwave J., Dec. 2012, pp. 24–36.
28. Mykhailo Klymash, Bohdan Stryhalyuk, Ivan Demydov, Mykola Beshley, Marian Seliuchenko. A Novel Approach of Optimum Multi-criteria Vertical Handoff Algorithm for Heterogeneous Wireless Networks // (IJEIT) . – 2014. - Volume 4 . - Issue 5(4). – P. 42-52.
29. Beshley M. SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets / M. Beshley, M. Klymash, B.Strykhalyuk,

O. Shpur, B. Bugil, I. Kagalo // International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE). – 2015 - Volume 4 - Issue 1 – P.10-21

30. Beshley M.M. Increasing the efficiency of real-time content delivery by improving the technology of priority assignment and processing of IP traffic / M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Lavriv, V. Chervenets, H. Kholiavka, M. Klymash // Smart Computing Review, - 2015.- Vol.5,- No.2. – P.76-88

31. Климаш М.М. Підвищення якості обслуговування в конвергентних мобільних системах на основі платформи UMA-A [Електронний ресурс] /М.М. Климаш, М.І. Бешлей, О.А. Лаврів, Б.М. Стрихалюк, Г.В.Проблеми телекомунікацій. – 2014. – № 1 (13). – С. 3 - 19.

32. Q. C. Li et al., “5G Network Capacity: Key Elements and Technologies,” IEEE Vehic. Tech. Mag., vol. 9, no. 1, Mar. 2014, pp. 71–78.

33. X. Wang et al., “Cache in the Air: Exploiting Content Caching and Delivery Techniques for 5G Systems,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, pp. 131–39.

34. T. Alsedairy et al., “Self Organizing Cloud cells: A Resource Efficient Network Densification Strategy,” Trans. Emerging Telecommun. Technologies.

35. T. Taleb and A. Ksentini, “Follow Me Cloud: Interworking Federated Clouds & Distributed Mobile Networks,” IEEE Network, vol. 27, no. 5, Sept./Oct. 2013. pp. 12–19.

36. G. Wunder et al., “5GNOW: Non-Orthogonal, Asynchronous Waveforms for Future Mobile Applications,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, Feb. 2014, pp. 97–105.

37. T. Taleb, “Towards Carrier Cloud: Potential, Challenges, & Solutions,” IEEE Wireless Commun., vol. 21, no. 3, June 2014, pp. 80–91.

38. Бешлей М.І. Модель системи динамічного управління пропускнуою здатністю каналу інтегрованої WI-FI/GSM мережі / М. І.Бешлей, В.П.Ткачук, Б.А. Бугиль, О.А. Лаврів // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2014.- № 796. - С. 83-96.

39. Стрихалюк Б.М. Моделювання та тестування системи управління гетерогенної мережі доступу / Б.М. Стрихалюк, М.І. Бешлей, Г.В. Холявка, М.В. Брич // Телекомунікаційні та інформаційні технології. – К.: - 2015. – №1 - С. 22-31.
40. Strykhalyuk B., Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems / B.Strykhalyuk, I.Kahalo, M.Brych, M.Beshley, M.Seliuchenko // Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - X: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. - 2014. –№4(40) - С. 125-132
41. Климаш М. М. Модель надання сервісів на основі методу адаптації логічної структури cloud-системи / М. М. Климаш, Б. М. Стрихалюк, О. М. Шпур, М. І. Бешлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. –№5(33) – С. 27-36
42. Стрихалюк Б.М. Дослідження статистичних параметрів та характеристик інформаційних потоків в гетерогенних мережах / Б.М.Стрихалюк, І.В.Демидов, В.І. Романчук, М.І. Бешлей // Наукові записки УНДІЗ. – 2014. – №6(34) – С. 82-92
43. N. Bhushan et al., “Network Densification: The Dominant Theme for Wireless Evolution into 5G,” IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, Feb. 2014, pp. 82–89.
44. A. Ben Zineb, M. Ayadi and S. Tabbane, "Fuzzy MADM based vertical handover algorithm for enhancing network performances," 2015 23rd International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), Split, 2015, pp. 153-159. doi: 10.1109/SOFTCOM.2015.7314095.
45. I. Ali et al., “Self Organization of Tilts in Relay Enhanced Networks: A Distributed Solution,” IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 13, no. 2, Feb. 2014, pp. 764–79.
46. H. Y. Lateef, A. Imran, and A. Abu-dayya, “A Framework for Classification of Self-Organising Network Conflicts and Coordination Algorithms,” Proc. IEEE PIMRC '13, 2013, pp. 2913–18.
47. Бешлей М.І. Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритезації потоків у маршрутизаторах /

М.І. Бешлей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко// Системи озброєння і військова техніка: наук. журнал - X: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. - 2016. –№5(142) - С. 114-123.

48. Климаш М. Розробка методу балансування навантаження в SDN мережах на основі модифікованого протоколу STP / М. Климаш, М. Бешлей, Ю. Дещинський, О. Панченко // Комп'ютерні технології друкарства. - 2015. - № 2. - С. 146-155.

49. Demydov I. Features of the cloud services implementation in the national network segment of Ukraine / I. Demydov, M. Klymash, M. Beshley, O. Shpur // Information and telecommunication science. К.: NTUU «KPI», 2016. - No.1. - P. 31-38.

50. Климаш М.М. Розроблення програмного маршрутизатора з автоматичним розгортанням віртуальних вузлів / М.М. Климаш, В.І. Романчук, О.М. Панченко, М.І. Бешлей, А.В. Поліщук // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2017. – № 884. –С. 66 – 75.

51. Бешлей Г. В. Алгоритм кластеризації, агрегації та класифікації M2M пристроїв в гетерогенній мережі 4G/5G / Г. В. Бешлей, М. О. Селюченко, І. А. Берневек, С. І. Пушак, М. І. Бешлей. // Радіоелектроніка та телекомунікації [зб. наук. пр.] / відп. ред. Б.А. Мандзій. – Л. : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", – 2017. –№874. –ст. 95 -102.

52. T. F. Cox and M. A. Cox, Multidimensional Scaling. CRC Press, 2010.

53. S. Hämmäläinen et al., LTE Self-Organising Networks (SON): Network Management Automation for Operational Efficiency, Wiley, 2012.

54. G. Paschos, E. Basētug̃, I. Land, G. Caire, and M. Debbah, “Wireless caching: Technical misconceptions and business barriers,” arXiv preprint arXiv:1602.00173, 2016.

55. X. Wang, M. Chen, T. Taleb, A. Ksentini, and V. Leung, “Cache in the Air: Exploiting content caching and delivery techniques for 5G systems,” IEEE Communications Magazine, vol. 52, no. 2, pp. 131–139, February 2014.



56. M. Tao, E. Chen, H. Zhou, and W. Yu, "Content-centric sparse multicast beamforming for cache-enabled cloud RAN," [Online] arXiv: 1512.06938, 2015.
57. V. Romanchuk, M. Beshley, A. Polishuk and M. Seliuchenko, "Method for processing multiservice traffic in network node based on adaptive management of buffer resource," 2018 (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 1118-1122.
58. T. Maksymyuk, M. Beshley, M. Klymash, O. Petrenko and Y. Matsevityi, "Eavesdropping-resilient wireless communication system based on modified OFDM/QAM air interface," 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 1127-1130.
59. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," 2018 (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 282-286.
60. H. Beshley, M. Beshley, T. Maksymyuk and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv-Slavske, Ukraine, 2018, pp. 1147-1151.
61. F. Bonomi, R. Milito, J. Zhu, and S. Addepalli, "Fog computing and its role in the internet of things," in Proceedings of the first edition of the MCC workshop on Mobile cloud computing, Helsinki, Finland, August 2012.
62. M. Zaharia, H. Karau, A. Konwinski, P. Wendell, Learning Spark. Lightning-Fast Big Data Analysis, Feb. 2015.
63. M. Frampton, Mastering Apache Spark, Sept. 2015.
64. R. Bradberry, E. Lubow, Practical Cassandra: A Developer's Approach, Dec. 2015.
65. D. Sullivan, NoSQL for Mere Mortals, 2016.
66. J. Turnbull, The Docker Book: Containerization is the new virtualization, 2016.
67. O. Panchenko, A. Polishuk, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Method for adaptive client oriented management of quality of service in integrated

SDN/CLOUD networks," 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T), Kharkov, 2017, pp. 452-455.

68. M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and M. Beshley, "Algorithm for clusterization, aggregation and prioritization of M2M devices in heterogeneous 4G/5G network," 2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology, Kharkov, 2017, pp. 182-186.

69. M. Klymash, H. Beshley, O. Panchenko and M. Beshley, "Method for optimal use of 4G/5G heterogeneous network resources under M2M/IoT traffic growth conditions," 2017 (UkrMiCo), Odessa, 2017, pp. 1-5.

70. V. Romanchuk, M. Beshley, O. Panchenko and P. Arthur, "Design of software router with a modular structure and automatic deployment at virtual nodes," 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT), Lviv, 2017, pp. 295-298.

71. Невдяев Л.М. Стандарты 3G [Электронный ресурс] - Режим доступа до статті: <http://shop-gsm.net/3g/1g-2g-3g-tehnologii.html>

72. Писаренко Г. С. О Технологии GPRS и перспективах ее развития [Электронный ресурс] - Режим доступа до статті: <http://www.divi.ru/text/a-phone2.shtml>

73. Чернихівський Є.М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж. – Львів: НУ«ЛП», 2011. – стор. 240-242.

74. Гольдштейн А.Б., Гольдштейн Б.С. SoftSwitch СПб.: БХВ – Санкт-Петербург, 2006. – 368 с.

75. С. Орлов Технология CDMA особенности и преимущества. - Режим доступа: <http://www.chipinfo.ru/literature/chipnews/200004/18.html>

76. Н. Долгополова, И. Рытвинский, Н. Быстрицкий Эффективное внедрение услуг Triple Play операторами связи [Электронный ресурс] - Режим доступа до статті: <http://www.telemultimedia.ru/art.php?id=162>.

77. M. Klymash, V. Romanchuk, M. Beshley and P. Arthur, "Investigation and simulation of system for data flow processing in multiservice nodes using

virtualization mechanisms," 2017 IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Kiev, 2017, pp. 989-992.

78. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko and A. Polishuk, "Adaptive flow routing model in SDN," 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, 2017, pp. 298-302.

79. 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.

80. M. Klymash, M. Seliuchenko, M. Beshley and S. Redchuk, "Increasing wavelengths utilization efficiency in OTNoDWDM network based on local resource distribution method," 2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2015, pp. 157-160.

81. Мир связи RAD: оптимизирующий шлюз A-bis [Электронный ресурс] - Режим доступа до статті: <http://www.telemultimedia.ru/art.php?id=162>

82. <http://habrahabr.ru> Фемтосоты: своя сота, свои правила [Электронный ресурс]-Режим доступа: <http://habrahabr.ru/company/beeline/blog/129424/>

83. Семенов Ю.А. Telecommunication technologies - телекоммуникационные технологии (v3.3, 10 мая 2010 года) [Электронный ресурс]/Ю.А. Семенов./ - Режим доступа до статті: <http://book.itер.ru>

84. Н. Елисеев. Фемтосоты в мобильной связи – преимущества и решения. Режим доступа: <http://daily.sec.ru/publication.cfm?rid=45&pid=22894>

85. <http://wcdma3g.ru> Глава 8.3 Планирование пропускной способности и зоны обслуживания.

86. Столлингс В. «Современные компьютерные сети» 2-е издание – СПб.: Питер, 2003. – 783 с.

87. Ипатов В. П. Системы мобильной связи . - Горячая линия –Телеком, 2003.- 272 с.

88. NEC Corporation Selects Tatar Systems to Deliver Femtocell Solutions. –<http://www.tatarasystems.com/contentmgr/showdetails.php/id/448>.
89. PicoChip and Tatar Systems Collaborate on SIP/IMS Femtocell Solution. –<http://www.tatarasystems.com/contentmgr/showdetails.php/id/510>.
90. Гольдштейн Б.С., Ехриель И.М., Рерле Р.Д. Интеллектуальные сети . - Радио и связь, 2000.- 500 с.
91. Волков А. Н. UMTS. Стандарт сотовой связи третьего поколения / А. Н. Волков, А. Е. Рыжков, М. А. Сиверс. – СПб. : Издательство “Линк”, 2008.—224 с.
92. Кааринен Х. Сети UMTS. Архитектура, мобильность, сервисы / Х. Кааринен, А. Ахтиайнен. —М. : Тех-носфера, 2007.—464 с.
93. 3GPP TR 36.912. Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (Release 9).
94. I. Demydov, M. Seliuchenko, M. Beshley and M. Brych, "Mobility management and vertical handover decision in an always best connected heterogeneous network," The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv, 2015, pp. 103-105.
95. M. Klymash, M. Beshley and B. Stryhaluk, "System for increasing quality of service of multimedia data in convergent networks," 2014 First International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology, Kharkov, 2014, pp. 63-66.
96. M. Klymash, M. Beshley, B. Strykhalyuk and T. Maksymyuk, "Research and development the methods of quality of service provision in Mobile Cloud systems," 2014 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom), Odessa, 2014, pp. 160-164
97. M. Seliuchenko, M. Beshley, O. Panchenko and M. Klymash, "Development of monitoring system for end-to-end packet delay measurement in software-defined networks," IEEE (TCSET'2016), Feb. 23-26, 2016, Lviv, Ukraine, pp. 667 – 670
98. Тихвинский В.О., Терентьев СВ., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура.— М.: Эко-Трендз, 2010.

99. 3GPP TS 36.104. Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 8).
100. Тихвинский В.О., Обеспечение роуминга в сетях LTE/LTE Advanced. – АйКом Инвест, 2013
101. Глоба Л. С. Метод вибору мережі доступу в мобільній системі SDR при вертикальному хендовері / Л. С. Глоба, С. В. Суліма, В. В. Курдеча // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2014. – № 796 : Радіoeлектроніка та телекомунікації. – С. 69-74.
102. Кирюшкин Р.А. Модифицированный метод вертикального хендовера/ Кирюшкин Р.А., Курдеча В.В.// одинадцята міжнародна науково-технічна конференція "проблеми телекомунікацій" с. 291-293.
103. Marquez-Barja J. An overview of vertical handover techniques: Algorithms, protocols and tools / J. Marquez-Barja, C. T. Calafate, J.-C. Cano, P. Manzoni // Computer Communications. — 2011. — vol. 34. — pp. 985–997.
104. Zekri M. A review on mobility management and vertical handover solutions over heterogeneous wireless networks / M. Zekri, B. Jouaber , D. Zeghlache // Computer Communications. — 2012. — vol. 35. — pp. 2055–2068.
105. Stevens-Navarro E., Lin Y., Wong V.W.S. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks // IEEE Transactions on Vehicular Technology. – 2008. – vol. 57
106. Столлингс В. Беспроводные линии связи и сети. 2 -е изд. -СПБ: Изд-во «Вильямс», 2003.
107. Беспроводные сети. Первый шаг : Пер. с англ. —М. : Издательский дом «Вильямс», 2005.
108. Громаков Ю.А., Стандарты и системы подвижной радиосвязи.—СПб.: Радио и Связь, 2011
109. Семенов Е.С., Тюхтяев Д.А., Арепьева Е.Е. Технология беспроводной связи LTE.— М.: ФГАОУ ВПО, 2011

110. Кааринен Х. Сети UMTS. Архитектура, мобильность, сервисы / Х. Кааринен, А. Ахтиайнен, Л. Лаитинен, С. Найан, В. Ниemi. —М. : Техносфера, 2007. —464 с.
111. Гельгор А. Л. Технология LTE мобильной передачи данных: учебное пособие. —СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2011.
112. Величко В.В. Передача данных в сетях мобильной связи третьего поколения.—СПб.: Радио и Связь, 2005
113. Базовые станции Nokia Flexi Multiradio <http://bwa.lgp.kz/fleximultiradio.php> 17.Moray Rumney and Agilent Technologies //LTE and the Evolution to 4G Wireless: Design and Measurement Challenges, 2013.
114. LTE в мире: первые итоги-[http://www.sib.com.ua/arhiv\\_2011/2011\\_4/statia\\_4\\_5\\_2011/statia\\_4\\_5\\_2011.htm](http://www.sib.com.ua/arhiv_2011/2011_4/statia_4_5_2011/statia_4_5_2011.htm), 2009.
115. LTE — решение стандарта 4G [Электронный ресурс]: Аналитический обзор Ericsson // ERICSSON.COM. — Апрель 2011.
116. Юрасов, С. 4G к 2017 году: где взять частоты [Электронный ресурс] / С. Юрасов // Экономическая правда. — 20.06.2015.
117. Teng, F., Guo, D., & Honig, M. L. (2014, December). Sharing of unlicensed spectrum by strategic operators. In Signal and Information Processing (GlobalSIP), 2014 IEEE Global Conference on (pp. 288-292). IEEE.
118. Тихвинский В.О., Терентьев С.В., Юрчук А.Б. Сети мобильной связи LTE: технологии и архитектура. – М.: Эко-Трендз, 2010. – 284с.: ил.
119. ETSI TS 136 211 V8.9.0 Long Term Evolution (LTE); Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation; Release 8, 01-2010.
120. Слюсар В. И. Системы MIMO: принципы построения и обработка сигналов / В. И. Слюсар // Электроника: наука, технология, бизнес. – 2005. – № 10. – С. 52 – 59.
121. Sauter, Martin. From GSM to LTE : an introduction to mobile networks and mobile broadband.- 2011.-452 з.

# ДОДАТОК 1. Програмний код імітаційної моделі гетерогенної мобільної системи зв'язку

Таблиця 1

Моделювання мобільної системи доступу

```
Randomize();
TRect rect(0,0,Image1->Width,Image1->Height);
Image1->Canvas->Brush->Style=bsSolid;
Image1->Canvas->FillRect(rect);
Image1->Canvas->Pen->Color = clBlack;
Image1->Canvas->Pen->Width = 1;
Image1->Canvas->Draw(BS[0].center_x-bmp->Width/2,BS[0].center_y-bmp->Height/2,bmp);
Image1->Canvas->Draw(BS[1].center_x-bmp->Width/2,BS[1].center_y-bmp->Height/2,bmp);
Image1->Canvas->Draw(BS[2].center_x-bmp->Width/2,BS[2].center_y-bmp->Height/2,bmp);
//sectors for first circle
Image1->Canvas->MoveTo(BS[0].center_x,BS[0].center_y);
Image1->Canvas->LineTo(BS[0].center_x, BS[0].center_y-BS[0].radius);
Image1->Canvas->MoveTo(BS[0].center_x,BS[0].center_y);
Image1->Canvas->LineTo(199, 167);
Image1->Canvas->MoveTo(BS[0].center_x,BS[0].center_y);
Image1->Canvas->LineTo(BS[0].center_x-(199-BS[0].center_x) , 167);
//sectors for second circle
Image1->Canvas->MoveTo(BS[1].center_x,BS[1].center_y);
Image1->Canvas->LineTo(BS[1].center_x, BS[1].center_y-BS[2].radius);
Image1->Canvas->MoveTo(BS[1].center_x,BS[1].center_y);
Image1->Canvas->LineTo(212, 167);
Image1->Canvas->MoveTo(BS[1].center_x,BS[1].center_y);
Image1->Canvas->LineTo(BS[1].center_x-(212-BS[1].center_x) , 167);
//sectors for third circle
Image1->Canvas->MoveTo(BS[2].center_x,BS[2].center_y);
Image1->Canvas->LineTo(BS[2].center_x, BS[2].center_y-BS[2].radius);
Image1->Canvas->MoveTo(BS[2].center_x,BS[2].center_y);
Image1->Canvas->LineTo(298, 330);
Image1->Canvas->MoveTo(BS[2].center_x,BS[2].center_y);
Image1->Canvas->LineTo(BS[2].center_x-(298-BS[2].center_x) , 330);
for(int i=0; i<3; i++)
{
    Image1->Canvas->Pen->Width = 3;
    if(i==0)Image1->Canvas->Pen->Color = clRed;
    if(i==1)Image1->Canvas->Pen->Color = clBlue;
    if(i==2)Image1->Canvas->Pen->Color = clGreen;
    Image1->Canvas->Brush->Style = bsClear;
```

```

    Image1->Canvas->Ellipse(BS[i].center_x-BS[i].radius,BS[i].center_y-
BS[i].radius,
    BS[i].center_x+BS[i].radius,BS[i].center_y+BS[i].radius);
}
if(RadioButtonBackgroundLoad->Checked)
{
    //first circle
    Image1->Canvas->Pen->Width = 1;
    Image1->Canvas->Pen->Color = clRed;
    if(major_cell==1 && RadioButtonGroupeUser->Checked) abonents_count =
random(200)+300;
    else abonents_count = random(200);
    ChartCell1->Series[0]->Add(abonents_count,"",clRed);
    ChartCell1->Series[1]->Add(300,"",clBlack);
    int x=0,y=0;
    for(int i=0; i<abonents_count; i++)
    {
        abonents_x[0][i] = abonents_y[0][i] = 0;
        x = random(400);
        y = random(400);
        int distance = sqrt(pow(BS[0].center_x-x,2)+pow(BS[0].center_y-y,2));
        if(distance<BS[0].radius)
        {
            abonents_y[0][i] = y;
            abonents_x[0][i] = x;
            Image1->Canvas->MoveTo(abonents_x[0][i],abonents_y[0][i]);
            Image1->Canvas->Ellipse(abonents_x[0][i]-2, abonents_y[0][i]-2,
abonents_x[0][i]+2, abonents_y[0][i]+2);
        }
    }
    //second circle
    Image1->Canvas->Pen->Color = clBlue;
    if(major_cell==2 && RadioButtonGroupeUser->Checked) abonents_count =
random(200)+300;
    else abonents_count = random(200);
    ChartCell2->Series[0]->Add(abonents_count,"",clBlue);
    ChartCell2->Series[1]->Add(300,"",clBlack);
    x=0,y=0;
    for(int i=0; i<abonents_count; i++)
    {
        abonents_x[1][i] = abonents_y[1][i] = 0;
        x = random(400);
        y = random(400);
        int distance = sqrt(pow(BS[1].center_x-x,2)+pow(BS[1].center_y-y,2));
        if(distance<BS[1].radius)
        {
            abonents_y[1][i] = y;

```



```

        abonents_x[1][i] = x;
        Image1->Canvas->MoveTo(abonents_x[1][i],abonents_y[1][i]);
        Image1->Canvas->Ellipse(abonents_x[1][i]-2, abonents_y[1][i]-2,
abonents_x[1][i]+2, abonents_y[1][i]+2)
    }
    //third circle
    Image1->Canvas->Pen->Color = clGreen;
    if(major_cell==3 && RadioButtonGroupUser->Checked) abonents_count =
random(200)+300;
    else abonents_count = random(200);
    ChartCell3->Series[0]->Add(abonents_count, "", clGreen);
    ChartCell3->Series[1]->Add(300, "", clBlack);
    x=0,y=0;
    for(int i=0; i<abonents_count; i++)
    {
        abonents_x[2][i] = abonents_y[2][i] = 0;
        x = random(400);
        y = random(400);
        int distance = sqrt(pow(BS[2].center_x-x,2)+pow(BS[2].center_y-y,2));
        if(distance<BS[2].radius)
        {
            abonents_y[2][i] = y;
            abonents_x[2][i] = x;
            Image1->Canvas->MoveTo(abonents_x[2][i],abonents_y[2][i]);
            Image1->Canvas->Ellipse(abonents_x[2][i]-2, abonents_y[2][i]-2,
abonents_x[2][i]+2, abonents_y[2][i]+2);
        }
    }
    if(RadioButtonAutoUser->Checked)
    {
        user3->next_move();
        // LabelManulUserSpeed->Visible = true;
        Image1->Canvas->Pen->Color = clRed;
        Image1->Canvas->MoveTo(user3->route_x[0],user3->route_y[0]);
        for(int j=1; j<user3->route_steps; j++)
        {
            Image1->Canvas->LineTo(user3->route_x[j],user3->route_y[j]);
            Image1->Canvas->Ellipse(user3->route_x[j]-2, user3->route_y[j]-2,
user3->route_x[j]+2, user3->route_y[j]+2);
        }
        int distance = sqrt(pow(user3->route_x[user3->route_steps-1]-user3-
>route_x[user3->route_steps],2)+pow(user3->route_y[user3->route_steps-1]-user3-
>route_y[user3->route_steps],2));
        LabelManulUserSpeed->Caption = "Швидкість користувача: " +
IntToStr(distance/3)+" км/год.";
        ChartAutoUserSpeed->Series[0]->Add(distance/3, "", clRed);
        for(int i=0; i<3; i++)
    }

```

```

    {
        calculate_distance_to_BS(&BS[i],user3);
        calculate_signal_attenuation(&BS[i],user3);
    }
    ChartDistance->Series[0]->Add(user3->distance_to_BS[0]*10," ",clRed);
    ChartDistance->Series[1]->Add(user3->distance_to_BS[1]*10," ",clBlue);
    ChartDistance->Series[2]->Add(user3->distance_to_BS[2]*10," ",clGreen);
    ChartSignal->Series[0]->Add(user3->attenuation_from_BS[0]," ",clRed);
    ChartSignal->Series[1]->Add(user3->attenuation_from_BS[1]," ",clBlue);
    ChartSignal->Series[2]->Add(user3->attenuation_from_BS[2]," ",clGreen);
} //else LabelManulUserSpeed->Visible = false;

```

Таблица 2

Клас, який моделює об'єкт «Абонент»

```

class Abonent {
public:
    int route_x[100000];
    int route_y[100000];
    int distance;
    int distance_to_BS[3];
    float attenuation_from_BS[3];
    Abonent(){ }
    Abonent(int x, int y)
    {
        Randomize();
        route_x[0] = x;
        route_y[0] = y;
        route_steps = 0;
        distance = 50;
    }
    void next_move()
    {
        int x,y;
        route_steps++;
        do{
            x = random(200);
            y = random(200);
            distance = sqrt(pow(route_x[route_steps-1]-x,2)+pow(route_y[route_steps-1]-
y,2));
        }while(distance>50);
        route_x[route_steps] = x;
        route_y[route_steps] = y;
    };
};

```

## ДОДАТОК 2. Фрагмент коду моделі гетерогенної мережі з використанням технології Big Data

Job-1. Підрахунок кількості активних сесій в гетерогенній мережі.

```
from __future__ import print_function
from pyspark import SparkContext, SparkConf
#from pyspark.sql import SparkSession
from pyspark.sql import SQLContext, Row

if __name__ == '__main__':
    conf = SparkConf()
    conf.setAppName("network_demo")
    conf.set("spark.cassandra.connection.host", "172.17.0.2")
    conf.set("spark.cassandra.auth.username", "username")
    conf.set("spark.cassandra.auth.password", "password")

    keyspace = "network_demo"
    table = "active_user"

    spark_context = SparkContext(conf=conf)
    sql_context = SQLContext(spark_context)

    data_frame = sql_context.read.format("org.apache.spark.sql.cassandra") \
        .options(keyspace=keyspace, table=table).load()
    sql_context.registerDataFrameAsTable(data_frame, table)

    query = sql_context.sql("""select technology, service_type, count(service_type)
from active_user group by technology, service_type
order by technology""")

    query.show(1000)

    spark_context.stop()
```

Job-2. Підрахунок кількості запитів від користувачів.

```
from __future__ import print_function
from pyspark import SparkContext, SparkConf
#from pyspark.sql import SparkSession
from pyspark.sql import SQLContext, Row

if __name__ == '__main__':
    conf = SparkConf()
    conf.setAppName("network_demo")
    conf.set("spark.cassandra.connection.host", "172.17.0.2")
    conf.set("spark.cassandra.auth.username", "username")
    conf.set("spark.cassandra.auth.password", "password")
```

```

keyspace = "network_demo"
table = "request_user"

spark_context = SparkContext(conf=conf)
sql_context = SQLContext(spark_context)

data_frame = sql_context.read.format("org.apache.spark.sql.cassandra") \
    .options(keyspace=keyspace, table=table).load()
sql_context.registerDataFrameAsTable(data_frame, table)

query = sql_context.sql("""select service, count(id) from request_user group by
service""")

query.show(1000)

spark_context.stop()

```

Job-3. Перевірка наявності вільних ресурсів в гетерогенній мережі

```

from __future__ import print_function
from pyspark import SparkContext, SparkConf
from pyspark.sql import SparkSession
from pyspark.sql import SQLContext, Row

if __name__ == '__main__':
    conf = SparkConf()
    conf.setAppName("network_demo")
    conf.set("spark.cassandra.connection.host", "172.17.0.2")
    conf.set("spark.cassandra.auth.username", "username")
    conf.set("spark.cassandra.auth.password", "password")

    keyspace = "network_demo"
    table_1 = "active_user_pr"
    table_2 = "max_params"

    spark_context = SparkContext(conf=conf)
    sql_context = SQLContext(spark_context)

    #DataFrame1 related to request_user table
    data_frame_1 = sql_context.read.format("org.apache.spark.sql.cassandra") \
        .options(keyspace=keyspace, table=table1).load()
    sql_context.registerDataFrameAsTable(data_frame1, table1)

    #DataFrame2 related to max_params table
    data_frame2 = sql_context.read.format("org.apache.spark.sql.cassandra") \
        .options(keyspace=keyspace, table=table2).load()
    sql_context.registerDataFrameAsTable(data_frame2, table2)

```

```
query_request_user = sql_context.sql("""select service, count(id) from
request_user group by service""")
```

```
query_max_params = sql_context.sql("""SELECT technology, service, kpi FROM
max_params order by technology""")
```

*#Returns a new DataFrame with an alias set.*

```
df_as1 = df.alias("data_frame1")
```

```
df_as2 = df.alias("data_frame2")
```

```
df_calculate_free_resources = df_as1.join(df_as2, col("df_as1.service") ==
col("df_as2.service"), 'inner').show(df_calculate_free_resources)
```

```
query.show(1000)
```

```
#`data_frame2.show(1000)
```

```
#query3 = data_frame1.join(data_frame2, data_frame1("service_type") ==
data_frame2("service_type"), "left_outer")
```

```
#concat = query.unionAll(query)
```

```
#query3.show(10000)
```

```
spark_context.stop()
```

Job-4. Підрахунок кількості запитів від користувачів.

```
from __future__ import print_function
```

```
from pyspark import SparkContext, SparkConf
```

```
from pyspark.sql.functions import lit
```

```
from pyspark.sql import SparkSession
```

```
from pyspark.sql import SQLContext, Row
```

```
if __name__ == '__main__':
```

```
conf = SparkConf()
```

```
conf.setAppName("network_demo")
```

```
conf.set("spark.cassandra.connection.host", "172.17.0.2")
```

```
conf.set("spark.cassandra.auth.username", "username")
```

```
conf.set("spark.cassandra.auth.password", "password")
```

```
keyspace = "network_demo"
```

```
table_1 = "request_user"
```

```
table_2 = "active_user"
```

```
spark_context = SparkContext(conf=conf)
```

```
sql_context = SQLContext(spark_context)
```

```
#DataFrame1 related to request_user table
```

```
data_frame_request_user
```

```
sql_context.read.format("org.apache.spark.sql.cassandra") \
```

```
.options(keyspace=keyspace, table=table1).load()
```

```
sql_context.registerDataFrameAsTable(data_frame1, table1)
```

```
#DataFrame2 related to request_user table
```

```

data_frame_active_user =
sql_context.read.format("org.apache.spark.sql.cassandra") \
    .options(keyspace=keyspace, table=table2).load()
sql_context.registerDataFrameAsTable(data_frame2, table2)

#DataFrame_qos with qos data
data_frame_qos = sqlContext.createDataFrame(
    [("Call", "Conference", "IPTV", "Internetd", "Internetup", "WEB"), (0.064, 2.048,
4.096, 2.048, 2.048, 10.240)], ("service", "qos"))

query_request_user = sql_context.sql("""select service, count(id) from
request_user group by service""")
query_active_user = sql_context.sql("""select count (service_type) as
ServiceCount, service_type, technology from active_user group by service_type""")

query_max_params = sql_context.sql("""select technology, service, kpi from
max_params order by technology""")

#Returns a new DataFrame with an alias set.
df_as1 = df.alias("data_frame_request_user")
df_as2 = df.alias("data_frame_active_user")
df_as3 = df.alias("data_frame_qos")

df_capacity_request = df_as1.join(df_as2, col("df_as1.service") ==
col("df_as3.service"), 'inner').show(df_capacity_request)
sql_context.registerDataFrameAsTable(df_capacity_request, table)
query_calaculate_capacity_request =
sql_context.sql("""select ServiceCount*qos as capacity_request, service from
df_calaculate_capacity order by technology""")

query_calaculate_capacity_request.saveAsTable("max_params", "append")
df_capacity_active = df_as1.join(df_as2, col("df_as1.service") ==
col("df_as2.service"), 'inner').show(df_capacity_active)
sql_context.registerDataFrameAsTable(df_capacity_active, table)
query_calaculate_capacity_active = sql_context.sql("""SELECT
ServiceCount*qos as capacity_active, service from df_calaculate_capacity order by
technology""")
query_calaculate_capacity_active.saveAsTable("max_params", "append")

query_calaculate_capacity.show(1000)
spark_context.stop()

```

## ДОДАТОК 3. Акти впровадження результатів роботи



"ЗАТВЕРДЖУЮ"  
Директор  
ТЗОВ ВТФ "Контех"  
Смольницький Є.С.  
\_\_\_\_\_ 2018 р.

### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи

Масюка Андрія Романовича

на тему:

**" Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах "**

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВТФ "Контех" використані результати кандидатської дисертаційної роботи Масюка А.Р. "Методи та алгоритми підвищення ефективності комутації інформаційних потоків у оптичних транспортних мережах". А саме:

- алгоритм вертикального хендвера в гетерогенних мобільних мережах із використанням методів нечіткої логіки для більш повної агрегації та оброблення мережних параметрів і прийняття рішення про міжсистемне переключення, що дало змогу ефективно використовувати ресурси різних мережних операторів і надавати телекомунікаційні послуги з кращою якістю (до 6 разів зменшено середню затримку та джитер пакетів даних при обслуговуванні відео потоків реального часу).
- метод додаткового резервування ресурсів мережі, дав змогу д підвищити продуктивність гетерогенної мережі мобільного зв'язку до 16%. За допомогою застосування пріоритезації користувачів гетерогенної безпроводної мережі підвищено якість їх обслуговування та зменшено кількість незадоволених клієнтів.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ ВТФ "Контех" відповідають результатам теоретичних досліджень, що представлені у дисертаційній роботі.

Директор

Є.С. Смольницький

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор  
ПП "Цифрові технології"  
Ганчак З.В.

" 01 " червня 201 8 р.

### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Масюка Андрія Романовича на тему  
**" Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних  
гетерогенних мережах "**

Даний акт складений про те, що у ПП "Цифрові технології" для підвищення якості обслуговування абонентів безпроводного зв'язку у процесі надання інформаційних потоків використані результати дисертаційної роботи Масюка А.Р. " Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах ", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка, на відміну від відомих, автоматизує запропонований метод вибору радіоінтерфейсу вузла безпроводного доступу на основі теорії нечітких множин, використовуючи допоміжні математичні моделі, зокрема для опису та прогнозування процесів руху користувачів мереж мобільного зв'язку та дала змогу здійснювати вибір значної кількості параметрів моделювання для створення умов дослідження, що є близькими до умов реальної експлуатації телекомунікаційних систем;
- метод підвищення продуктивності гетерогенної мережної системи, який дає змогу в загальному підвищити продуктивність мережі на 29%, у порівнянні із існуючими гомогенними системами.

Внаслідок перевірки використаних моделей та методів 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.



"ЗАТВЕРДЖУЮ"  
Генеральний директор  
ТзОВ "Телекомунікаційна компанія"  
Пентак І.М.  
" 25 " 2018 р.



**АКТ**

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Масюка Андрія Романовича  
на тему:

**" Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних  
гетерогенних мережах "**

Даний акт складений про те, що у ТзОВ "Телекомунікаційна компанія" використані результати кандидатської дисертаційної роботи Масюка А.Р. "Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах ". А саме:

- метод підвищення продуктивності гетерогенної мережі мобільного зв'язку шляхом знаходження комплексного інтелектуального рішення щодо спільного управління ресурсами телекомунікаційних операторів, який, на відміну від відомих, включає процедуру ініціації вертикального хендвера, гнучкого перерозподілу інформаційних потоків і відкидання неперіоритетних сеансів користувачів та дає змогу підтримувати безшовне пересування рухомих абонентів із необхідною якістю обслуговування;
- систему оброблення великих обсягів даних на мові програмування Python, яка дала змогу приймати обґрунтовані рішення для управління мережними ресурсами та прогнозування поведінки гетерогенної мережної системи.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ "Телекомунікаційна компанія", відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 5%.

*Заступник генерального директора  
ТзОВ "Телекомунікаційна компанія"*



*Е.С. Смалчук*

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з науково-педагогічної роботи  
НУ "Львівська політехніка"



доц. Давидчак О.Р.  
20 18 р.

### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Масюка Андрія Романовича на тему  
**" Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних  
гетерогенних мережах "**  
у навчальному процесі кафедри телекомунікацій

Даний акт складений комісією у складі:

- д.т.н., проф. Климаш М.М., завідувача кафедри телекомунікацій;
- к.т.н., доц. Колодій Р.С., заступника декана базової вищої освіти Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н. Стрихалюк Б.М., заступника директора Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;

про те, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати кандидатської дисертаційної роботи Масюка А.Р. "Моделі та алгоритми спільного управління ресурсами в безпроводних гетерогенних мережах", а саме:

- розроблена імітаційна модель процесу функціонування гетерогенної мережі мобільного зв'язку, яка, на відміну від відомих, автоматизує запропонований метод вибору радіоінтерфейсу вузла безпроводного доступу на основі теорії нечітких множин використана в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторній роботі " Динамічний розподіл та резервування пропускної здатності каналу між декількома логічними в гетерогенній мережі, з дисципліни «Побудова та протоколи гетерогенних мереж мобільного зв'язку» для студентів спеціальності 8.17000200 «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізація «Інформаційні мережі зв'язку»
- розроблена система оброблення великих обсягів даних на мові програмування Python, а саме скрипти для аналізу, фільтрації та впорядкування великих обсягів даних, які дали змогу приймати обґрунтовані рішення для управління мережними ресурсами та прогнозування поведінки гетерогенної мережної системи використана в навчальному процесі, в лекційних курсах і лабораторних роботах, з дисципліни «Розподілені сервісні системи та Cloud-технології»

Члени комісії:

Климаш М.М.  
Колодій Р.С.  
Стрихалюк Б.М.

## **ДОДАТОК 4. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації**

*Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:*

1. Masiuk A. The method of adaptive selection of a wireless access network in a heterogeneous environment based on the theory of fuzzy sets / A. Masiuk, M.Klymash, I. Demydov, M. Beshley, H. Beshley, O. Panchenko // Internet of Things (IoT) and Engineering Applications (Canada). – May, 2018. – Vol. 3. – Issue 1. – P. 11-22.

2. Strykhalyuk B. Service provisioning by using a structure stability algorithm in a virtualized data center based on cloud technology / Bogdan Strykhalyuk, Olga Shpur, Andriy Masiuk // Computational Problems of Electrical Engineering. – 2014. – Volume 4, Number 1. – P. 81–86.

3. Масюк А. Р. Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень / А. Р. Масюк, І. Б. Стрихалюк, М. В. Брич, І. О. Кагало, Г. В. Бешлей // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. — № 874. — С. 110–121.

4. Бешлей М.І. Оцінка адекватності функціонування програмного маршрутизатора у процесі обслуговування мультимедійного трафіку // М.І. Бешлей, О.М. Селюченко, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк, Г.В. Холявка// Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. - № 818. - С. 162-173.

5. Лунтовський А. О. Етапи розвитку сучасних інфокомунікаційних сервісів та енергетична ефективність мережевих технологій / А.О. Лунтовський, П. О. Гуськов, А. Р. Масюк // Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації. — Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. - № 796. - С. 131-139.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (форма участі здобувача):*

6. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk and M. Klymash // "2016 Third International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T), Kharkiv, 2016. - P. 33-35. (Очна участь здобувача, співдоповідач, 4-6 жовтня 2016).

7. Beshley M. Ensuring the quality of service flows in multiservice infrastructure based on network node virtualization / M. Beshley, V. Romanchuk, V. Chervenets and A. Masiuk // 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), Kiev, 2016. - P. 1-3. (Очна участь здобувача, співдоповідач, 12-15 вересня 2016 р).

8. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masiuk // IEEE International Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology (IEEE PIC S&T 2015)], (Kharkiv, October 13-15, 2015). – Kharkiv, Ukraine – P. 69-72. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

9. Beshley M. Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network test bed / M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko and A. Masiuk // The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics, Lviv, 2015. - P. 1-4. (Очна участь здобувача, співдоповідач, 24-27 лютого 2015 р.).

10. Masiuk A. Common radio resource management model for heterogeneous cellular networks / Masiuk, M. Beshley, O. Lavriv and Y. Deschynskiy // IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET'2016), Feb. 23-26, 2016, Lviv, Ukraine. - P. 661-663. (Очна участь здобувача із доповіддю).

11. Krasko O. Enhanced MAC design for convergence of 5G backhaul network / O. Krasko, H. Al-Zayadi, A. Masyuk and M. Klymash // 2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication

Technologies (AICT), Lviv, 2017. - P. 213-216. (Очна участь здобувача, співдоповідач, 4-7 липня 2017 р.).

12. Klymash M. Concept for ensuring effective functioning of mobile communication system in heterogenous 5G infrastructure / M. Klymash, H. Beshley, A. Masiuk and I. Strykhalyuk // 2017 14th International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), Lviv, 2017. - P. 272-274. (Очна участь здобувача із доповіддю, 21-25 лютого 2017 р.).

13. Masiuk A. Resource management method in LTE heterogeneous networks / A. Masiuk, H. Beshley, B. Koval and R. Basa // 2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Slavske, 2018. - P. 1131-1134. (Очна участь здобувача із доповіддю, 20-24 лютого 2018 р.).

14. Бешлей М.І. Підвищення ефективності роботи гетерогенних мереж методом динамічного перерозподілу ресурсів між різними безпроводовими технологіями / Бешлей М.І., Селюченко М.О., Гуськов П.О., Масюк А.Р. // Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології»: матеріали науково-технічної конференції (17-20 листопада 2015 р. м.Київ), Т.2 – К: ДУТ. – 2015. – С. 49–50. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

15. Бешлей М.І. Розробка і дослідження імітаційної моделі безпроводної гетерогенної мережі / Климаш М.М., Масюк А.Р. // X Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2016: збірник матеріалів конференції (19-22 квітня 2016р., м. Київ, Україна), 2016. - К.: НТТУ «КПІ». – С. 70-72. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

16. Климаш М.М. Модель адаптивного управління радіоресурсами в безпроводних гетерогенних мережах / М.М. Климаш, М.І. Бешлей, А.Р. Масюк // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» ПТ-2015: збірник матеріалів конференції (22-25 квітня 2015р., м. Київ, Україна), 2015 - К.: НТТУ «КПІ». – С.40-42. (Очна участь здобувача із доповіддю).

17. Селюченко М.О. Багаторівневе управління ресурсами в гетерогенній мульти - операторській мережі // Селюченко М.О., Бешлей Г.В., Масюк А.Р., Бешлей М.І. // 1st International Conference "Advanced Information and Communication Technologies"(AICT'2015). Conference proceedings. (29 October – 01 November, Lviv, Ukraine), 2015. – P. 125-128. (Очна участь здобувача із доповіддю).

18. Климаш М.М. Аналіз властивостей вихідного потоку в системі розподілу інформації із самоподібним вхідним трафіком і обслуговуванням за порядком черги / Климаш М.М., Бугиль Б.А, Масюк А.Р. // Науково-технічна конференція "Проблеми телекомунікацій": Програма. К.: НТУУ "КПІ", 2011. - С. 37-38. (Очна участь здобувача, співдоповідач, 19-22 квітня 2011 р.).

19. Кожуров, Д. В. Модель обміну керуючою інформацією в сервісно-орієнтованій Cloud-мережі / Д.В. Кожуров, О.А. Лаврів, А.Р. Масюк // Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій-2013 (СПТЕЛ-2013), 30 жовт.- 2 листоп. 2013 р. — Львів, 2013. — С. 105-108. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

20. Бешлей М.І. Концепція програмно конфігурованої гетерогенної мережі мобільного зв'язку на основі технологій SDN/NFV та SDR / Климаш М.М., Масюк А.Р., Бешлей Г.В., Бешлей М.І. // Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах: матеріали V Міжнародної науково-практичної конференції (3-5 листопада 2016 р. м. Чернівці), 2016. - С. 35-36. (Очна участь здобувача, співдоповідач).