

**Кагало Ігор Олександрович**

УДК 621.396

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Підвищення енергоефективності та якості обслуговування  
інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi**

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*

**/М. І. Бешлей/**

## АНОТАЦІЯ

*Кагало І.О.* Підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi. - 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, 2020.

В дисертаційній роботі розв'язано науково-технічне завдання підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi шляхом розроблення методів адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону, планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу, а також удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для передавання даних, із забезпеченням необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку.

У першому розділі розглянуто існуючі підходи щодо інтеграції технологій LTE і Wi-Fi з метою подальшого розвитку мобільних мереж зв'язку та підвищення спектральної ефективності. Особлива увага приділяється методам вибору кращої радіотехнології і схем планування радіоресурсів, які функціонують на каналному рівні та в мережі радіодоступу. Встановлено, що забезпечення задовільної якості сприйняття отримувачем і виконання вимог до якості обслуговування є непростим завданням в умовах передавання даних по безпроводних LTE та Wi-Fi мережах, оскільки безпроводний канал є ненадійним середовищем передавання і піддається впливу завад у значно більшому ступені, ніж провідні канали. Пропускна здатність безпроводного каналу може значно флюктувати з плином часу, а через ефект завмирання сигналу (федінгу) і багатопроменевого поширення сигналу можуть виникати як одиничні, так і корельовані в часі помилки. Щоб приховати ці особливості безпроводного середовища і забезпечити виконання вимог до якості обслуговування, в безпроводних мережах використовуються свої протоколи каналного рівня, які на сьогоднішній день мають недоліки та вимагають удосконалення.

Другий розділ роботи присвячено розробленню концептуальної моделі інтегрованої мобільної мережі наступного покоління на основі використання технологій LTE-U та Wi-Fi, яка базується на централізованому SDN контролері для реалізації адаптивного управління ресурсами мережі. Розроблено метод адаптивного формування багаторівневої структури радіодоступу інтегрованих мереж LTE/WI-FI/LTE-U, що дало змогу уникнути міжкоміркової інтерференції, підвищити якість обслуговування та енергоефективність мережі. Запропоновано метод адаптивного використання неліцензійного діапазону частот мережами Wi-Fi та LTE-U для забезпечення необхідної якості послуг. Даний метод, на основі вимог QoS користувачів, централізовано приймає обґрунтовані рішення щодо частки використання радіоресурсів оператором мобільного зв'язку LTE, що дає змогу підвищити спектральну ефективність в інтегрованих мережах LTE з уникненням міжсистемної інтерференції. Для подолання наслідків короточасних втрат зв'язку (інтерференція, низький рівень сигналу), що можуть виникнути у мережах Wi-Fi в умовах масового розгортання LTE-U, розробляється дисципліна обслуговування черги на каналному рівні.

У третьому розділі розроблено імітаційну модель інтегрованої мережі з використанням мови програмування C++ та LTE-A Downlink System Level Simulator. У результаті моделювання, встановлено, що якщо мережа складається лише з рівня макрокомірок, то в середньому один абонент може отримувати пропускну здатність від 20 до 25 Мбіт/с, при обслуговуванні макрокоміркою та пікокоміркою 45-50 мбіт/с, а при обслуговуванні абонента в гетерогенній мережі з трьома рівнями базових станцій та використання технології LTE-U, середня пропускну здатність становить 67-71 Мбіт/с, відповідно, коли включені всі малі комірки, середня пропускну здатність становить 70-75 Мбіт/с. Доведено, що у випадку коли активні усі малі комірки і коли працює метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу варто відзначити, що в другому випадку при зменшенні пропускну здатності на 1 - 4 % підвищується енергоефективності мережі на 30-42%.

У четвертому розділі реалізовано метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі Wi-Fi в корпоративній інфраструктурі НУ “Львівська політехніка”, що дало змогу забезпечити користувачам високошвидкісний доступ до Інтернету та підвищити доступність до мережі Wi-Fi в умовах пікових навантажень. Розроблено імітаційну модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” у середовищі Ornet Modeler. Розроблена імітаційна модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi дає змогу спрогнозувати затримки обслуговування потоків реального часу в корпоративній мережі в умовах різного навантаження та вибрати оптимальні рішення щодо конфігурації мережевих пристроїв для забезпечення необхідного QoS. Проведено дослідження ефективності використання удосконаленого алгоритму обслуговування черг канального рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу в умовах передавання декількох відеопотоків реального часу. Встановлено, що розроблений алгоритм обслуговування черг на канальному рівні дав змогу в умовах інтеграцій технологій LTE/ Wi-Fi/LTE- U мережі запобігти блокуванню черги головним пакетом та покращити якість передавання відеопотоків від 5% до 45% оціненої за критерієм MSE в залежності від тривалості відмови каналу.

**Ключові слова:** інтегрована мережа, локалізація абонентського навантаження, LTE, LTE-U, W-Fi, пропускна здатність мережі, якість сервісу.

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. M. Beshley, M. Klymash, B.Stryhaluk, O. Shpur, B. Bugil and I. Kagalo, “SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets,” *International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE)*, vol. 4, Issue 1, pp. 10–21. January 2015.

2. B. M. Strykhalyuk, I. O. Kahalo, M. V. Brych, M. I. Beshley, and M. O. Seliuchenko, “Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core

virtualization for military communication systems”, *Системи озброєння і військова техніка*, № 4, с. 125–132, 2014.

3. І. О. Кагало, М. І. Бешлей, М. М. Климаш, О. М. Панченко, Г. В. Бешлей, “Адаптивне формування багаторівневої радіоструктури інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi,” *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), с.24–38, 2019.

4. А. Р. Масюк, І. Б. Стрихалюк, М. В. Брїч, І. О. Кагало, Г. В. Бешлей, “Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 874, с. 110–121, 2017.

5. М. М. Климаш, М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, і І. О. Кагало, “Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіoeлектроніка та телекомунікації*, №. 796, с. 182–194, 2014.

6. М. М. Климаш, О. А. Лаврїв, І. О. Кагало, Б. В. Коваль, Т. А. Максимюк, “Покращення параметрів радіоінтерфейсу LTE/HSOPA,” *Комп’ютерні технології друкарства*, №. 26, с. 130–137, 2011.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. V. Romanchuk, T. Andrukhiv and I. Kahalo, "The main causes of failures SQL Server," *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv-Slavske, 2012, pp. 376-376.

8. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 282-286.

9. P. Huskov, T. Maksymyuk, I. Kahalo and M. Klymash, "Smart backhauling subsystem for 5G heterogeneous network," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, 2015, pp. 481-483.

10. H. Beshley, M. Klymash, M. Beshley and I. Kahalo. "Improving the Efficiency of LTE Spectral Resources Use by Introducing the new of M2M/IoT Multi-Service Gateway," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, 2019, pp. 481-483.

11. I. Kahalo, H. Beshley, A. Masiuk and V. Pashkevych, " The method of transmitting real-time video streams for Wi-Fi networks with short-term channel failures," *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT'2019)*, Lviv, 2019, pp. 356-359.

12. I. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, 2019, pp. 1167-1170.

13. М.М. Климаш, М.І. Бешлей, І.О Кагало, Л.М. Готра, "Вдосконалення методів та алгоритмів управління інформаційними потоками в конвергентних телекомунікаційних мережах," *матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 25-річчю заснування кафедри "Радіотехніки та інформаційні безпеки" Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича*", м. Чернівці, 2014, с.106-107.

14. Б.А. Бугиль, І.О.Кагало, "Підвищення ефективності маршрутизації інформаційних потоків на основі оптимального розподілу мережевих ресурсів," *матеріали V міжнародної наукової конференції молодих вчених "Комп'ютерні науки та інженерія*, Львів, 2011 , с. 304-305.

15. O. Lavriv, I. Kahalo, and R.Kolodiy , " Application of NoSQL approach in data-centered network architectures: big data case," *2015 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015)*, Lviv, Ukraine, pp. 103–105.

## ABSTRACT

*Kahalo I. O.* Models and algorithms for joint resource management in wireless heterogeneous networks. - Graduate work as a 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, 2020.

The thesis is devoted to solving the scientific and technical task of improving the energy efficiency and the quality of service in the integrated LTE/Wi-Fi networks by developing the method of adaptive unlicensed spectrum access, the method of radio resource planning and network structure design, as well as improving the algorithm of the link level queueing in the Wi-Fi network in order to tolerate short-term link failures during the transmission of the real-time video streams.

The first chapter surveys existing approaches to the integration of LTE and Wi-Fi technologies aiming at the further development of mobile communication networks with better spectral efficiency. Special attention is paid to methods of the radio technology selection and the radio resources planning on the link and physical layers. In particular, it should be noted that ensuring an acceptable quality of user experience and quality of service requirements is a difficult task in the wireless LTE and Wi-Fi networks due to unreliable transmission environment that is much more exposed to interference than wired channels. The bandwidth of wireless channel can fluctuate over time due to the signal fading and multi-path propagation that result in singular and time-correlated errors. To tackle this problem of the wireless channels and to ensure the quality of service requirements, existing wireless networks use specific link layer protocols, which have many shortcomings that need to be fixed.

The second chapter is devoted to the development of a conceptual model of integrated next generation mobile network based on the LTE-U and Wi-Fi technologies, and a centralized SDN controller for adaptive management of network resources. The method of an adaptive design of the multilevel radio access structure for integrated LTE/WI-FI/LTE-U networks has been developed to avoid the inter-cell interference, improve the quality of service and the energy efficiency of the network.

A method of an adaptive unlicensed spectrum access for Wi-Fi and LTE-U networks has been proposed to ensure the required quality of service. Based on the QoS requirements of end users, the proposed method provides knowledge-based decisions on the radio resources share of LTE mobile operator that allows to increase the spectral efficiency of integrated LTE/Wi-Fi networks with the inter-system interference avoidance. The algorithm of a link level queuing has been developed to overcome the consequences of short-term link failures (interference, low signal level), which may occur in Wi-Fi networks in case of the wide LTE-U deployment.

In the third chapter, a simulation model of an integrated LTE/Wi-Fi network has been developed using the C++ programming language and the LTE-A Downlink System Level Simulator. Simulation results show that if a network consists of the macro cells only, users experience a throughput of 20 to 25 Mbit/s on average. If the network consists of macrocells and pico cells, users experience a throughput 45-50 Mbit/s on average. Finally, in a heterogeneous network with three levels of base stations and the LTE-U technology, the average throughput per user is 67-71 Mbit/s. If all small cells are included, the average throughput per user is 70-75 Mbit/s. Thus, it has been proved that adaptive network structure design is only 1-4% short in terms of throughput comparing to the case of all active small cells, while being approximately 30-42% more energy efficient.

In the fourth chapter, the method of adaptive adjustment of Wi-Fi access point range in the enterprise network of Lviv Polytechnic National University has been implemented. Proposed method provides the high-speed Internet access to the Wi-Fi users during peak network loads. A simulation model of the integrated LTE/Wi-Fi network has been developed reflecting the information network of Lviv Polytechnic National University based on the Opnet Modeler environment. The developed simulation model allows to predict the service delay of real-time streams in the enterprise network for different load conditions and provides the best solution for the network devices according to the target QoS. The efficiency of the improved algorithm of a link level queueing in the Wi-Fi network to tolerate short-term link failures during the transmission of the real-time video streams has been assessed.. Simulation results show that the developed algorithm allows to prevent the



queue blocking by the main packet and to improve the quality of video streams transmission from 5% to 45% (MSE criterion) depending on the channel failure duration in the integrated LTE/Wi-Fi/LTE- U network.

**Key words:** integrated network, user localization, LTE, LTE-U, W-Fi, network bandwidth, quality of service.

The list of author's publications:

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

1. M. Beshley, M. Klymash, B.Stryhaluk, O. Shpur, B. Bugil and I. Kagalo, "SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets," *International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE)*, vol. 4, Issue 1, pp. 10–21. January 2015.

2. B. Strykhalyuk, I. Kahalo, M. Brych, M. Beshley, and M. Seliuchenko, "Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems", *Arms systems and military equipment*, № 4, pp. 125–132, 2014.

3. I. Kahalo, M. Beshley, M. Klymash, O. Panchenko, H. Beshley, "Adaptive Formation of the Multilevel Radio Structure of LTE/Wi-Fi Integrated Networks," *Telecommunication and information technologies* № 3(64), pp.24–38, 2019.

4. A. Masiuk, I. Strykhalyuk, M. Brych, I. Kahalo, H. Beshley, "Intellectual Vertical Handover Algorithm in Heterogeneous Mobile Network Based on Cloud Technology," *Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications*, № 874, pp. 110–121, 2017.

5. M. Klymash, M. Kyryk, N. Pleskanka, I. Kahalo, "Multi-level model of data buffering in nodes of service of a multi-service traffic," *Herald of Lviv Polytechnic National University, Series of Radioelectronics and Telecommunications*, №. 796, pp. 182–194, 2014.

6. M. Klymash, O. Lavriv, I. Kahalo, B. Koval, T. Maksymyuk, "Improvement of radio interface parameters LTE/HSOPA," *Computer printing technologies*, №. 26, pp. 130–137, 2011.

7.

*Proceedings that certify an improvement of thesis materials:*

8. V. Romanchuk, T. Andrukhiv and I. Kahalo, "The main causes of failures SQL Server," *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv-Slavske, 2012, pp. 376-376.

9. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 282-286.

10. P. Huskov, T. Maksymyuk, I. Kahalo and M. Klymash, "Smart backhauling subsystem for 5G heterogeneous network," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, 2015, pp. 481-483.

10. H. Beshley, M. Klymash, M. Beshley and I. Kahalo. "Improving the Efficiency of LTE Spectral Resources Use by Introducing the new of M2M/IoT Multi-Service Gateway," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, 2019, pp. 481-483.

11. I. Kahalo, H. Beshley, A. Masiuk and V. Pashkevych, " The method of transmitting real-time video streams for Wi-Fi networks with short-term channel failures," *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT'2019)*, Lviv, 2019, pp. 356-359.

12. I. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, 2019, pp. 1167-1170.

13. M. Klymash, M. Beshley, I. Kahalo, L. Hotra, "Improvement of methods and algorithms of information flow management in convergent telecommunication networks," *IV International Scientific Conference «Physical and technological problems of transfer, processing and storage information in infocommunication systems»*, Chernivtsi, 2014, pp.106-107.

14. B. Buhyl,, I. Kahalo, “ Improving information flow routing efficiency based on optimal allocation of network resources,” *Proceedings of the 5th International Scientific Conference of Young Scientists "Computer Science and Engineering*, Lviv, 2011 , pp. 304-305.

15. O. Lavriv, I. Kahalo, and R.Kolodiy , “ Application of NoSQL approach in data-centered network architectures: big data case,” *2015 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015)*, Lviv, Ukraine, pp. 103–105.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	15
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЙ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВПРОВАДЖЕННЯ ГЕТЕРОГЕННИХ МОБІЛЬНИХ МЕРЕЖ.....	22
1.1 Сучасні тенденції розвитку гетерогенних мереж мобільного зв'язку .....	22
1.2 Огляд існуючих підходів щодо інтеграції технологій LTE та Wi-Fi.....	27
1.3 Розвантаження мобільної мережі LTE за допомогою безпроводної корпоративної мережі (Hotspot 2.0/ Wi-Fi Certified Passpoint) .....	35
1.4 Аналіз основних невирішених завдань для забезпечення ефективного функціонування інтегрованих мереж мобільного зв'язку LTE/Wi-Fi.....	38
1.4.1 Аналіз існуючих методів уникнення міжкоміркової інтерференції в системах LTE.....	38
1.4.2 Аналіз існуючих методів уникнення міжсистемної інтерференції в інтегрованій LTE-U / Wi-Fi мережі .....	43
1.5 Постановка науково-практичного завдання дисертаційного дослідження ..	49
1.6 Висновки до розділу 1 .....	51
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ АДАПТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ РАДІОРЕСУРСІВ ТА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ РІВНЯ РАДІОДОСТУПУ ІНТЕГРОВАННИХ МЕРЕЖ LTE/WI-FI З МІЖРІВНЕВОЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ.....	53
2.1 Концептуальна модель інтегрованої LTE/Wi-Fi мобільної мережі наступного покоління.....	53
2.2 Метод адаптивного використання неліцензійного діапазону частот 5 ГГц мережами Wi-Fi та LTE-U для забезпечення необхідної якості послуг.....	57
2.2.1 Модель гетерогенної мережі LTE-U та Wi-Fi з міжсистемною інтерференцією.....	57
2.2.2 Алгоритм розподілу неліцензійних ресурсів з уникненням інтерференції між операторами LTE в умовах спільного використання 5 ГГц діапазону частот .....	58
2.2.3 Вплив технології LTE-U на швидкість передавання даних в мережі Wi-Fi .....	61

2.2.4	Метод адаптивного управління доступом до неліцензійного радіоканалу в умовах спільного співіснування систем Wi-Fi та LTE-U для забезпечення QoS .....	62
2.3	Алгоритм обслуговування черги канального рівня в LTE-U/ Wi-Fi мережі для передавання даних, із забезпеченням необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку.....	68
2.3.1	Алгоритм обслуговування черги канального рівня з врахуванням додаткових (Retry limit) спроб передавання.....	69
2.3.2	Алгоритм вибору пакета для передавання з черги канального рівня з врахуванням тривалості очікування пакету .....	73
2.4	Метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi.....	78
2.5	Висновки до розділу 2 .....	97
РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ МЕРЕЖ LTE/WI-FI.....		
3.1	Дослідження території покриття LTE та Wi-Fi за допомогою мобільних додатків для імітаційного моделювання мережі.....	99
3.2	Моделювання сценаріїв адаптивного розподілу навантаження в процесі інтеграції технологій LTE/Wi-Fi/LTE-U.....	103
3.2.1	Адаптивний розподіл навантаження в LTE мережі в умовах інтеграції із технологією Wi-Fi (hotspot 2.0/Wi-Fi Certified Passpoint) .....	104
3.2.2	Адаптивний розподіл навантаження в LTE мережі в умовах інтеграції із технологією LTE-U .....	109
3.3	Моделювання та дослідження процесу функціонування інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi та LTE-U.....	111
3.3.1	Розробка імітаційної моделі інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi/LTE-U .....	111
3.3.2	Оцінка ефективності застосування запропонованих рішень на основі імітаційного моделювання .....	116
3.4	Висновки до розділу 3 .....	122

РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ АДАПТИВНОГО ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ РІВНЯ РАДІОДОСТУПУ ТА ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНИХ МЕРЕЖ LTE/WI-FI В КОРПОРАТИВНУ ІНФРАСТРУКТУРУ.....	123
4.1 Дослідження топології реальної інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” для реалізації інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi .....	123
4.2 Практична реалізація методу адаптивного формування радіоструктури Wi-Fi мережі НУ “Львівська політехніка” .....	135
4.3 Побудова імітаційної моделі інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” в середовищі Opnet Modeler.....	141
4.4 Дослідження ефективності використання модифікованої дисципліни обслуговування черги на каналному рівні Wi-Fi мережі .....	145
4.5 Висновки до розділу 4 .....	153
ВИСНОВКИ.....	155
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	159
ДОДАТОК 1. Програмний код імітаційної моделі інтегрованої мобільної системи зв’язку.....	183
ДОДАТОК 2. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи.....	191
ДОДАТОК 3. Список публікацій здобувача за темою дисертації та .....	193
відомості про апробацію результатів дисертації .....	193

**Актуальність теми.** Упродовж останніх десятиліть трафік у мережах як мобільного, так і фіксованого зв'язку експоненційно зростає. Це пов'язано як і з кількісним зростанням користувачів мобільного зв'язку, так і з розвитком нових послуг, що вимагають від мереж значної пропускну здатності. Сучасні мережі не спроможні обслуговувати прогнозовані великі обсяги мобільного трафіку з належною якістю (Quality of Service, QoS). Тому необхідна побудова мереж мобільного зв'язку нового покоління на основі існуючих технологій. Розгортання малих комірок, за рахунок невеликої площі покриття дає змогу значно покращити системну спектральну ефективність, а також розвантажити інфраструктуру макрокомірок. Однак розміщення базових станцій з більш високою щільністю для збільшення ємності мережі неминуче призведе до зростання складності уникнення інтерференційних завад, збільшення вартості розгортання мережі, а також додаткових енергетичних та економічних витрат на підтримку її працездатності. Водночас на сьогоднішній день, ліцензований радіоспектр є досить обмеженим і тому дорогим ресурсом, а традиційні методи підвищення ефективності його використання наближаються до своїх теоретичних обмежень. Як наслідок, актуальним завданням є інтеграція різних технологій радіодоступу в більш складну гетерогенну мережу зв'язку, а також розроблення методів ефективного використання радіоресурсів, які доступні в різних частотних діапазонах та асоційовані з різними технологіями радіодоступу. Зокрема, очікується, що істотний приріст ємності можна отримати за рахунок побудови гетерогенної архітектури мережі, яка могла б об'єднати ліцензований і неліцензований радіочастотний ресурс, а саме останні наукові дослідження вказують на те, що взаємодія систем LTE і Wi-Fi дасть змогу ефективно використовувати позитивні аспекти функціонування обох технологій, а їх інтеграція стане ще тіснішою в рамках побудови мереж зв'язку 5G аж до повсюдного застосування суміщених LTE/Wi-Fi модулів.

Дослідженням завдань побудови та підвищення ефективності сучасних мереж мобільного зв'язку активно розглядалися такими провідними українськими та зарубіжними вченими як А.І. Семенко, К. С. Сундучков, В.М.

Безрук, Л. С. Глоба, Р.С. Одарченко, Ю. Ю. Коляденко, М. Jo, Н. Hwa-Chen, X. Ge, С. Cho, М. Dohler, О. Sallent, N. Malouch та багатьма іншими. Серед іноземних дослідників слід відзначити роботи М. Jo, Н. Hwa-Chen у яких розглянуто правила, принципи і типові сценарії впровадження LTE-U (LTE-Unlicensed) на основі 5 ГГц діапазону. Зокрема, встановлено, що найбільш критичною проблемою LTE-U є співіснування з іншими неліцензованими системами, такими як Wi-Fi. У роботах N. Malouch, G. Bianchi, розглядаються аналітичні моделі з використанням різних підходів випадкового доступу для розрахунку ймовірності колізій, які виникають у мережах Wi-Fi, та їх впливу на пропускну здатність.

Незважаючи на велику кількість різноманітних рішень для підвищення ефективності мереж мобільного зв'язку, невирішеними досі залишаються завдання адаптивного формування структури рівня радіодоступу в умовах наявності великої кількості абонентських пристроїв та координованого використання неліцензійного діапазону Wi-Fi для підвищення спектральної ефективності.

Таким чином, зростання обсягів мобільного трафіку, спонукають до розв'язання науково-практичного завдання підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi шляхом розроблення методів адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону, планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу, а також удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу в умовах передавання відеопотоків реального часу.

**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», (2017–2018 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», (2018–2019 рр.), № держреєстрації 0117U007177.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi шляхом розроблення методу адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу з координацією міжкоміркової інтерференції в умовах зміни локалізації абонентського навантаження, також алгоритму обслуговування черг каналного рівня в мережі Wi-Fi для передавання даних у каналах з короткочасними втратами зв'язку.

Досягнення поставленої мети здійснюється розв'язанням таких завдань:

1. Аналіз існуючих методів розвитку мереж мобільного зв'язку LTE/LTE-U.
2. Удосконалення методу адаптивного управління доступом до неліцензійного радіоканалу в умовах спільного співіснування систем Wi-Fi та LTE-U.
3. Удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для передавання даних, із забезпеченням необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку.
4. Розроблення методу адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi.
5. Розроблення алгоритму моніторингу та аналізу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі для підвищення енергоефективності мережі.
6. Розроблення імітаційної моделі гетерогенної мережі з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу LTE/Wi-Fi.
7. Практична реалізація та оцінювання ефективності запропонованих рішень в умовах розгортання мереж LTE/Wi-Fi.

*Об'єкт дослідження* – процес функціонування інтегрованих LTE/Wi-Fi мереж з адаптивним використанням радіочастотних ресурсів.

*Предмет дослідження* – методи та алгоритми адаптивного управління ресурсами в безпроводних LTE/Wi-Fi мережах для забезпечення необхідної якості обслуговування.

*Методи дослідження.* У роботі знайшли своє застосування теорія систем та мереж масового обслуговування, аналітичні, імітаційні методи дослідження, а також методи натурного експерименту.

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

1. Вперше запропоновано *метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi*, який на відміну від відомих, використовує діаграми Вороного для адаптивної зміни структури мережі радіодоступу та розподілу загальної смуги частот між центральною і граничною зоною комірки LTE в залежності від локалізації абонентського навантаження, що дало змогу уникнути міжкоміркової інтерференції, підвищити якість обслуговування та енергоефективність мережі.

2. Удосконалено *метод адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону в умовах одночасного функціонування систем Wi-Fi та LTE-U*, який на відміну від відомих, базуючись на вимогах QoS користувачів централізовано приймає обґрунтовані рішення щодо частки використання радіоресурсів оператором мобільного зв'язку LTE, що дало змогу підвищити ефективність використання ресурсів та швидкість передавання даних в гетерогенних мережах LTE з уникненням міжсистемної інтерференції.

3. Набула подальшого розвитку *імітаційна модель гетерогенної мережі з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу LTE/Wi-Fi*, яка на відміну від відомих, враховує стохастичну геометрію розміщення вузлів мережі спільно з особливостями обслуговування потоків трафіку користувачів в часі, що дало змогу визначити ефективність запропонованих рішень, отримати сценарії поведінки та обслуговування абонентів близькі до реальних.

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

1. Комплексне використання модифікованого методу повторного розподілення частот між комірками LTE в умовах адаптивного формування структури радіодоступу та неліцензійного діапазону частот, дало змогу

підвищити на 25 % швидкість передавання даних для абонентів інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі з уникненням міжкоміркової інтерференції.

2. Запропоновано алгоритм моніторингу та аналізу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі, який дає змогу підвищити енергоефективність мережі на 30-42% при зменшенні середньої пропускної здатності мережі на 1% - 4%.

3. Реалізовано метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі, що дало змогу підвищити якість обслуговування за критерієм пропускної здатності точки доступу на 36% в умовах пікових навантажень на окремі групи комірок шляхом ефективного управління ресурсами мережі взаємності від фактичного сценарію функціонування та вимог окремих користувачів.

4. Розроблено імітаційну модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ "Львівська політехніка" в середовищі Ornet Modeler, яка дає змогу вибрати оптимальні рішення, щодо вибору алгоритмів обслуговування черг на мережевих пристроях для забезпечення необхідного рівня QoS.

5. Запропоновано алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу при передаванні декількох відеопотоків реального часу, що дало змогу в інтегрованій LTE/Wi-Fi мережі покращити якість надання відео послуг від 5% до 45% оціненої за критерієм MSE.

Основні результати дисертаційної роботи використано і впроваджено для підвищення енергоефективності, якості обслуговування та гнучкості управління ресурсами в телекомунікаційних мережах ТзОВ ВТФ "Контек", ТзОВ "Телекомунікаційна компанія", що підтверджено актами впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Усі результати наукових, теоретичних і практичних досліджень, викладені в дисертації, автор одержав особисто. У працях, опублікованих у співавторстві, дисертантові належать: у роботі [1] – розроблення методу адаптивного управління мережними ресурсами в телекомунікаційних мережах, [2, 4] – розроблення та дослідження імітаційної

моделі гетерогенної мережі з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу, [3] – метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi, [5-6] – алгоритми підвищення якості обслуговування в мережах LTE/Wi-Fi, [7, 15] – розроблення баз даних для інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі, [8-10] – метод адаптивного управління ресурсами в гетерогенних мережах стандарту LTE, [11] – алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу, [12] – алгоритм моніторингу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі для підвищення енергоефективності та якості обслуговування, [13 - 14] – імітаційна модель корпоративної мережі для оцінки QoS.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень доповідалися та обговорювалися на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: Міжнародних науково-технічних конференціях «Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії» (м. Львів-Славське 2012, 2018 рр.); 5-й Міжнародній науково-практичній конференції «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах» (2014 р., м. Чернівці); Міжнародних науково-технічних конференціях «Досвід розробки та застосування приладо-технологічних САПР в мікроелектроніці» (м. Львів-Поляна, 2015, 2019 рр.); IEEE Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (м. Львів, 2019 р.); International IEEE Conferences on Advanced Information and Communication Technologies-2015, 2019 (м. Львів, 2015, 2019 рр.). Також результати роботи у повному обсязі обговорені на засіданнях та семінарах кафедри телекомунікацій.

**Публікації.** За результатами досліджень, які викладені у дисертаційній роботі, опубліковано 15 наукових праць, серед них 1 стаття в іноземному науковому періодичному виданні за напрямом дисертації [1], 5 статей у наукових фахових виданнях згідно з переліком МОН України [2–6] та 9 публікацій у збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій [7–15].

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та 3 додатків. Загальний обсяг роботи становить 195 сторінок друкарського тексту, із них 7 сторінок вступу, 133 сторінки основного тексту, 76 рисунків, 5 таблиць, список використаних джерел зі 200 найменувань.

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

## 1.1. Сучасні тенденції розвитку гетерогенних мереж мобільного зв'язку

Із розвитком концепції «Інтернет речей» та впровадження нових послуг різко зростає кількість пристроїв, що підключені до мережі мобільного зв'язку. Прогнозовано, що до 2030 року кількість пристроїв, що підключені до мобільної мережі, сягне 15 мільярдів (рис.1.1) [16].

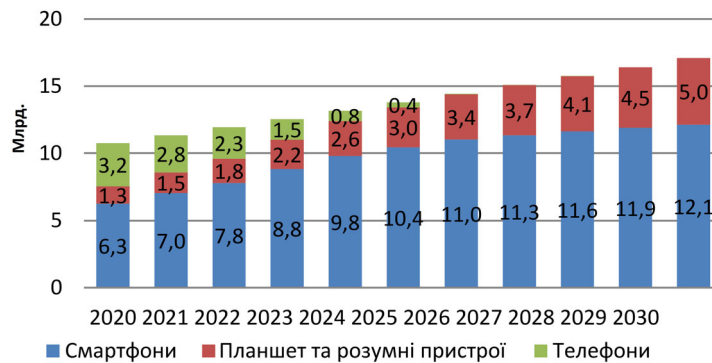


Рис. 1.1 Прогноз зростання кількості пристроїв підключених до мобільних мереж

Разом із зростанням кількості абонентів зростає кількість послуг, якими користуються абоненти. Абоненти вже зараз мають широкий спектр послуг, таких, як відеодзвінки, перегляд відео онлайн, онлайн ігри та інші. Також постійно з'являються нові послуги. До 2030 такі послуги як цифрове телебачення та онлайн відео будуть найбільш популярними серед користувачів (рис.1.2).

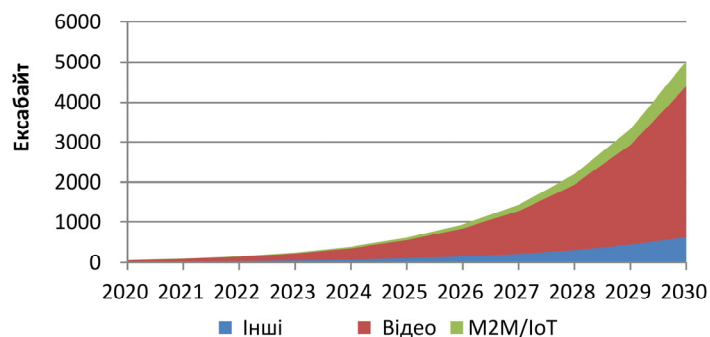


Рис. 1.2 Оцінка мобільного трафіку по різних видам послуг

За рахунок стрімкого зростання попиту на послуги передавання відео, починаючи від 2020 до 2023 р., вони займатимуть 80% світового мобільного трафіку. Всі ці послуги потребують високої швидкості передавання інформації і в сукупності створюють велике навантаження на мобільні мережі.

Такі тенденції розвитку послуг мобільного зв'язку диктують вимоги до мереж мобільного зв'язку. У праці консорціуму «Scenarios, requirements and KPIs for 5G mobile and wireless system»[17], описані ключові показники ефективності (KPI) роботи мереж 5G при різних сценаріях. Деякі із них подані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Вимоги до мобільних мереж нового покоління 4G/5G залежно від сценаріїв роботи мережі

Сценарій	KPI	Вимоги до мережі
Віртуальний офіс	Об'єм трафіку для абонента	36 Тбайт / місяць
	Середня пропускна здатність абонента в ГНН	500 Мбіт/с
	Об'єм трафіку на одиницю площі	100 Мбіт/с/м <sup>2</sup>
	Пропускна здатність абонента	1 Гбіт/с протягом 95% часу
Густонаселені ділянки міста	Об'єм трафіку для абонента	500 Гбайт / місяць
	Середня пропускна здатність абонента в ГНН	5(1) Мбіт/с в DL(UL)
	Об'єм трафіку на одиницю площі	700 Гбіт/с/км <sup>2</sup>
	Пропускна здатність абонента	300(60) Мбіт/с в DL(UL) з протягом 95% часу
Стадіон під час спортивних заходів	Об'єм трафіку для абонента	9 Гбайт / годину
	Середня пропускна здатність абонента в ГНН	0,3 - 3 Мбіт/с
	Об'єм трафіку на одиницю площі	0.1 -10 Мбіт/с/м <sup>2</sup>
	Пропускна здатність абонента	0,3 – 20 Мбіт/с

Це зумовлює пошук нових технологічних рішень, що дозволять покращити існуючу мережу і забезпечити її працездатність із новими вимогами до трафіку. До таких рішень можна віднести такі технології: як Massive MIMO

(використання кількох антен для передачі і прийому), перехід в більш високочастотні діапазони, мультитехнологічність, тощо [18-21]. Проте кожна з цих технологій має свої переваги і недоліки, що вимагають специфічних рішень для впровадження цих технологій.

Розвиток мобільного зв'язку в Україні в епоху 4G вимагає принципових змін в мережевій інфраструктурі, побудованій на основі технології LTE, а також в архітектурі самих абонентських терміналів в умовах нестачі ліцензійних ресурсів [22-25]. Вважається, що найбільш доцільним методом подолання дефіциту радіоресурсів у мережах 4G, у порівнянні з мережами попередніх поколінь, стає розміщення малих комірок з більш високою щільністю покриття [26-27]. Завдяки відносно коротким каналам радіозв'язку використання малих комірок дає змогу досягти підвищених швидкостей передавання даних, а також знизити енергетичні витрати, особливо в умовах міської забудови [28].

Однак розміщення базових станцій з більш високою щільністю для збільшення ємності мережі неминує веде до зростання складності управління інтерференцією, збільшення вартості розгортання мережі та додаткових витрат на підтримку її працездатності [29-32]. При цьому на сьогоднішній день ліцензований радіоспектр є досить обмеженим і тому дорогим ресурсом, а традиційні методи підвищення ефективності його використання наближаються до своїх теоретичних меж. Навіть при виділенні додаткового радіоспектра для послуг мобільного зв'язку відповідні радіочастоти, залишаються сильно фрагментованими і будуть вимагати застосування різних технологій радіодоступу RAT [33]. Таким чином, виникає гостра необхідність у координуванні різномірних технологій радіодоступу з метою підвищення ємності мережі зв'язку [34-35].

Інтегровані мережі мобільного зв'язку – це система побудована на основі архітектури, яка включає в себе ієрархічну структуру комірок різного розміру, що використовують різномірні технології радіодоступу. У таких системах абонентські термінали у процесі передавання своїх даних у мережеву інфраструктуру мають можливість використовувати декілька радіотехнологій



одночасно [36-37]. Зі збільшенням числа таких терміналів на ринку оператори мобільного зв'язку стають більш зацікавлені в ефективному використанні радіоресурсів декількох мереж доступу для збільшення ємності інтегрованої системи зв'язку і підвищення якості з'єднання користувача [38-41]. Таким чином, взаємодія між різними технологіями радіодоступу і можливість їхнього ефективного управління стають основними особливостями мереж 4G побудованих на основі технології LTE, дослідженню яких і присвячений даний розділ.

На сьогодні, у міру зменшення зон покриття базових станцій, ефективні області обслуговування стільникових, локальних і персональних мереж доступу починають, у значною мірою, перекриватися [43-44]. Це створює передумови до одночасного використання декількох технологій радіодоступу для поліпшення якості зв'язку. Передбачається, що таке інтелектуальне використання декількох радіотехнологій дозволить досягти підвищеної ефективності щодо певних показників, які включають в себе просторове, часове і частотне рознесення, координування інтерференції, завантаженість мережі і т.д. [45]. У перспективних мережах четвертого покоління радіотехнології ближнього і дальнього радіусу дії можуть бути використані спільно у процесі тісної взаємодії між абонентським терміналом і мережею зв'язку, а також безпосередньо між самими терміналами для досягнення більш високої якості обслуговування абонентів [46].

Як наслідок, зростає необхідність у координуванні спільної роботи різних технологій радіодоступу і очікується, що використання декількох радіотехнологій у сукупності з відповідними засобами координування на стороні абонентських терміналів і мережевої інфраструктури стануть невід'ємною характеристикою систем зв'язку нового покоління [47-49]. Зокрема, розподілена локальна мережа в неліцензованих діапазонах частот WLAN може отримувати сприяння з боку централізованої функції управління, яка розміщена на стороні стільникової системи зв'язку [50-52]. Це дозволяє проводити ефективне встановлення призначеного для користувача з'єднання з

мережею за наявності альтернативних технологій радіодоступу і, таким чином, підвищувати продуктивність системи, а також покращувати надійність з'єднань.

Крім того, враховується важлива практична тенденція до ущільнення мереж доступу, пов'язана з необхідністю передавання дедалі більших обсягів даних від мобільних абонентів. На відміну від традиційного вивантаження трафіку користувачів з стільникової системи зв'язку в локальну мережу доступу, яка активно застосовувалася в гетерогенних мережах попередніх поколінь, у тісно інтегрованих системах 4G можливо поєднання функціоналу радіотехнологій LTE і Wi-Fi в рамках єдиного модуля доступу. Робота таких об'єднаних систем, особливо для надщільних покриттів малими комірками LTE/Wi-Fi, що дають змогу абонентському терміналу вести передавання даних за кількома технологіями радіодоступу одночасно, пов'язана зі специфічною просторово-часовою динамікою[53-54].

Відповідно до викладеного вище в даний час спостерігається тенденція до більш тісної взаємодії різнорідних технологій радіодоступу. У зв'язку з цим у даній роботі розглядається завдання вибору кращої технології радіодоступу та планування радіоресурсів в інтегрованій мережі зв'язку, а також виявлення відповідного приросту продуктивності. Подальші твердження зосереджено на об'єднанні зусиль різних сторін технологій радіодоступу в рамках інтегрованої системи зв'язку. Як приклад розглядається взаємодія точок доступу локальної мережі WLAN з малими комірками мобільного оператора LTE в контексті організації відповідної архітектури системи зв'язку і з'ясування переваг різних форм інтеграції. Мета даного дослідження полягає в аналізі показників ефективності, таких як ємність системи зв'язку обслуговування.

Слід зазначити, що взаємодія локальних і стільникових систем доступу неодноразово розглядалося в дослідницькій літературі, але в основному з позицій перемикання між ними, так званого вертикального, хендоверу [55-58]. Комітет зі стандартизації мобільних систем зв'язку 3GPP протягом декількох років був значною мірою залучений до розробки специфікацій, спрямованих на забезпечення ефективної спільної роботи стільникових і локальних мереж. Створення таких специфікацій проводилося в рамках декількох напрямків

роботи, які мали на меті більш тісну інтеграцію між двома типами систем. Вони включають в себе вирішення для довіреного доступу пристроїв WLAN до послуг 3GPP, організацію безшовної мобільності між технологіями 3GPP і WLAN, а також розробку функціоналу для виявлення і вибору мережі доступу ANDSF. У той час, як більш ранні підходи дозволяли забезпечувати нещільну взаємодію 3GPP і WLAN на рівні опорної мережі (ядра мережі), починаючи з 3GPP Release 12 велася робота з організації більш тісної взаємодії на рівні мережі радіодоступу RAN [14].

Ця діяльність пов'язана з необхідністю підвищення якості обслуговування в неліцензованому діапазоні частот відповідно до вимог мобільних операторів, які прагнуть таким чином збільшити надійність з'єднань Wi-Fi. У свою чергу, комітет зі стандартизації локальних мереж WLAN розгорнув роботу із створення специфікацій HotSpot 2.0, а також ініціював новий напрямок із розробки систем WLAN підвищеної ефективності в рамках робочої групи IEEE 802.11. Таким чином, актуальним є дослідження рішень з інтеграції 3GPP і WLAN на рівні RAN, що дозволяють досягти більш оперативного координування між радіотехнологіями стільникових і локальних мереж доступу. Нижче описуються існуючі можливості забезпечення такої взаємодії і відповідні інтелектуальні алгоритми, а також досліджується їх вплив на показники якості зв'язку абонента і характеристики роботи системи в цілому.

## **1.2 Огляд існуючих підходів щодо інтеграції технологій LTE та Wi-Fi**

Як було сказано вище, обмеження по ємності і якості з'єднання в мобільних мережах у порівнянні з вимогами 4G обумовлюють необхідність більш тісної інтеграції стільникових і локальних мереж доступу. Історично тенденція до інтеграції стільникових і локальних систем WLAN виникла у зв'язку з потребою мобільних операторів в нарощуванні ємності мережі доступу та запобігання її перевантажень. Однак очікується, що використання технології Wi-Fi для розвантаження стільникових з'єднань залишиться частиною довгострокової стратегії розвитку стільникових операторів. У найпростішому випадку мережі 3GPP і WLAN можуть не мати можливості прямого

координування, і тоді абонентські термінали змушені будуть приймати локальні рішення про кращу технологію радіодоступу [59]. Якщо ж система Wi-Fi є керованою в рамках інтегрованої мережі радіодоступу мобільного оператора, з'являються додаткові можливості для більш тісної взаємодії технологій 3GPP і WLAN.

Наприклад, виникає нова мережева архітектура, у якій використання суміщених малих комірок LTE/Wi-Fi дозволить досягти більш тісної взаємодії між відповідними технологіями радіодоступу [60], по суті об'єднуючи систему WLAN як «віртуальну несучу» мережі 3GPP [61]. На сьогодні суміщені малі комірки LTE/Wi-Fi є однією з передових інновацій в телекомунікаційній індустрії, що дає змогу знизити витрати на розгортання системи зв'язку за рахунок використання гібридної мережевої інфраструктури. Однак з огляду на те, що такий варіант розміщення комірок ще мало поширений на практиці, поточні роботи по стандартизації спрямовані також на поліпшення мережевої архітектури, у якій абонентські термінали приймають локальні рішення в умовах обмеженого сприяння з боку мережевої інфраструктури або ж за його відсутності.

Подальший виклад зосереджено на розгляді різних варіантів інтеграції мереж LTE і Wi-Fi як показано на рисунку 1.3. Дані опції відрізняються, перш за все, специфічними механізмами забезпечення взаємодії технологій радіодоступу, що включають в себе виявлення радіотехнології, її вибір або призначення, управління радіоресурсами RRM, забезпечення мобільності та перенаправлення потоку даних між технологіями радіодоступу і т.д.

**Інтеграція на прикладному рівні.** На рис. 1.3 варіант А відповідає архітектурі гетерогенної мережі, яка має на увазі інтеграцію на прикладному рівні. Відповідно, передбачається наявність спеціалізованого інтерфейсу верхнього рівня, який дає змогу абонентському терміналу взаємодіяти безпосередньо з постачальником послуги, обмінюючись інформацією за різними технологіями радіодоступу. Оскільки така опція не передбачає координування на мережевому рівні, вона є досить простою в реалізації і вже в значній мірі була досліджена в контексті поліпшення роботи окремих додатків

верхнього рівня [62]. Даний варіант архітектури найкраще підходить для оперативного підвищення якості сприйняття послуги користувачем, але залишається істотно залежним від способу його реалізації в конкретному додатку. Він також може не повною мірою враховувати поточні умови роботи мережі зв'язку, особливо у випадках, коли такі умови змінюються динамічно.

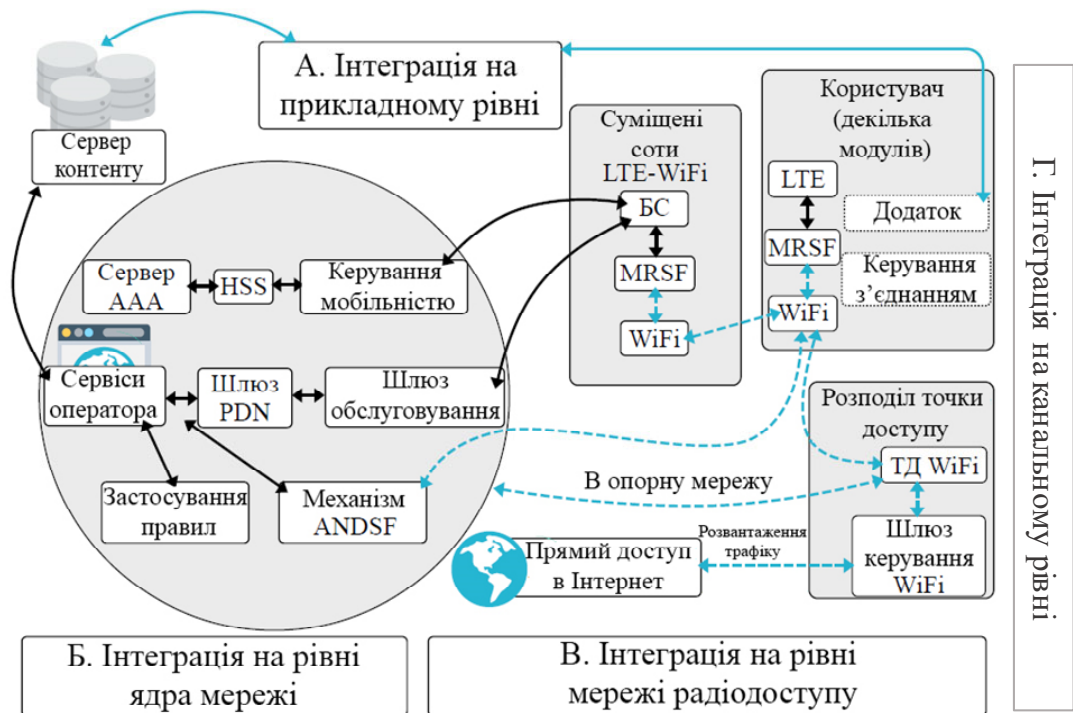


Рис. 1.3 Архітектура гетерогенної мережі зв'язку

**Інтеграція на рівні ядра мережі.** Варіант Б відповідає недавнім напрацювань в комітеті 3GPP, що полегшує інтеграцію стільникових і WLAN систем за допомогою взаємодії на рівні опорної мережі. Відповідно, механізм виявлення і вибору мережі доступу ANDSF забезпечує виявлення відповідних точок доступу Wi-Fi, а також може задавати рекомендації по вибору мережі. Однак остаточне рішення про використання тієї чи іншої технології радіодоступу приймається безпосередньо абонентським терміналом. Тим самим UE при прийнятті свого рішення має можливість врахувати поточний стан каналу радіозв'язку, налаштування мобільного оператора і переваги користувача, що часто дозволяє досягти більш високої якості обслуговування.

Даний варіант архітектури мережі має ряд переваг, оскільки може взяти до уваги як налаштування оператора, так і переваги користувача. Однак

ефективність роботи відповідних функцій управління системою як і раніше залишається досить обмеженою [63-64]. Це відбувається з тієї причини, що абонентські термінали мають часткову інформацію поточних умов функціонування мережі зв'язку і, таким чином, можуть прийняти лише локально оптимальні рішення, які часто призводять до неефективної роботи системи в цілому [65-67].

Отже, коли стан каналу змінюється динамічно, управління радіоресурсами на рівні мережі радіодоступу RAN дозволить досягнути подальшого збільшення якості обслуговування. Саме тому більш сучасна архітектура, що дозволяє інтегрувати технології радіодоступу на нижньому рівні RAN, представляє все зростаючий інтерес, оскільки має можливість врахувати інформацію про стан каналів радіозв'язку в рамках гетерогенної мережі в цілому [68].

**Інтеграція на рівні мережі радіодоступу.** Варіант В описує передову архітектуру гетерогенної системи зв'язку, яка інтегрує технології 3GPP і WLAN на рівні мережі радіодоступу RAN [69]. Дана опція передбачає, що сприяння з боку абонентського терміналу дозволяє спростити обмін інформацією між стільниковою та локальною мережею доступу, що може потребувати створення відповідних керуючих інтерфейсів. Доступні в цьому випадку можливості із взаємодії на рівні RAN обмежені ємністю транзитних (backhaul) каналів між різними комірками і технологіями радіодоступу [70]. У тому випадку, коли доступні транзитні канали високої ємності або ж при поєднанні функціоналу LTE і Wi-Fi в рамках єдиного пристрою доступу, може бути досягнуто більш оперативне координування. Це, в свою чергу, дозволяє поліпшити динамічне управління радіоресурсами і, як наслідок, підвищити як ємність системи зв'язку, так і якість з'єднання абонента.

Крім того, залучення стільникової інфраструктури дозволяє поліпшити управління мобільністю і трафіком абонентського терміналу. Відповідно, UE може використовувати протоколи 3GPP для контролю з'єднання при підключенні до малих комірок LTE або ж до суміщених LTE/Wi-Fi модулів, а далі застосовувати локальне перемикання для доступу за технологією WLAN і,

тим самим, знижувати затримку передавання. Перевагою такого підходу є більш гнучка адаптація до динамічних змін радіоканалу і інтерференції в ньому і, як наслідок, зниження ймовірності втрати пакета і розриву з'єднання [71]. Важливо відзначити, що налаштування мобільного оператора і переваги користувача можуть бути враховані через зворотний зв'язок з боку абонентського терміналу або ж за допомогою певним чином налаштованої апаратури RAN.

У підсумку можливості координування на рівні RAN можуть варіюватися від використання найпростішої допоміжної інформації (наприклад, завантаження мережі радіодоступу) до реалізації тісної інтеграції з подальшим спільним або централізованим управлінням радіо ресурсами [72]. Далі проводиться аналіз взаємодії стільникових і локальних мереж доступу для різних варіантів архітектури мережі і способів її розміщення, а потім описуються деякі алгоритми управління інформаційними потоками. Особлива увага приділяється практичним питанням, таким як наявність тільки лише часткової допоміжної інформації, яка доступна абонентському терміналу в гетерогенній мережі, що є поширеною ситуацією в умовах обмежень на ємність керуючих з'єднань і обчислювальний ресурс пристроїв.

**Інтеграція на каналному рівні.** В останні кілька років у світі заговорили про доцільність використання неліцензійного радіочастотного спектру для швидко розвиваючої технології LTE (варіант Г) [73]. Доступ до такого спектру вільний (неліцензійний), в ньому працюють різні пристрої малого радіусу дії SRD (Short Range Device), у тому числі і пристрої передавання даних, відомі під назвою Wi-Fi [74]. Треба зауважити, що через особливості його використання не потрібна ліцензія, а в Україні не потрібні відповідні дозволи на радіочастоти. Намір у неліцензійному спектрі викликано, насамперед, необхідністю отримати для мереж LTE додатковий радіочастотний ресурс [75]. Для його реалізації сьогодні розглядаються декілька рішень. Два з них - LAA-LTE (Licensed-Assisted-Access-LTE) і LTE-U (LTE-Unlicensed) - припускають приєднання Wi-Fi-спектра в діапазоні 5 ГГц шляхом його агрегування з основним (ліцензійним) спектром LTE [76-77]. У зв'язку з цим

механізм доступу до каналу в LTE-LAA повинен враховувати, що середовище може виявитися зайнятим іншим пристроєм [78]. Більш того, у деяких країнах існують законодавчі обмеження на використання діапазону 5 ГГц, що вимагають обов'язкове застосування методу CSMA / CA (англ. Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance) [79-80]. У LTE-LAA цей метод реалізований у вигляді механізму LBT (англ. Listen Before Talk) [81]. При використанні LBT базова станція LTE-LAA (eNodeB, eNB) перед передачею повинна виконати процедуру відстрочки. У зв'язку з протокольними обмеженнями eNB може почати передачу тільки в межах часового слоту ліцензованої смуги, тобто в моменти часу, що йдуть з періодом  $T = 0.5$  мс. Однак специфікація не дає однозначних вказівок, що робити базовій станції після завершення процедури відстрочки, але до початку найближчого слота. Якщо нічого не робити, то до цього моменту середовище може зайняти передача Wi-Fi, і продуктивність мережі LTE-LAA може сильно впасти при великій кількості станцій Wi-Fi, які працюють поруч.

LTE-LAA задовольняє локальним законодавчим рішенням більшості країн, тому підходить для міжнародного впровадження в мережах LTE. Крім того, однією з поставлених при розробці LTE-LAA цілей було забезпечення справедливого співіснування з пристроями Wi-Fi. Варто зазначити, що до появи LTE-LAA організацією LTE-U Forum, що складається з провідних телекомунікаційних компаній, велася розробка альтернативного рішення на базі LTE для роботи в неліцензованому діапазоні 5 ГГц, яке отримало назву LTE-U (англ. LTE-Unlicensed) [82]. На відміну від LTE-LAA, LTE-U не може використовуватися в деяких країнах (ЄС, Японія та ін.). Через порушення законодавчих обмежень, зокрема, відсутність механізму прослуховування каналу перед передачею. Однак, в деяких країнах, у яких законодавчі обмеження слабкіше, наприклад, в США, LTE-U може використовуватися. Так як LTE-U спочатку розроблявся швидше як рішення, що показує принципову можливість використання діапазону 5 ГГц мережами LTE, після завершення стандартизації LTE-LAA компанії, що входять в LTE-U Forum, перестали розвивати LTE-U. LTE-U це рішення є ідентичним описаному вище LAA-LTE з



тією лише різницею, що не вимагає застосування механізму LBT [83-90]. Механізмом, який використовується в LTE-U для зниження конфліктних ситуацій, є процедура, що встановлює робочий цикл (Duty Cycle) для переривчастої передачі. Duty Cycle дорівнює відсотку часу роботи пристрою на передачу, виміряного протягом фіксованого тимчасового фрейма, як показано на рис. 1.4 .

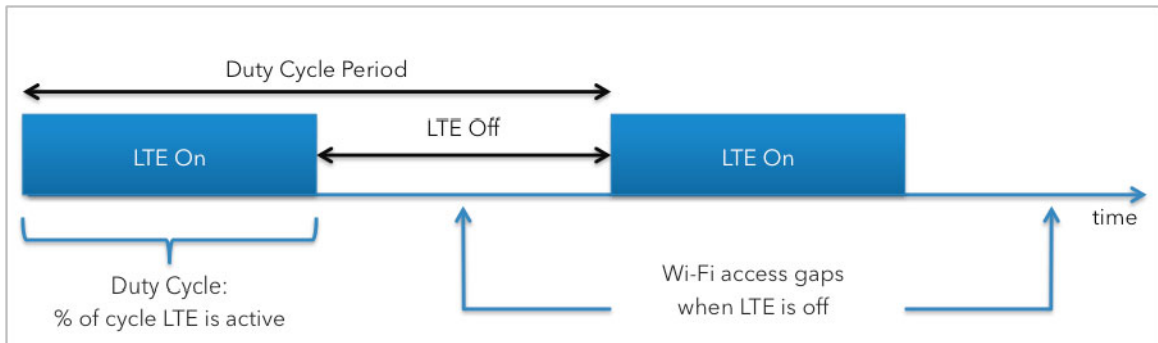


Рис. 1.4 Взаємодія LTE і Wi-Fi на MWC2014, яку показувала компанія КТ, Південна Корея

При гіперщільному розгортанні Wi-Fi і LTE-U, існує ймовірність того, що жоден вільний канал не може бути знайдений. У таких випадках, LTE-U можуть спільно використовувати канал з сусіднім Wi-Fi або іншою системою LTE-U з використанням алгоритму CSAT [91]. Типові методи суміщення каналу співіснування в неліцензованих смугах частот, таких як правила LBT і CSMA (Carrier Sense Multiple Access), використовується на Wi-Fi заснований по концепції доступу на основі конкуренції. У цих методах, передавач прослуховує середовище передавання і переконується, що канал вільний для передачі. Метою цих алгоритмів є забезпечення співіснування між різними технологіями в рамці TDM. LTE Advanced в неліцензійному спектрі використовує третій механізм (CSAT), який знаходиться в лінії з тією ж концепцією співіснування TDM на основі зондування середовища. У CSAT, комірka прослуховує середовище для більшої ніж LBT і CSMA тривалості та відповідно до стану середовища, алгоритм пропорційно закриває передачу LTE [92]. Зокрема, CSAT визначає час циклу, де комірka передає дані в частині циклу і закривається на час, що залишився. Робочий цикл передачі проти

закривання керується прослуховуванням середовища на активність інших технологій. CSAT подібна до CSMA за винятком того, що вона має більш тривалі затримки, які полегшуються униканням каналів, які точки доступу Wi-Fi використовують для виявлення сигналів і трафіку QoS (тобто первинні канали) [93]. CSAT забезпечує чесний і ефективний поділ каналу, з впливом БС LTE-U на сусідні точки доступу Wi-Fi не гірше, ніж сусідні точки доступу Wi-Fi. LTE-U, який знаходиться на вторинній комірці, періодично активується і деактивується за допомогою елементів управління LTE MAC. У LTE-U в періоді вимкнення, канал вільний для сусіднього Wi-Fi, який може відновити передачу [94]. Комірка, протягом періоду вимкнення LTE-U, буде вимірювати середовище передачі яке використовується Wi-Fi технологією і адаптивно регулювати цикл вмикання/вимикання по чергово. Відповідно до заяв 3GPP, LTE-LAA допоможе значно збільшити пропускну здатність стільникових мереж. Крім того, LTE-LAA є важливим кроком у розвитку стільникових мереж на шляху до мереж п'ятого покоління (5G), які активно розробляються зараз [95-97]. Планується, що в мережах 5G будуть використовуватися як ліцензовані, так неліцензованому смуги частот, причому не тільки в діапазоні 5 ГГц [98]. Як приклад, на рис. 1.4 показано вперше використання гетерогенної мережі LTE та Wi-Fi у Південній Кореї у 2014 році забезпечило швидкість до 600 Мбіт/с [99].

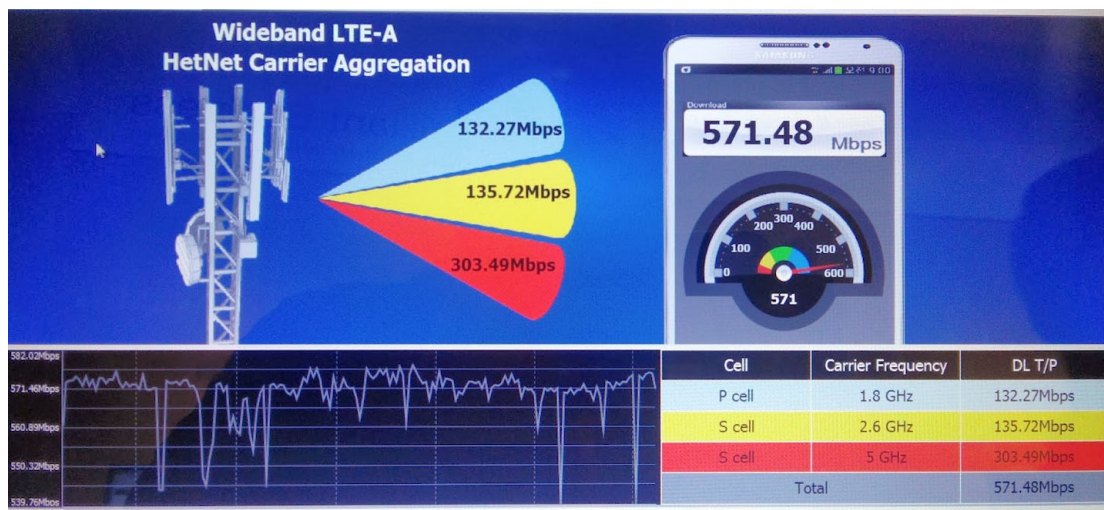


Рис. 1.5 Взаємодія LTE і Wi-Fi на MWC2014, яку показувала компанія КТ, Південна Корея

Таким чином, у роботі розглянуто лише самі основні моменти, на які варто було б звернути увагу при аналізі і проєктуванні систем LTE-U. Однак навіть короткий перелік основних принципів технології дає привід найсерйознішим чином задуматися над реалізацією. І звичайно слід зазначити, що, з часом, збільшення обсягу запитів споживачів, зростання числа абонентів, потреба в більш високих швидкостях тільки посилять актуальність використання технологій, із застосуванням нових принципів, нових механізмів, які будуть вирішувати завдання кінцевого споживача.

### **1.3 Розвантаження мобільної мережі LTE за допомогою безпроводної корпоративної мережі (Hotspot 2.0/ Wi-Fi Certified Passpoint)**

Hotspot 2.0 (також відомий як «Next Generation HotSpot» (NGH)) [100]— простіше кажучи, технологічний брандмаузер і підсистема підключення на основі Wi-Fi. Іншими словами, ця технологія мусить підтримувати прямі з'єднання між мобільною мережею та точкою доступу Wi-Fi без додаткової аутентифікації користувача. Рішення NGH пропонує прискорений пошук і вибір мережі Wi-Fi і автоматичне отримання доступу до неї з гарантованою захищеністю.

Слід зазначити, що концепція Hotspot 2.0 - це програма сертифікацій, яка включає технічні специфікації, і в цьому розумінні не є спробою розробити нову технологію, а скоріше забезпечити об'єднання відповідно уже окремих існуючих рішень. Стандарт IEEE 802.11u [101] виступає основою, яка дає клієнту можливість довідатись, які сервіс-провайдери або роумінгові партнери доступні через базову станцію стільникової мережі. Ця прозорість не тільки робить кращу безшовну послідовну передачу, але й допомагає встановити з'єднання. На додаток до IEEE 802.11u, HotSpot 2.0 використовує відому архітектуру Wi-Fi 802.1x / EAP. Ще одне рішення HotSpot 2.0 складається з трьох типів вузлів для сприяння розгортання мережі та надійності: (платформу управління сервісом (Service Management Platform; сервісний портал (Service Portal; контролер доступу (Access Controller). Натомість для збільшення їх рівня застосувати додавання серверів для розвантаження трафіку (рис. 1.6).

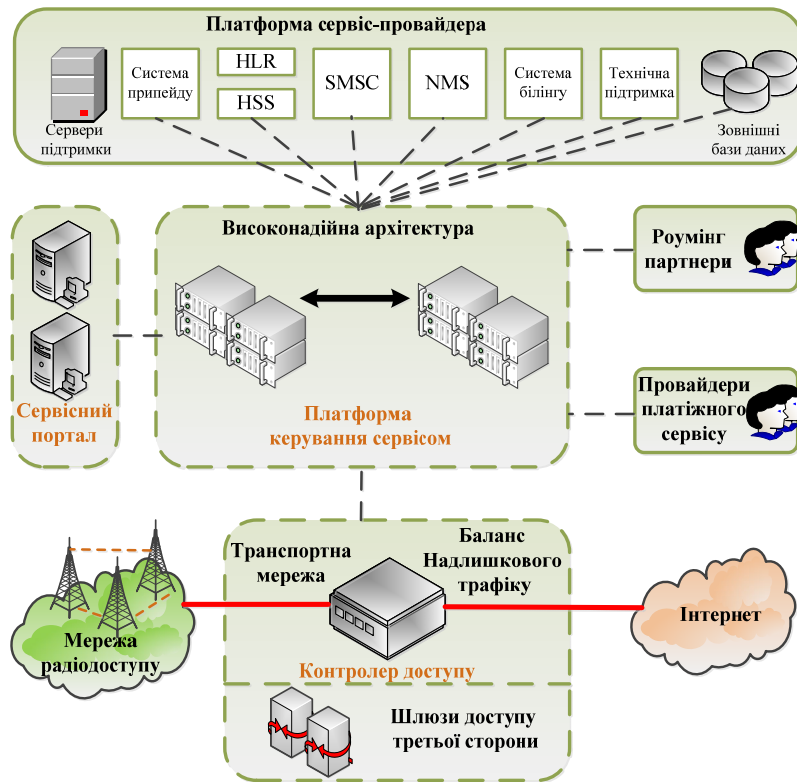


Рис. 1.6 Альтернативне рішення для HotSpot 2.0

З HotSpot 2.0 має бути розглянуто всі завдання і вимоги, які потрібні в успішному бізнесі. На рисунку 1.7 представлено спрощене рішення для ідеальної безшовної аутентифікації користувача мобільного пристрою із SIM-картою, як у стільниковій, так і у Wi-Fi мережах [103]. У такому разі Wi-Fi мережу можна вважати перевіреною і безпечною для операторів. WLAN архітектура повинна бути централізованою для забезпечення гнучкої інтеграції з іншими мережами операторів стільникового зв'язку, доступною в управлінні радіосистемою, масштабованою та мати надійну мережеву безпеку. Крім того, рішення повинно бути високоякісним і надійним, щоб відповідати вимогам оператора. Після цього, детальний аналіз існуючого обладнання свідчить, що CUWN (Cisco Unified Wireless Network) відображає всі вимоги для створення найсучасніших рішень Wi-Fi у цій галузі. Інтеграція Wi-Fi та мобільних мереж - це виклик як для технології, так і для організації [104]. А також цей успіх залежить від переходу до рішення на основі HotSpot 2.0. Існують різні умови для цієї інтеграції, залежно від багатьох факторів, таких як використання надійної мережі Wi-Fi або ненадійну (наприклад, оператор з власною мережею

Wi-Fi, мережа його партнера або будь-чий інший публічний HotSpot); чи буде інтегрована мережа Wi-Fi з використанням існуючої інфраструктури LTE, чи буде трафік даних безпосередньо в Інтернет і т. д.

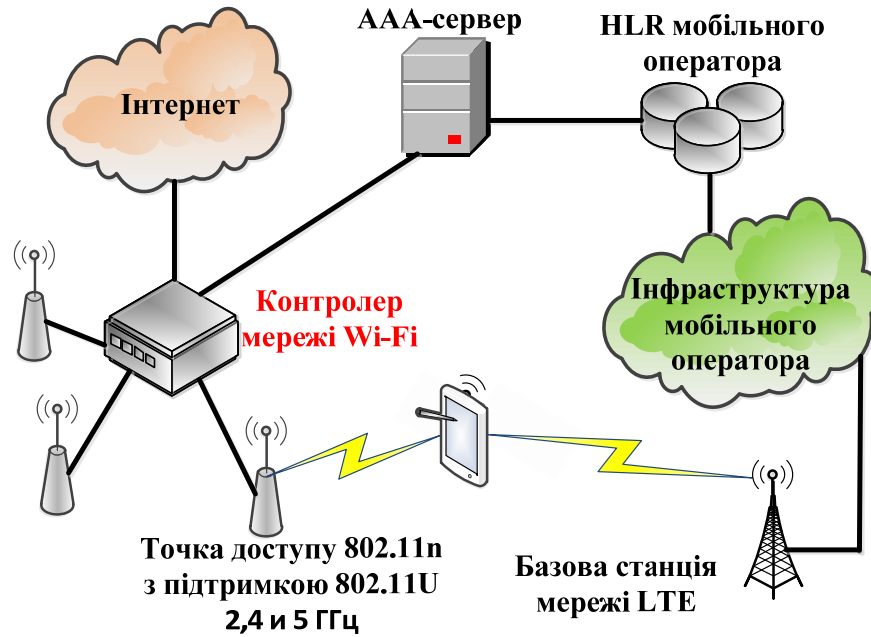


Рис. 1.7 Спрощена концепція інтеграції мереж Wi-Fi з мережею мобільного оператора LTE для реалізації безшовної аутентифікації за SIM-картами в HotSpot 2.0

Рішення Cisco дозволяє найбільш ефективно впроваджувати такі складні сценарії, за винятком операторів, що використовують різні бізнес-моделі. Обладнання компанії Cisco найкраще задовільнить усі потреби.

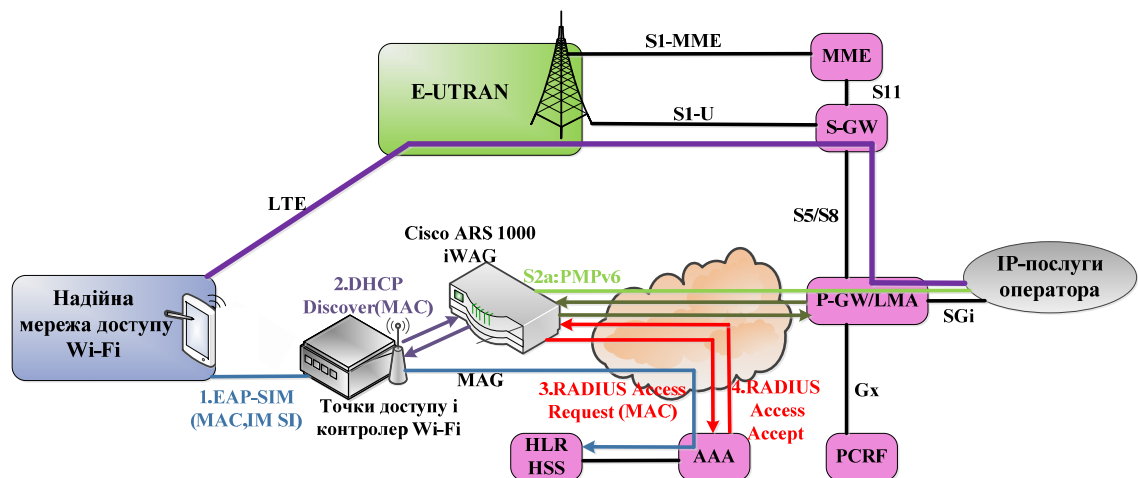


Рис. 1.8 Приклад інтеграції мережі Wi-Fi з пакетною опорною мережею LTE за допомогою iWAG на платформі Cisco ASR 1000

Воно включає усі потрібні вузли та блоки для створення операторської мережі Wi-Fi: точки доступу, їх контролери до шлюзи eWAG та iWAG, які інтегрують довірені мережі Wi-Fi з пакетними опорними мережами 2G/3G і LTE. Щоб відбулась інтеграція Wi-Fi з шлюзом GGSN, потрібна функція iWAG, де буде використано інтерфейс Gn за протоколом GTPv1 або зі шлюзом P-GW через стандартний інтерфейс S2a за протоколом PMIPv6 (рис. 1.8). Використання iWAG [105] дозволяє маршрутизаторам ASR 1000 підтримувати до 32 тис. автентифікованих сеансів. У тому випадку, коли iWAG буде в ролі посередника RADIUS між WLAN і сервером AAA, тоді успішна автентифікація абонента за EAP-SIM дозволить створити тунель між iWAG і GGSN або P-GW. Проте, коли WLAN і сервер AAA взаємодіють один з одним, обходячи iWAG, тоді дозвіл на створення тунелю буде надходити від повідомлення DHCP Discover з боку пристрою з підтримкою Wi-Fi. Ці випадки демонструють, що параметри для утворення тунелю, будуть передаватись на iWAG в атрибутах повідомлення RADIUS Access Accept з боку сервера AAA.

#### **1.4 Аналіз основних невирішених завдань для забезпечення ефективного функціонування інтегрованих мереж мобільного зв'язку LTE/Wi-Fi**

##### **1.4.1 Аналіз існуючих методів уникнення міжкоміркової інтерференції в системах LTE**

Серйозною проблемою даної технології є виникнення міжкоміркової інтерференції, особливо на краях стільників [106]. Зона міжкоміркової інтерференції в LTE показано на рис.1.9

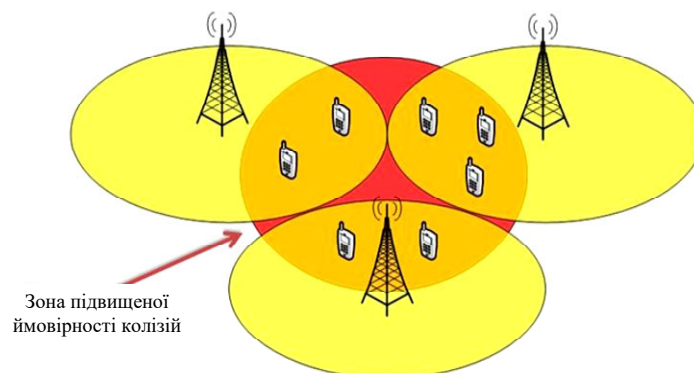


Рис.1.9 Зона міжкоміркової інтерференції в LTE

У системах LTE у всіх комірках використовується одна і та ж смуга частот, якщо дві сусідні БС (eNB) виділяють своїм абонентам під передачу даних ресурсні блоки в одній і тій же смузі частот, в один і той же час, то можна з певною часткою ймовірності стверджувати, що ці абоненти будуть заважати один одному, будуть зазнавати інтерференції [107-110].

На імовірність колізії в даному випадку (ймовірність спотворення пакету через одночасне виділення двома або більше базовими станціями одного і того ж ресурсу користувачам), вочевидь, будуть впливати два чинника: 1) віддаленість абонентів один від одного, інакше - їх близькість до БС (якщо абоненти перебувають близько до БС, то включається механізм управління потужністю (Power Control), який швидше за все змусить телефон знизити рівень переданої потужності, як наслідок, знизиться загальний рівень інтерференції між комірками). 2) навантаження в комірках (теж досить очевидний фактор - чим вище навантаження, тим більша ймовірність одночасного виділення абонентам на краях стільниці одного і того ж ресурсного блоку). Якщо зімітувати роботу такого примітивного планувальника, необізнаного про навантаження на сусідні стільниці тощо, і вивести ймовірність колізії між пакетами в різних комірках (по суті, це непряме відображення рівня міжкомірової інтерференції), то вийде така залежність (рис.1.10).

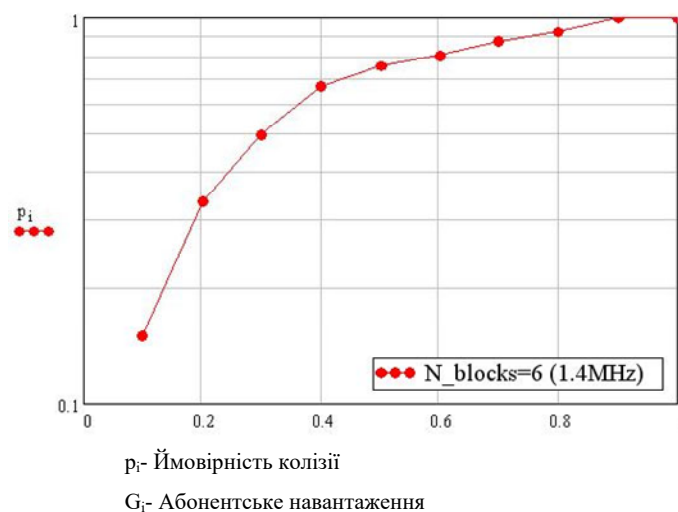


Рис.1.10 Залежність ймовірності виникнення колізії від росту абонентського навантаження в комірці LTE

Основною метою при вирішенні проблеми міжкоміркової інтерференції є поліпшення якості сигналу для абонентів, що знаходяться на краю стільниці, тим самим вирівнювання можливостей абонентів на всій площі стільниці. Існує безліч способів вирішення даної проблеми.

Умовно всі схеми по зниженню міжкоміркової інтерференції в LTE можна розділити на дві групи (рис.1.11): статичні і динамічні. До статичних відносяться FFR (Fractional Frequency Reuse, жорстке дробове повторне використання частотного ресурсу), SFR (Soft Frequency Reuse, М'яке повторне використання частотного ресурсу), PFR (Partial Frequency Reuse, часткове повторне використання частотного ресурсу) [111-114]. До динамічних відносяться схеми e-ICIC [115].



Рис.1.11 Методи зменшення міжканалних завад

Класичний спосіб зниження внутрішньосистемних перешкод описаний в [6] і базується на використанні частотних кластерів – групи прилеглих один до одної комірок, у межах якої повторне використання одних і тих же частот неприпустимо через перевищення порогового рівня взаємних перешкод. Для



LTE коефіцієнт повторного використання частот в комірках стільникового кластера дорівнює одиниці у випадках повного і м'якого повторного використання, і менше одиниці при жорсткому і дробовому повторному використанні смуг частот. Повторюючи цей частотний кластер, можна побудувати мережу LTE, так як піднесучі в системі ортогональні, а, отже, внутрішньокімркову інтерференцію немає необхідності враховувати, а міжкоміркова - знижується за рахунок розподілу потужності між смугами частот, виділених для користувачів в центральній і граничній зоні відповідно.

При м'якому і дробовому повторному використанні частотного ресурсу (Рис.2.9, 2.10) кожна комірка розділена на дві зони - центральна частина і межа комірки - і призначення піднесучих відбувається залежно від знаходження користувача в певній зоні. Коефіцієнт повторного використання частот в центральній зоні дорівнює 1, отже, всі користувачі цієї зони у всіх сусідніх комірках отримують частоти з одного діапазону, а користувачі на межі комірки обслуговуються з коефіцієнтом повторного використання частот рівним 3. Також здійснюється контроль рівня потужності передавання (в центральній зоні використовується менша потужність випромінювання БС. Недоліком є те, що робоча смуга системи недовикористовується.

У статті [117] проводиться порівняння методів SFR і PFR з різними коефіцієнтами повторного використання частот з двома новими методами. Метою дослідження є вибір методу, що підвищує пропускну здатність на кордоні комірок і не погіршує при цьому середню пропускну здатність в секторі. Запропоновані алгоритми працюють на основі розподілу ресурсних блоків для абонентів. Для кожного сектора резервуються «заборонені» ресурсні блоки, які в першому випадку не можуть бути використані в інших секторах, а в другому використовуються лише з 10% рівнем потужності. Складаються цільові матриці відповідності ресурсних блоків і користувачів, розподіл в яких відбувається на основі Венгерського алгоритму. Визначено, що метод з коефіцієнтом повторного використання 3 дає приріст пропускну здатності на кордоні сектора на 168, 4%, але погіршує середню пропускну здатність сектора на 49,2% в порівнянні зі схемою повторного використання частот 1.

Аналогічно, метод PFR покращує пропускну здатність на межі сектора на 149,7% і зменшує середню на 26%. Метод SFR з коефіцієнтами повторного використання частот 2, 2.5, 2.75 збільшують пропускну спроможність на межі сектору на 21,4%, 69,4% і 114,7% з відповідним зменшенням середньої пропускну здатності на 4,3%, 8,6% і 26,1%.

У мережі LTE працює механізм під назвою ICIC (Inter-Cell Interference Coordination - Координація міжкоміркової інтерференції). Сенс цієї технології у тому, що сусідні базові станції передають по X2 інтерфейсу інформацію про свою завантаженість у вигляді Overload Indicator (OI) [117-118]. Таким чином, вони фактично мають можливість домовитися між собою хто з них який піддіапазон (subband) і в який момент часу буде використовувати. Виглядати частотно-територіальний розподіл в цьому випадку буде приблизно так:

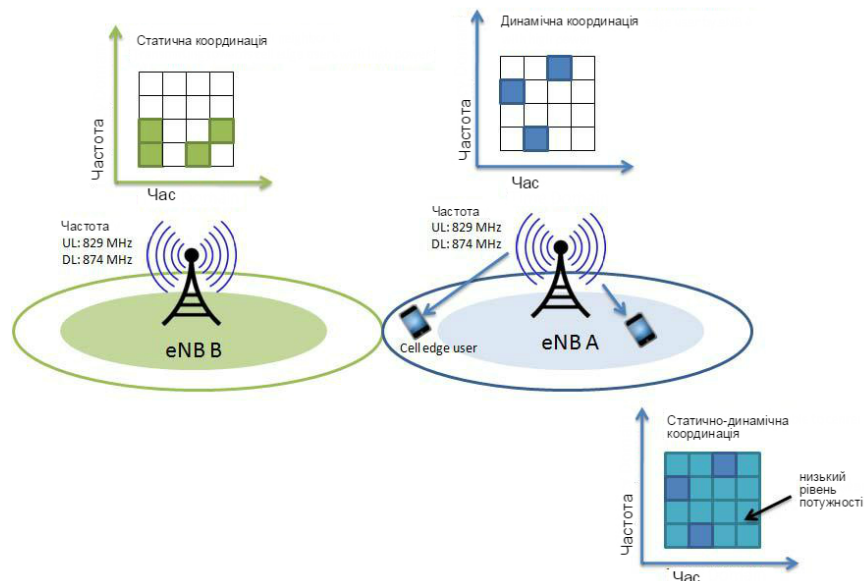


Рис. 1.12 Принцип роботи ICIC

Існує кілька підходів до такої координації: статична, динамічна і напівдинамічна координація. Незалежно від того, який використовується підхід, його суть зводиться до того, що абонентам, які є ближчі до приймача базової станції (eNB), може бути виділена вся смуга для передавання даних. Це пов'язано з тим, що вони передають з меншою потужністю, а значить, створюють менше інтерференції сусіднім стільникам. Проте недоліком його те, що в умовах його використанні зростає сигналізаційне навантаження, що веде

до нестачі ресурсів. На практиці для вирішення цього оператори згідно з середньо статистичним прогнозом навантаження на комірки виділяють ресурси статично.

Для усунення недоліку ICIC в 3GPP Release 10 була запропонована технологія eICIC (enhanced Inter-Cell Interference Coordination, посилена координація міжкоміркової інтерференції) [119-123]. В технології eICIC вводиться концепція «Майже чистого субкадру» (Almost blank subframe - ABS) [124]. Використовувана в алгоритмі технологія ґрунтується на передаванні макростільниками «порожніх» субкадрів зі зниженою потужністю і відсутністю даних і керуючої інформації. У ці періоди часу фемтостільникам дозволено обслуговувати своїх абонентів на границі комірок. Принцип роботи даного алгоритму зображений на рис. 1.13.

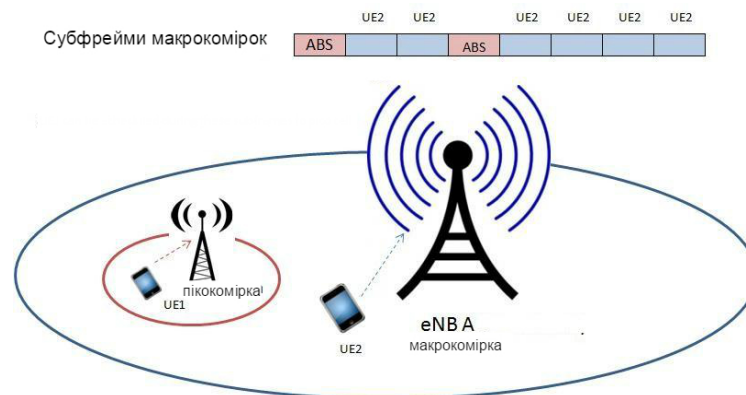


Рис.1.13 Принцип роботи алгоритму eICIC

#### 1.4.2 Аналіз існуючих методів уникнення міжсистемної інтерференції в інтегрованій LTE-U / Wi-Fi мережі

Згідно з численними досліджень [125-127] короточасні відмови каналу, які можуть виникати через інтерференції і ефект прихованих станцій [128], являються поширеним явищем у безпроводних мережах.

Так як пристрої Wi-Fi вже широко поширені в неліцензійній смузі 5 ГГц, то існує потреба в LTE-U Small Cell (SC), для коректної взаємодії з системою Wi-Fi [129]. Крім того, різні оператори LTE-U можуть зайняти той самий спектр в неліцензованій групі, щоб надати послуги передавання даних своїм користувачам. Таке незаплановане і некероване розгортання LTE-U SC

(фемтосоти, пікосоти) може привести до надмірних радіочастотним перешкод поблизу від існуючого Wi-Fi каналу та інших вузлів оператора LTE-U [130].

Тому критично важливо для LTE-U SC вибрати кращий опорний канал з мінімально можливим ступенем інтерференції, викликані сусідніми мережами Wi-Fi і LTE-U. Однак є випадки, де всі доступні канали зайняті пристроями Wi-Fi, який змушують LTE-U SC працювати на тому ж каналі, що і Wi-Fi. Пристрої Wi-Fi не вносять спотворення в розпізнаний сигнал LTE-U, якщо його рівень перешкод не вище енергетичного порога виявлення (-62дБм в смузі більш ніж 20 МГц). Без належних механізмів регулювання, випромінювання LTE-U може викликати значну інтерференцію на мережі Wi-Fi [131-133].

Тепер перейдемо до розгляду того, як метод доступу CSMA / CA реалізований в низхідному каналі мереж Wi-Fi і LTE-LAA.

У сучасних мережах Wi-Fi використовується реалізація методу доступу CSMA / CA під назвою DCF (англ. Distributed Coordination Function). Згідно з методом випадкового доступу DCF перед тим, як почати передачу пакета, станція прослуховує середовище протягом часу DIFS (від англ. DCF Interframe Space – міжкадровий інтервал DCF). Якщо протягом цього часу середовище було вільним, станція вибирає випадкове ціле число з діапазону  $(0, CW - 1)$ , де  $CW$  (від англ. Contention Window) – так зване конкурентне вікно [134-136], і присвоює його лічильнику відстрочки (від англ. backoff counter). Станція продовжує прослуховувати середовище протягом інтервалу часу  $a$ , який називається слотом, і, якщо середовище було вільним, зменшує значення лічильника відстрочки на 1, а в протилежному випадку лічильник відстрочки заморожується і знову буде зменшений на одиницю тільки після того, як середовище знову буде вільним протягом часу  $DIFS + a$ . Коли лічильник відстрочки досягає нульового значення, станція здійснює передачу пакета даних і очікує отримання підтвердження від приймача протягом визначеного тайм-ауту, після чого процедура доступу до каналу починається заново. При цьому, якщо підтвердження доставки було отримано, то вікно скидається в мінімальне значення  $CW_{min}$ , а якщо ні, то спроба передачі вважається невдалою і значення  $CW$  подвоюється, поки воно або не досягне максимального розміру

$CW_{max}$ , або пакет не буде відкинуто через досягнення максимально допустимої кількості невдалих спроб передачі пакета  $RL=7$  (від англ. Retry Limit – обмеження на кількість передач). В останньому випадку вікно скидається в мінімальне значення  $CW_{min}$ . Такий алгоритм дозволяє адаптивно зменшувати ймовірність виникнення колізії завдяки збільшенню діапазону, через який вибирається значення лічильника відстрочки.

Для можливості пріоритезації трафіку чергове доповнення IEEE 802.11e до стандарту Wi-Fi, яке з'явилося в 2005 році, визначило новий метод випадкового доступу EDCA (Enhanced Distributed Channel Access) і новий метод детермінованого доступу HCCA (від англ. Hybrid coordination function Controlled Channel Access) [137-139]. Згідно з EDCA раніше єдина черга пакетів на каналному рівні розділялась на 4 черги для різних категорій трафіку: голосового, відео і двох категорій фонового, кожна з яких отримувала доступ до середовища незалежно від двох інших черг. Пріоритезація здійснювалась за рахунок заміни інтервалу DIFS на інтервали AIFS (від англ. Arbitration Interframe Space), які були різними для кожної з 4 черг, а також за рахунок різних пар значень ( $CW_{min}$ ,  $CW_{max}$ ) для кожної черги. Також в доповненні IEEE 802.11e було введено визначення TXOP (від англ. Transmission Opportunity – можливість передачі). Тепер, отримавши доступ до середовища, станція, яка передає відеопотік, могла здійснювати передачу декількох пакетів протягом інтервалу TXOP, і тільки після завершення даного інтервалу необхідно було знову виконати процедуру отримання доступу до середовища.

Реалізація методу доступу CSMA / CA в низхідному каналі мереж LTE-LAA отримала назву LBT (англ. Listen before talk). Механізм LBT має багато спільного з механізмом EDCA та DCF, однак існує ряд значних відмінностей [140].

Зокрема, аналогічно EDCA, механізм LBT дотримується процедури відстрочення. Однак, незважаючи на те що механізм LBT визначає 4 аналогічні категорії трафіку, деякі значення параметрів істотно відрізняються. Так, наприклад, значення за замовчуванням параметра  $TXOP_{limit}$  (в LBT він має позначення  $T_{mcot}$ ), що визначає максимальну тривалість безперервної передачі,

у стандарті Wi-Fi не перевищує 4 мс для всіх типів трафіку, у той час як в LTE-LAA для деяких типів трафіку воно дорівнює 8 мс.

Крім цього, у зв'язку з тим, що частина службової інформації LTE-LAA передається в каналі PCC, передача даних LTE-LAA може починатися тільки на кордоні часових слотів в ліцензованій смузі, які прямують з періодом 500 мкс. Специфікація LTE не дає однозначної рекомендації того, що базова станція LTE-LAA повинна робити, якщо процедура відстрочки завершилася, але найближча межа слотів ще далеко. Одним із можливих рішень цієї проблеми, яке неявно мається на увазі 3GPP [141] і використовується в літературі і оціночних натурних експериментах, є посилення резервуючого сигналу аж до найближчого кордону слотів в PCC для того, щоб не допустити заняття каналу іншими пристроями.

Використання резервного сигналу в мережах LTE-LAA, навіть не закріплене в специфікації LTE, викликало сильну критику робочої групи IEEE 802.11 [142], що займається стандартизацією Wi-Fi. Спробувавши домовитися з 3GPP [143] і не дійшовши згоди, робоча група IEEE 802.11 звернулася в комітет ETSI BRAN для того, щоб на рівні європейського законодавства заборонити або істотно обмежити тривалість резервного сигналу. Якщо тривалість кадру RTS менше, ніж тривалість резервного сигналу, то базова станція LTE-LAA, на відміну від пристрою Wi-Fi, не зможе виявити колізію, що в довгостроковій перспективі призведе до несправедливого розподілу частотних ресурсів

Спільне існування LTE-LAA і Wi-Fi вже досить широко досліджено в літературі [144-145], проте в більшості робіт розглядається тільки реалізація LTE-LAA з сигналом резервування необмеженої тривалості.

Автори [146] вперше використовували середовище імітаційного моделювання ns-3 для дослідження даної проблеми. У роботі суть полягає в тому, що при спільному існуванні з Wi-Fi технологія LTE-LAA показує найбільшу ефективність у сценарії з ненасиченим трафіком. Автори також роблять висновок, що фактори, що впливають на зайнятість каналу (наприклад, керуючі сигнали LTE-LAA) чинять сильніший вплив на продуктивність обох мереж, ніж зміна параметрів в алгоритмах відстрочки.

Аналітична модель методу доступу LTE-LAA розроблена в [147]. Відзначається, що при використанні насиченого трафіку пропускна здатність мережі Wi-Fi сильно падає, у той час як LTE-LAA зберігає свою продуктивність. Варто зазначити, що автори припускають використання постійного конкурентного вікна в процедурі відстрочки LBT.

Автори [148] досліджують спільне існування мереж LTE-LAA і Wi-Fi на прикладі реальних пристроїв в залежності від ширини каналу і центральної частоти LTE-LAA, використання MIMO в Wi-Fi, а також від відстані між мережами і на відкритій місцевості. Однак в роботі розглядається лише сценарій з однією станцією Wi-Fi. Крім того, в роботі [149] розглядається реалізація LTE-LAA без процедури відстрочки.

У [150] вивчається вплив вибору значень параметрів LBT в LTE-LAA на продуктивність мережі Wi-Fi. Автори розглядають дві можливі схеми: з конкурентним вікном постійного і змінного розміру. Для другої схеми досліджуються два випадки: стандартний, відповідний спеці фіксації LTE-LAA, і альтернативний, у якому пристрій спостерігає за каналом і обчислює значення конкурентного вікна  $W$  на основі статистики вільних слотів протягом певного періоду часу. Автори вказують, що стандартна схема зі змінним конкурентним вікном є найбільш придатною для взаємного існування LTE-LAA і Wi-Fi. Слід зазначити, що в [150] не досліджується залежність пропускної здатності обох мереж в залежності від кількості Wi-Fi станцій.

У роботі [151] розглядається реалізація LBT з конкурентним вікном фіксованого розміру. Авторами запропонований алгоритм динамічного вибору розміру конкурентного вікна і тривалості передачі LTE-LAA. Показано, що запропонований алгоритм настройки параметрів дозволяє збільшити сумарну пропускну здатність системи з мереж LTE-LAA і Wi-Fi в порівнянні з використанням фіксованого значення конкурентного вікна, при цьому не завдаючи шкоди продуктивності мережі Wi-Fi. На жаль, авторами не було наведено порівняння роботи запропонованого алгоритму з реалізацією LBT з двійковим експоненціальним конкурентним вікном, яке за замовчуванням використовується в специфікації LTE-LAA. Автори [151], на відміну від [146-

153], також досліджують реалізації LBT, коли сигнал резервування не використовується і коли він обмежений трьома OFDM- символами, вказуючи на перевагу останнього варіанту. Однак вони досліджують лише одне обмеження на максимальну тривалість сигналу резервування і розглядають тільки схему з повторенням відстрочки.

Незважаючи на те, що механізми доступу в низхідному каналі і мереж Wi-Fi, і мереж LTE-LAA побудовані на основі CSMA / CA і використовують механізм відстрочки, вони мають безліч відмінностей. Вплив деяких з цих відмінностей на продуктивність обох мереж і справедливість розподілу ресурсів вже було частково вивчено в літературі, наприклад, у роботах [152-156] досліджувалась взаємодія мереж при використанні різних значень параметрів механізмів визначення зайнятості каналу. У той же самий час, деяким важливим аспектам, наприклад, порівняно продуктивності LTE-LAA і Wi-Fi в разі, якщо LTE-LAA буде використовувати резервний сигнал обмеженої тривалості, не було приділено достатньо уваги.

Внаслідок інтерференції і завад безпровідний канал в умовах спільного використання неліцензійного діапазону технологією LTE та Wi-Fi є ненадійним середовищем передавання даних, що призводить до відкидання пакетів після здійснення відведеної кількості спроб передачі на каналному рівні, а також до ефекту блокування черги головним пакетом: невдалі спроби передавання пакетів отримувачам з відмовою каналу займають все більше часу, в результаті чого пакети, адресовані іншим отримувачам, змушені очікувати в черзі.

Протоколи каналного рівня вирішують багато задач, серед яких доступ до середовища передавання даних, пріоритезація пакетів, складання розкладу їх передавання, надаючи таким чином безпосередній вплив на час доставки пакету і надійність його доставки [157-160]. Хоча протоколи каналного рівня мають безліч параметрів, що налаштовуються та дозволяють впливати на значення таких мережевих показників якості обслуговування (від англ. Quality of Service, QoS), як час доставки пакета і його варіація (джиттер), частка втрачених пакетів, вони не оперують такими визначеннями, як метрики якості відео зображення, які характеризують якість його сприйняття (від англ. Quality of



Experience, QoE) отримувачем [161-167]. При спробі оптимального налаштування параметрів протоколу канального рівня з метою максимізувати якість наданого користувачеві сервісу неминуче виникає задача встановлення зв'язку між значеннями мережевих показників якості обслуговування (QoS) і значеннями показників якості сприйняття (QoE)[168-174].

Згідно із вище згаданим прогнозом у безпроводних мережах відео буде найбільш затребуваною послугою та займатиме найбільше ресурсів [176]. Короткочасні відмови каналу надають згубний вплив на передавання відеопотоків реального часу, які пред'являють вимоги до якості обслуговування і часто виражаються в обмеженнях на частку втрачених пакетів  $PLR^{QoS}$  (Packet Loss Ratio) і час доставки пакета  $D^{QoS}$  (Delay) [177], так як, по-перше, відкидання пакета для отримувача з відмовою каналу може відбутись через вичерпання протоколом канального рівня відведеної кількості повторних спроб передавання пакета задовго до закінчення граничного часу доставки пакета, а по-друге, блокування черги призводить до відкидання пакетів інших отримувачів через перевищення обмеження на час доставки пакета. Проведений аналіз існуючих рішень боротьби з короткочасними відмовами каналу в LTE/Wi-Fi мережах у процесі передавання відеопотоків реального часу показав, що на сьогоднішній день не існує ефективного рішення, яке могло б успішно застосовуватись в реальному мережевому обладнанні.

### **1.5 Постановка науково-практичного завдання дисертаційного дослідження**

Сьогодні прийнято вважати, що взаємне розташування вузлів інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі в значній мірі визначає її загальну ефективність [178-180]. Провівши огляд робіт по даній тематиці, встановлено, що розміщення базових станцій з більш високою щільністю для збільшення ємності мережі неминуче веде до зростання складності управління інтерференцією, збільшення вартості розгортання мережі, додаткових енергетичних та економічних витрат на підтримку її працездатності. Важливу роль для оператора має енергоефективність мережі, оскільки в гетерогенних

мережах у порівнянні з однорівневими з'являється велика кількість малих комірок [181-183]. Хоча вони є малопотужними, але в сукупності рівень малих комірок використовує багато електроенергії [184]. При цьому слід врахувати, що абонентське навантаження розподілене нерівномірно по території. Велику частину малі комірки не обслуговують абонентів взагалі. Саме тому доцільним є зменшення енергоспоживання мережі, внаслідок застосування нового методу адаптивного формування структури рівня радіодоступу, за допомогою якого малі комірки, які не обслуговують абонентського навантаження будуть переходити в енергозберігаючий режим, з можливістю швидкого переходу в звичайний режим в разі потреби. Також встановлюючи критерії обслуговування абонентів базовими станціями певного рівня можна досягти оптимальної конфігурації роботи мережі залежно від цілей, серед яких може бути досягнення максимальної якості обслуговування та ємності мережі та ін.

Використання стохастичної геометрії (тобто статистичного моделювання просторових взаємин) набуло в останні десятиліття значної популярності, що пов'язано з необхідністю аналізу загальносистемної ефективності, усередненої за результатами безлічі просторових реалізацій [185-187]. Порівняно недавно подібні методи були з успіхом застосовані для дослідження сучасних стільникових технологій зв'язку, починаючи з традиційного розміщення макрокомірок і аж до надщільних покриттів малими (гетерогенними) комірками. Побудови стохастичної геометрії зазвичай засновані на розгляді деякого випадкового точкового процесу на площині або в просторі для цілей статистичного моделювання, наприклад, розташування абонентських терміналів і подальшого аналізу аспектів, пов'язаних з щільністю розміщення терміналів, потужністю передавання, втратами при поширенні радіохвиль і інтерференції.

Оператори мобільного зв'язку повинні використовувати більш швидку та економічно ефективну радіотехнологію, зберігаючи при цьому прибутковість в процесі оброблення великих об'ємів даних .

Проблема у балансуванні навантажені мобільного зв'язку виникала часто і щораз оператори наближаються до її вирішення [187-193]. Основною ідеєю

дисертаційної роботи є розвантаження безпроводних стільникових мереж за допомогою інтеграції технології Wi-Fi. Інше питання полягає в тому, чи буде це один варіант гетерогенної мережі, або ж кілька одночасно[194-195]. В літературі найчастіше трапляються методи, у яких пропонують використовувати для вирішення цього завдання наступні технології: корпоративна Wi-Fi мережа; використання LTE-U; а також почерговий доступ одночасно до Wi-Fi і LTE. Більш детально ці методи будуть розглянуті в наступних розділах. Також подальший виклад ставить собі за мету проведення аналітичного та імітаційного моделювання гетерогенної системи зв'язку, яке одночасно враховувало б динаміку трафіку в часі і розміщення вузлів у просторі. Пропонований просторово-часовий підхід дозволяє провести дослідження взаємодії стільникових LTE і локальних мереж доступу Wi-Fi на каналному рівні та радіодоступу. Зокрема, розглянути управління трафіком і вибір (призначення) кращою радіотехнології. Відповідно, в наступних розділах вводиться нова модель інтегрованої LTE /Wi-Fi мережі доступу і проводиться аналіз загальносистемних показників її ефективності.

Таким чином, зростання обсягів мобільного трафіку, спонукають до розв'язання *науково-практичного завдання* підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi за рахунок розроблення методів адаптивного управління доступом до неліцензійного радіоканалу, планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу, а також удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу в умовах передавання відеопотоків реального часу.

## **1.6. Висновки до розділу 1**

У даному розділі розглядаються різні варіанти інтеграції технологій LTE і Wi-Fi з метою подальшого розвитку мобільних мереж зв'язку та підвищення спектральної ефективності. Особлива увага приділяється методам вибору кращої радіотехнології і схем планування радіоресурсів, які функціонують на каналному рівні та мережі радіодоступу, які можуть бути реалізовані як на

стороні абонентських терміналів, так і на стороні мережевої інфраструктури. Проводиться порівняння традиційних і нових алгоритмів такого управління в рамках розвитку системи зв'язку 5G для виявлення переваг підходу, при якому абонентські термінали забезпечуються актуальним знанням щодо, наприклад, завантаження мережі радіодоступу. Встановлено, що забезпечення задовільної якості сприйняття отримувачем і виконання вимог до якості обслуговування являється непростим завданням в умовах передавання даних по безпроводних LTE та Wi-Fi мережах, оскільки безпроводний канал є ненадійним середовищем передавання і піддається впливу завад в значно більшій степені, ніж провідні канали. Пропускна здатність безпроводного каналу може значно флюктувати з плином часу, а через ефект завмирання сигналу (федінгу) і багатопроменевого поширення сигналу можуть виникати як одиничні, так і корельовані в часі помилки. Щоб приховати ці особливості безпроводного середовища і забезпечити виконання вимог до якості обслуговування, в безпроводних мережах використовуються свої протоколи канального рівня, які на сьогоднішній день мають недоліки та вимагають удосконалення.

## **РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ І АЛГОРИТМИ АДАПТИВНОГО ПЛАНУВАННЯ РАДІОРЕСУРСІВ ТА ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ РІВНЯ РАДІОДОСТУПУ ІНТЕГРОВАНИХ МЕРЕЖ LTE/WI-FI З МІЖРІВНЕВОЇ ІНТЕРФЕРЕНЦІЇ**

### **2.1 Концептуальна модель інтегрованої LTE/Wi-Fi мобільної мережі наступного покоління**

Мережа мобільного зв'язку п'ятого покоління повинна мати в першу чергу високу системну спектральну ефективність, тобто існуючий спектр частот має якомога щільніше використовуватися. Класичні однорівневі мережі мають низьку системну спектральну ефективність через велику зону дії базових станцій. Мережі слід проектувати гетерогенними, тобто базові станції яких володіють різними параметрами. Такі мережі будуть мати високу спектральну ефективність і внаслідок цього зможуть надати високу пропускну здатність абонентам.

Одним із ключових завдань побудови гетерогенних мереж є введення малих комірок (інтегрованих LTE/Wi-Fi) таким чином, щоб мінімізувати їх негативний вплив на деякі ключові показники ефективності, адже при інтеграції множини малих комірок виникає проблема з міжрівневою інтерференцією. Макрокомірки, що мають велику потужність передавання є потенційним джерелом завад для абонентів, що обслуговуються малими комірками.

Оскільки малих комірок є значно більше, ніж макрокомірок, в багатьох випадках вони встановлені в місцях, де немає існуючого з'єднання з ядром мережі. Для кожної з них необхідно забезпечити канал, за допомогою якого буде відбуватися з'єднання з ядром мережі. Вирішення проблеми останньої милі для малих комірок полягає в використанні як провідного так безпроводного з'єднання.

В провідного і безпроводного з'єднання є свої переваги та недоліки і вибирати те чи інше потрібно виходячи з конкретних умов. Безпроводне з'єднання володіє більшою гнучкістю, а провідне – більшою надійністю. У

деяких місця дуже складно провести оптичний кабель, і під'єднання за допомогою радіоканалу може бути єдиним можливим рішенням. Проте для організації радіоканалу необхідно задіяти частотний ресурс в наявній у оператора смузі частот, або в міліметровому діапазоні.

Малі комірки можуть бути під'єднані до ядра мережі як напряму, так і через вузол агрегації трафіку малих комірок. Другий випадок часто є дешевшим, проте при цьому пропускна здатність окремих малих комірок може бути обмежена через недостатню ємність магістрального сегменту.

Багаторівнева структура рівня радіодоступу має значні переваги в порівнянні з однорівневою, а саме:

- Краща спектральна ефективність, відповідно більша ємність мережі при тій же загальній смузі частот.
- Використання неліцензійного спектра Wi-Fi дасть змогу підвищити пропускну здатність мережі.
- Можливість поетапного встановлення малих комірок по мірі зростання обсягів абонентського навантаження, дозволить оператору здійснювати капіталовкладення в мережу по мірі потреби.
- Гетерогенні мережі є дуже гнучкими. По різному здійснюючи управління гетерогенними мережами можна досягнути найкращого режиму роботи мережі для певного сценарію абонентського навантаження. Гетерогенні мережі володіють значною гнучкістю і при застосуванні ефективних алгоритмів управління можуть ставати мережами, орієнтованими на користувача.

Розглянемо декілька прикладів гнучкого і ефективного використання малих комірок. На основі малих комірок можна впроваджувати SON – мережі, в яких мікрокомірки самі будуть корегувати свої параметри залежно від радіообстановки. Якщо малих комірок мало, для обслуговування абонентів вони можуть використовувати ті ж частоти, що і макрокомірка, з використанням технології (Coordinated Multipoint, CoMP). При малому абонентському навантаженні, використовуючи алгоритм адаптивного формування структури рівня радіодоступу можна досягнути покращення енергоефективності мережі. Також встановлюючи критерії обслуговування

абонентів базовими станціями певного рівня можна досягти оптимальної конфігурації роботи мережі залежно від цілей, серед яких може бути досягнення максимальної якості обслуговування, досягнення максимальної ємності мережі та ін.

Відповідно до сказаного вище в даний час спостерігається тенденція до більш тісної взаємодії різнорідних технологій радіодоступу. У зв'язку з цим в даній роботі, як приклад розглядається взаємодія точок доступу локальної мережі WLAN з малими комірками мобільного оператора в контексті організації відповідної архітектури системи зв'язку і з'ясування переваг різних форм інтеграції. На рис. 2.1 показано запропоновану інтегровану LTE/Wi-Fi мережу мобільного оператора [4].

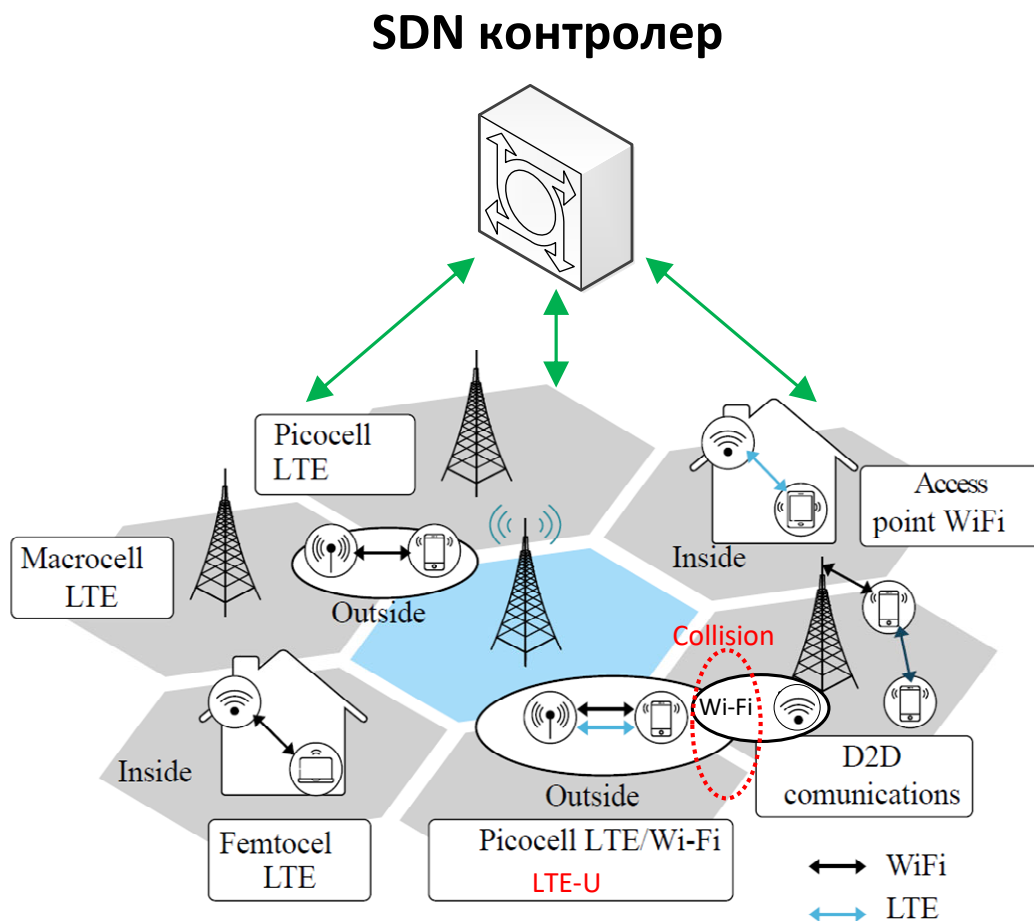


Рис. 2.1 Концепція інтегрованої мобільної мережі наступного покоління [4]

Мобільна інфраструктура включає в себе ієрархічну структуру комірок різного розміру, включаючи макрокомірки для забезпечення безшовного

покриття, а також комірки різного розміру (пікокомірки, фемтокомірки, точки доступу Wi-Fi, суміщені LTE/Wi-Fi модулі та ін.). Управління рівнем радіодоступу буде здійснюватися з допомогою програмно-керованого ядра SDN [8], що використовує хмарне середовище для зберігання і обробки даних про мережу він визначає приблизне місцезнаходження абонента та параметрів його мобільності, проводить розрахунок SINR та інші обчислення.

До функцій контролера входять:

- Моніторинг якості наданих послуг і стану мережі
- Побудова карти навантаження на основі сигналізаційних даних від абонентів
- Визначення обслуговуючого структурного елемента для абонентів
- Обробка і зберігання даних, отриманих від нижніх рівнів [7, 11].

На відміну від традиційного розвантаження трафіку користувачів з стільникової системи зв'язку в локальну мережу доступу, яка активно застосовувалася в гетерогенних мережах попередніх поколінь, у тісно інтегрованих системах 5G можливо суміщення функціоналу радіотехнологій LTE і Wi-Fi в рамках єдиного модуля доступу, так званої технології LTE-Unlicensed (LTE-U). Не зважаючи на те, що такий нерегульований доступ до радіочастот значно спрощує вхід на відповідний ринок, він також створює ризик виникнення неконтрольованої інтерференції, яка, у свою чергу, ускладнює забезпечення необхідної якості обслуговування абонентів. Крім того, безліч користувачів загального спектра може потрапити в критичну ситуацію, у якій жоден з них не може досягти задовільного результату. Такий результат вкрай вірогідний у даний час, коли бурхливе зростання популярності мереж Wi-Fi і використання їх операторами мобільного зв'язку для розвантаження своїх стільникових мереж загрожують якості роботи систем, що функціонують на неліцензованих частотах. Усунення даного недоліку вимагає розробки ефективних засобів координування інтерференції, спільного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу.



## 2.2 Метод адаптивного використання неліцензійного діапазону частот 5 ГГц мережами Wi-Fi та LTE-U для забезпечення необхідної якості послуг

### 2.2.1 Модель гетерогенної мережі LTE-U та Wi-Fi з міжсистемною інтерференцією

Розглянемо стільникову мережу (рис. 2.2), що має  $S$  LTE-A базових станцій малого розміру SBSs (Small base stations) двостандартної взаємодії, які можуть працювати як у ліцензійному LTE, так і неліцензійному LTE-U спектрі) та керуються різними операторами [2]. А також  $W$  точок доступу Wi-Fi (Wi-Fi access points WAPs), які не перекриваються. Кожна SBS може обслуговувати користувача  $U_i$  по лінії вниз, використовуючи набір ортогональних ліцензованих підканалів рівномірної смуги пропускання. В свою чергу WAP має  $V_w$  активних користувачів. І SBSs, і WAPs працюють в одній неліцензованій смузі.

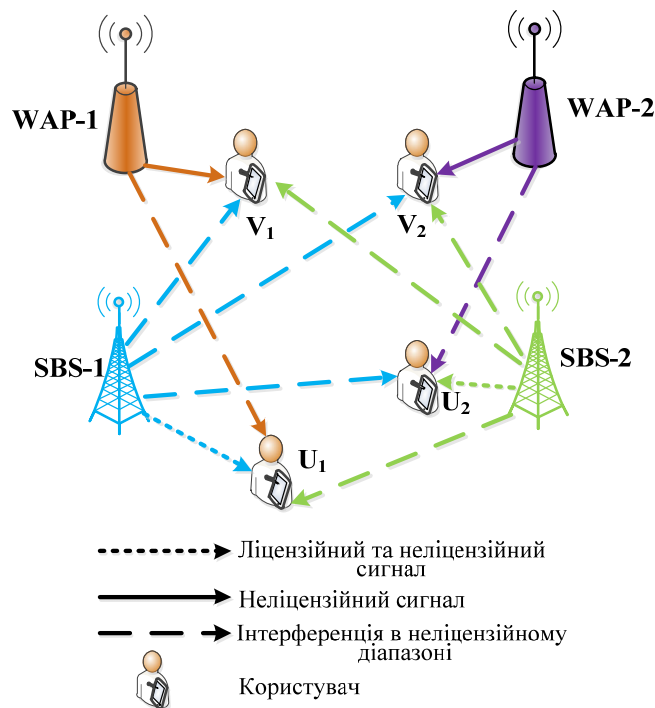


Рис. 2.2 Модель мережі LTE-U та Wi-Fi

Таким чином, на користувача  $U_i$  технології LTE-U можуть впливати сусідні SBS базові станції і одна WAP, бо інші WAP не перекриваються, тоді як користувач  $V_w$  технології Wi-Fi буде отримувати перешкоди від всіх SBS.

Кожна SBS ділить одну традиційну смугу Wi-Fi 20 МГц на набір скінченних підканалів  $C_u$  (наприклад 100 підканалів) з рівномірною смугою пропускання  $B_u$ , наприклад 180 кГц, для ефективного управління ресурсом [10]. Для надійної передавання керуючих сигналів від SBS до користувача, кожна SBS виділяє щонайменше один ліцензований підканал своїм активним користувачам. Насправді, LTE-U може бути розгорнутий з використанням або додаткового режиму низхідної лінії зв'язку (Supplemental downlink SDL) або дуплексного режиму часового розділення каналів (Time-division duplexing TDD). Неліцензований спектр використовується тільки для низхідної лінії зв'язку в SDL, тоді як в TDD неліцензований спектр може використовуватися як для висхідної лінії зв'язку, так і для низхідної лінії зв'язку. Тут ми розглядаємо LTE-U як SDL, який підтримується 3GPP Release 13 як LAA (License Assisted Access). 3GPP вже запровадила схему доступу по висхідній лінії для LTE-U, а саме покращений LAA (eLAA) у Release 14 [35], і отже, агрегація несучої як для висхідної лінії зв'язку, так і для низхідної лінії зв'язку, можливо, за допомогою використання ліцензованого TDD або ліцензованого дуплексного режиму частотного розділення каналів (Frequency division duplexing FDD). З цією метою запропонований підхід може бути розширений для обробки висхідної лінії зв'язку, прийнявши режим роботи TDD замість SDL. Всі SBS працюють у режимі SDL з використанням об'єднання несучих CA (Carrier aggregation).

### **2.2.2 Алгоритм розподілу неліцензійних ресурсів з уникненням інтерференції між операторами LTE в умовах спільного використання 5 ГГц діапазону частот**

У розглянутій моделі інтегрованої мережі кожна SBS використовує методику множинного доступу з ортогональним частотним розділенням (OFDMA) для розподілу ресурсів серед своїх користувачів, де є відсутність інтерференції між операторами в ліцензованому спектрі. Коли SBS  $i \in S$  виділяє ліцензований підканал  $k \in C_i^l$  до користувача  $j \in U_i$ , то за формулою Шеннона досягнута швидкість передавання для цього користувача визначатиметься за формулою:

$$R_{i,j}^{l,k} = F_l \log_2 \left( 1 + \frac{x_{i,j}^k \cdot P_i^l \cdot L_i}{N_0} \right), \quad (2.1)$$

де  $F_l$  - смуга ліцензійних частот,  $x_{i,j}^k$  вказує виділення ліцензованого підканалу  $k \in C_i^l$  за допомогою SBS  $i \in S$  до користувача  $j \in U_i$  з  $x_{i,j}^k = 1$ , коли SBS  $i \in S$  виділяє підканал користувачеві  $i$ , якщо не виділяє, то  $x_{i,j}^k = 0$ .  $P_i^l$  - потужність передавача SBS  $i$  для кожного користувача,  $i$  для простоти ми розглядаємо однакову потужність передавання,  $L_i$ - коефіцієнт послаблення корисного сигналу між передавачем і приймачем,  $N_0$ - спектральна щільність потужності адитивного білого гауссівського шуму АБГШ.

Система LTE-A може використовувати об'єднання несучих, якщо SBS має достатньо невикористаних ліцензованих підканалів, для забезпечення кращої швидкості для своїх користувачів та підтримки якості обслуговування. Коли SBS  $i \in S$  виділяє більше одного підканалу користувачеві  $j \in U_i$ , тоді досягнута швидкість передавання даних цього користувача у ліцензованих підканалах буде:

$$R_{i,j}^l(x_i) = \sum_{k \in C_i^l} x_{i,j}^k R_{i,j}^{l,k}, \quad (2.2)$$

Якщо  $R_{i,j}^l(x_i)$  є достатньо великим для задоволення QoS користувача  $j$ , то мережі не потрібно буде використовувати неліцензований спектр для цього користувача. Однак, коли швидкість у ліцензованій смузі спектру не здатна забезпечити необхідну QoS, SBS буде змушена виділити неліцензовані підканали (канали) цим користувачам. У цьому випадку швидкість, отримана користувачем  $j \in U_i$  LTE-U у неліцензованому підканалі  $k' \in C_i^l$  є наступною:

$$R_{i,j}^{u,k'} = F_u \log_2 \left( 1 + \frac{y_{i,j}^{k'} \cdot P_i^u \cdot L_i}{I_{Sv_i} + N_0} \right), \quad (2.3)$$

де  $y_{i,j}^{k'} = 1$ , коли SBS  $i \in S$  виділяє неліцензований підканал заданому користувачеві  $j$  та  $y_{i,j}^{k'} = 0$ , в іншому випадку.  $P_i^u$  - потужність передавання для стільникового користувача SBS  $i$  в неліцензійному спектрі,  $I_{Sv_i}$  - перешкода, що сприймається користувачем LTE-U  $j \in U_i$  від інших SBS в тому ж

неліцензійному підканалі  $k' \in C_u$ . Ми ігноруємо інтерференції, створені з WAP через їх незначний вплив на користувача LTE-U.

Проте через розгортання різних операторів нескоординовані SBS мають  $I_{S^i} \gg P_i^u \cdot L_i$ , а отже  $R_{i,j}^{u,k'}$  буде незначним. Таким чином, щоб скористатися цією неліцензованою смугою, SBS можуть використовувати схему пропорційної справедливості, щоб розділити неліцензовані ресурси ортогонально між собою. Для цього кожна SBS  $i \in S$  передає свою додаткову вимогу QoS оператору на SDN контролер. Дотримуючись стратегії справедливості, контролер розподіляє неліцензовані ресурси між SBS базуючись на QoS. Припустимо, що неліцензовані підканали розподілені між SBS як  $C_u = C_u^1 \cup C_u^2 \cup \dots \cup C_u^S$ , де  $C_u^i \cap C_u^{i'} = \emptyset, \forall i, i' \in S$ . Таким чином, SBS можуть уникнути інтерференції  $I_{S^i}$  між собою.

- 1: Input :  $S, C_u, AQR$
- 2: Output :  $C_u^i, \forall i \in S$
- 3: Initialization :  $C_u^i = \emptyset, \forall i \in S$
- 4: for each  $i \in S$  do
- 5:      $K = \frac{AQR_i}{\sum_{i' \in S} AQR_{i'}} \cdot |C_u|$
- 6:     for  $s = 1$  to  $K$  do
- 7:          $C_u^i = C_u^i \cup \{s\}$
- 8:     end for
- 9: end for
- 10: SDN controller sends  $C_u^i$  to each  $i \in S$

### Алгоритм 3.1 Розподіл неліцензійних ресурсів серед SBS.

Відповідно, швидкість передавання даних, отримана користувачем LTE-U  $j \in U_i$  в неліцензованому підканалі  $k' \in C_u$ , є наступною:

$$R_{i,j}^{u,k'} = B_u \log_2 \left( 1 + \frac{y_{i,j}^{k'} P_i^u |h_{i,j}|^2}{\sigma^2} \right), \quad (2.4)$$

Аналогічно, якщо SBS  $i \in S$  розподіляє декілька неліцензованих підканалів користувачеві  $j \in U_i$ , то досягнута швидкість цього користувача в цьому спектрі є наступною:

$$R_{i,j}^u(y_i) = \sum_{k' \in C_u^i} y_{i,j}^{k'} R_{i,j}^{u,k'}, \quad (2.5)$$

Відповідно, загальна можлива швидкість передавання даних користувача  $j \in U_i$  як у ліцензованому, так і неліцензійному спектрі є наступною:

$$R_{i,j}(x_i, y_i) = R_{i,j}^l(x_i) + R_{i,j}^u(y_i), \quad (2.6)$$

### 2.2.3 Вплив технології LTE-U на швидкість передавання даних в мережі Wi-Fi

У роботі пропонується розглянути групу незадоволених користувачів  $U_i' \subseteq U_i$  щодо наданої якості обслуговування, яким потрібно додаткових ресурсів з неліцензованого спектра. Кожен користувач  $j \in U_i'$  має щонайменше один ліцензований підканал для безперервного обміну інформацією керування щодо виділення додаткових ресурсів. Відповідно в роботі розглянуто вплив технології LTE-U на швидкість передавання даних у мережі Wi-Fi. У випадку, коли неліцензований канал повністю використовується у WAP, то забезпечується максимальна швидкість користувачам мережі Wi-Fi. Відповідно середня швидкість передавання даних кожного користувача  $v \in V_w$ , підключеного до WAP  $w \in W$ , може бути представлена наступним чином:

$$R_{w,v}^{\max} = \frac{R_w}{V_w}, \quad (2.7)$$

де  $R_w$  - загальна пропускна здатність каналу зв'язку WAP  $w \in W$ .

В умовах, коли всі SBS використовують ту ж саму неліцензовану смугу, що і WAP, продуктивність WAP буде меншою. Якщо врахувати, що кожна SBS в області завад діє так само, як WAP, то нормалізована пропускна здатність для кожної WAP  $w \in W$  є наступною [36]:

$$R_w^{\min} = \frac{P_{tr} P_s E[P] (S+1)^{-1}}{(1-P_{tr}) T_\sigma + P_{tr} P_s T_s + P_{tr} (1-P_s) T_c}, \quad (2.8)$$

де  $P_{tr} = 1 - (1 - \tau)^{S+1}$  - ймовірність передачі щонайменше одного SBS або WAP в часовому слоті з  $\tau$ , що позначає стаціонарну ймовірності передавання точки

доступу.  $P_s$  є успішною передачею по каналу з  $P_s = \frac{(S+1)\tau(1-\tau)^S}{P_{tr}}$  і  $E[P]$  представляє середній розмір пакету.  $T_\sigma$  - тривалість часу порожнього слота,  $T_s$  представляє тривалість часу успішної передачі, а  $T_c$  - середній час колізії.

Середня швидкість передавання даних, що досягається кожним користувачем  $v \in V_w$  WAP  $w \in W$ , представлена наступним чином:

$$R_{w,v}^{\min} = \frac{R_w^{\min}}{V_w}, \quad (2.9)$$

Таким чином, в умовах спільного використання SBS та WAP неліцензованого спектру, необхідно впроваджувати нові механізми справедливого доступу до каналів для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування, як для Wi-Fi користувачів так і для LTE. Відповідно, швидкість передавання даних в мережі Wi-Fi варіюється в межах від  $[R_{w,v}^{\min}, R_{w,v}^{\max}]$ .

#### **2.2.4 Метод адаптивного управління доступом до неліцензійного радіоканалу в умовах спільного співіснування систем Wi-Fi та LTE-U для забезпечення QoS**

Зауважимо, що  $R_{w,v}^{\max}$  досягається, коли тільки WAP має доступ до неліцензованого каналу. Але якщо WAP і SBS розгортаються в межах однієї зони покриття і використовують одну і ту ж неліцензовану смугу, то користувачі Wi-Fi майже не матимуть доступу до каналу і матимуть дуже низьку швидкість передавання даних. Отже, для справедливого співіснування систем Wi-Fi і LTE-U, вони повинні розділяти часові інтервали таким чином, що WAP могли підтримувати мінімальні швидкості передавання даних для своїх користувачів, а SBS мали змогу, принаймні, покращити деяким користувачам якість надання послуг. Оскільки система LTE-U керує фізичними ресурсами централізовано, а не так як це робить DCF у WAP, SBS повинні визначити відповідний інтервал часу для досягнення мінімальної пропускну здатності для кожного користувача Wi-Fi. Коли SBS відмовляються від частки

часового інтервалу  $\tau \in [0 \div 1]$  неліцензованого спектра для WAP, можливі швидкості користувачів Wi-Fi і LTE-U (вважають  $x_i$  фіксованим для поточного слоту часу) та будуть, відповідно:

$$R_{w,v}(\tau) = R_{i,j}^{\max} \tau, \forall v \in V_w, \quad (2.10)$$

$$R_{i,j}(\tau, x_i, y_i) = R_{i,j}^l(x_i) + (1 - \tau)R_{i,j}^u(y_i), \quad (2.11)$$

Таким чином, сумарна швидкість SBS  $i \in S$ , коли вона розділяє часовий інтервал  $\tau$  з WAP, є наступною:

$$R_i(\tau, x_i, y_i) = \sum_{j \in U_i} R_{i,j}(\tau, x_i, y_i), \quad (2.12)$$

Тепер наша проблема обмежена неліцензованим спектром, щоб максимізувати сумарну швидкість SBS після поділу часу  $\tau$  з WAP, зберігаючи при цьому QoS для більшості користувачів. Для цього необхідно розробити ефективну схему розподілу спектру для кожної SBS  $i$ , щоб максимізувати функцію корисності  $U_i(\tau, y_i) = \sum_{j \in U_i} \log((1 - \tau)R_{i,j}^u(y_i))$  у неліцензованому спектрі.

$$\max_{\tau, y_i} U_i(\tau, y_i), \forall i \in S, \quad (2.13)$$

$$C_1 : \sum_{j \in U_i} y_{i,j}^{k'} \leq 1, \forall k' \in C_u^i, \quad (2.14)$$

$$C_2 : \sum_{j \in U_i} \sum_{k' \in C_u^i} y_{i,j}^{k'} \leq |C_u^i|, \quad (2.15)$$

$$C_3 : R_{i,j}(\tau, x_i, y_i) \geq Q_{i,j}, \forall j \in U_i, \quad (2.16)$$

$$C_4 : y_{i,j}^{k'} \in \{0, 1\}, \forall k' \in C_u^i, \forall j \in U_i, \quad (2.17)$$

$$C_5 : R_{w,v}^{\min} \leq R_{w,v}(\tau) \leq R_{w,v}^{\max}, \forall v \in V_w, \quad (2.18)$$

$$C_6 : 0 \leq \tau \leq 1, \quad (2.19)$$

Умова (2.14) вказує, що один неліцензований підканал може бути використаний не більше ніж одним користувачем LTE-U. Обмеження загальних ресурсів у цьому спектрі представлені виразом (2.15) для кожної SBS. Вимога щодо QoS користувачів LTE-U виражено у (2.16), де  $Q_{i,j}$  – вимоги щодо якості

обслуговування  $j$  користувача, що перебувають у зоні обслуговування  $i$  SBS мережі. Вираз (2.17) встановлює або 0, або 1 і вказує на вектор виділення ресурсів. Вирази (2.18) і (2.19) обирають інтервал доступу до середовища  $\tau$  в рамках мінімальної та максимальної швидкостей.

Як було сказано вище, технологія LTE в умовах використання неліцензованого спектру робить перешкоди мережі Wi-Fi. Для доведення цього у роботі проведено дослідження відомого алгоритму CSAT, який призначений для справедливого розділення ресурсів у мережах LTE і Wi-Fi інтервал  $\tau=0,5$ . На рисунку 2.3 продемонстровано процес функціонування CSAT. Як бачимо, коли дві мережі не заважають одна одній, тоді ресурс розподілений порівну. Однак, на практиці, на ділянці завад перевага надається технології LTE, швидкість якої буде становити 70 Мбіт/с, тобто користувач Wi-Fi буде отримувати менше ресурсів для надання необхідного рівня якості обслуговування, а саме 24 Мбіт/с. Ввімкнений CSAT забезпечить справедливе розділення ресурсів, тоді і LTE, і Wi-Fi будуть мати по 50 Мбіт/с. Це пов'язано з тим, що LTE завжди забирає середовище собі, в той час як Wi-Fi спершу прослуховує його функцією розподіленої координації (DCF).

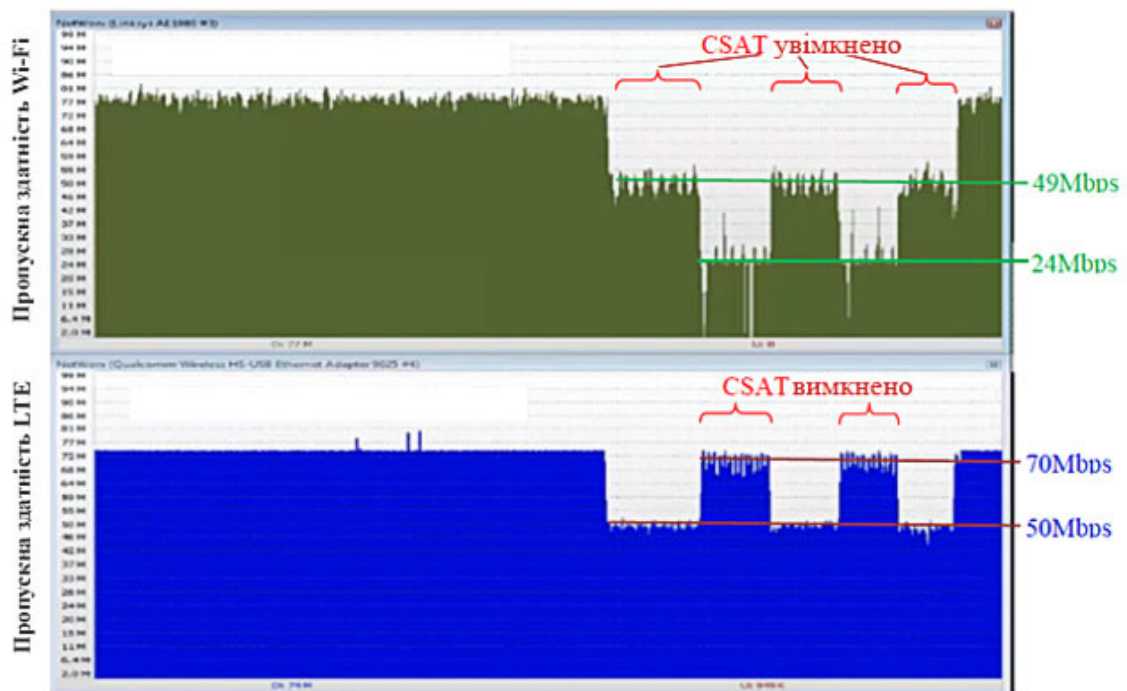


Рис. 2.3 Пропускна здатність інтегрованої LTE/Wi-Fi в умовах функціонування алгоритму CSAT



Припустимо, що потрібно передати файл з використанням технології LTE. Цей файл фрагментований на пакети і щоб їх передати потрібно певне вікно часу. Допустимо, що тривалість цього інтервалу буде рівною 1 мс як для мережі LTE, так і для Wi-Fi. Почерговий доступ до середовища розділить ресурси порівну, така робота алгоритму CSAT зображена на рис. 2.4. Слід зауважити, що важливим критерієм є налаштування Wi-Fi на агресивний доступ до середовища, щоб в нього було більше можливостей доступитись відразу.

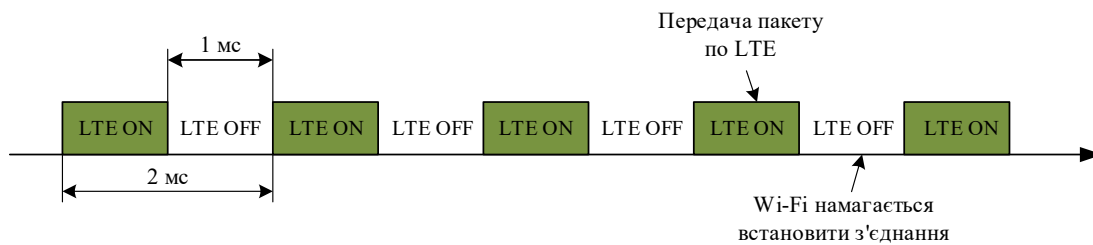


Рис. 2.4 Принцип роботи методу CSAT

Також припустимо іншу ситуацію, коли двом користувачам потрібні певні послуги у різні моменти часу, які вимагають різні швидкості (рисунки 2.5 та 2.6). Але вони використовують різні технології: один з них – мережу LTE, інший – Wi-Fi. Максимальні пропускі здатності цих мереж однакові, а саме 50 Мбіт/с. Однак, користувачеві Wi-Fi у деякі моменти часу потрібно більше ресурсу, ніж канал може надати, і як наслідок його якість обслуговування погіршується. При цьому у користувача LTE на протязі всього часу задовільна якість обслуговування, і не використовується весь ресурс. Роботи алгоритму CSAT для цього недостатньо. Тому, щоб його покращити скористаємось формулами (2.13-2.19). Таким чином, можна динамічно обирати проміжок часу  $\tau$ , для справедливого розподілення ресурсів.

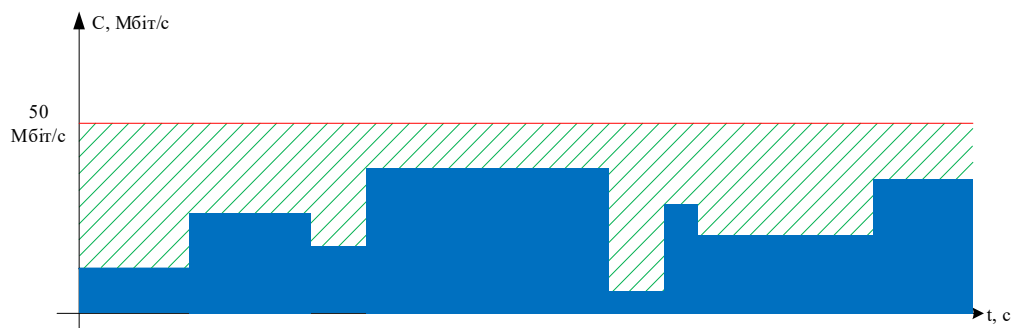


Рис. 2.5 Часова діаграма вимог пропускі здатності користувача LTE

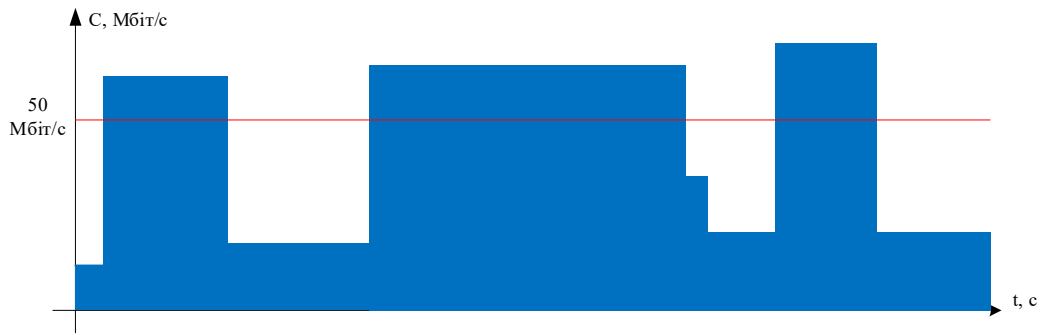


Рис. 2.6 Часова діаграма вимог пропускної здатності користувача Wi-Fi

Справедливим стає твердження, що можна задіяти невикористані у певні моменти часу ресурси LTE (заштрихована область). Це можна досягти наступним чином:

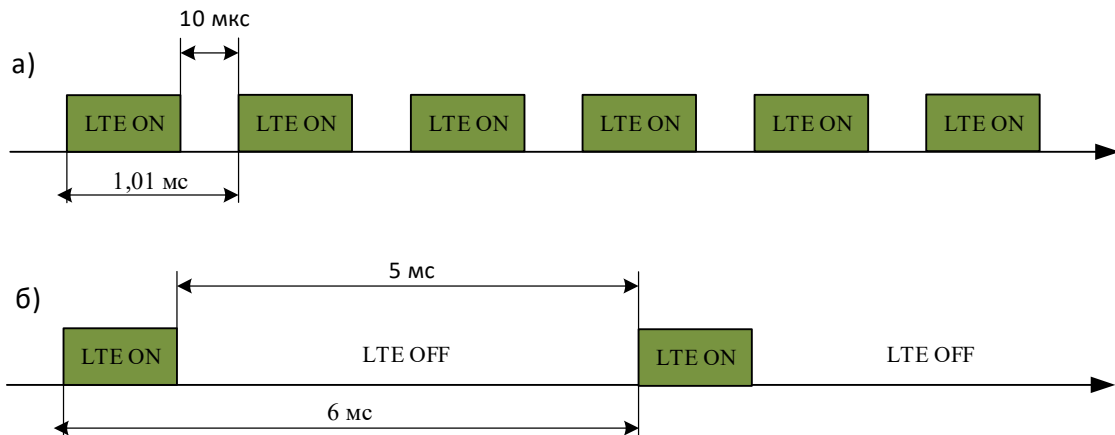


Рис. 2.7 Принцип роботи запропонованого методу адаптивного управління доступом до неліцензійного радіоканалу – а) висока швидкість передавання даних (б) низька швидкість передавання даних

На рис. 2.7 (а) зображено варіант, коли LTE доступається до середовища дуже часто, а Wi-Fi – навпаки. Таким чином, у користувача LTE зростає швидкість передавання. Рис. 2.7 (б) є протилежною ситуацією. Слід зауважити, що коли LTE має швидкий доступ до середовища, тоді Wi-Fi – повільний і навпаки. Комбінуючи ці два випадки (рис. 2.8), можна динамічно в часі змінювати інтервал  $\tau$ , відповідно до вимог користувача. Тому, змінивши пріоритет з LTE на Wi-Fi, можна буде передати більше пакетів, у проміжок часу 5 мс, ніж як це було на рисунку 2.7 за сумарний час передавання 6 мс і

LTE, і Wi-Fi. Іншими словами, максимальна швидкість каналу в такому випадку збільшиться для користувача Wi-Fi (рис.2.9).

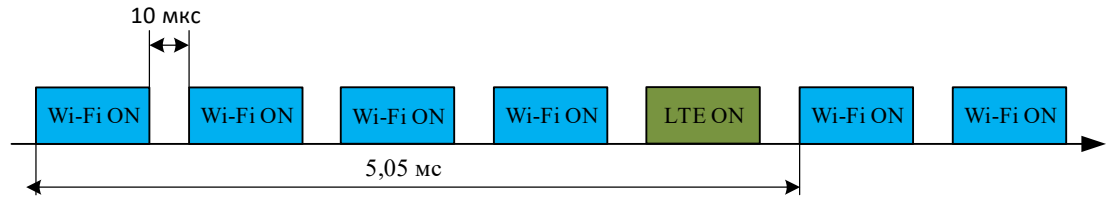
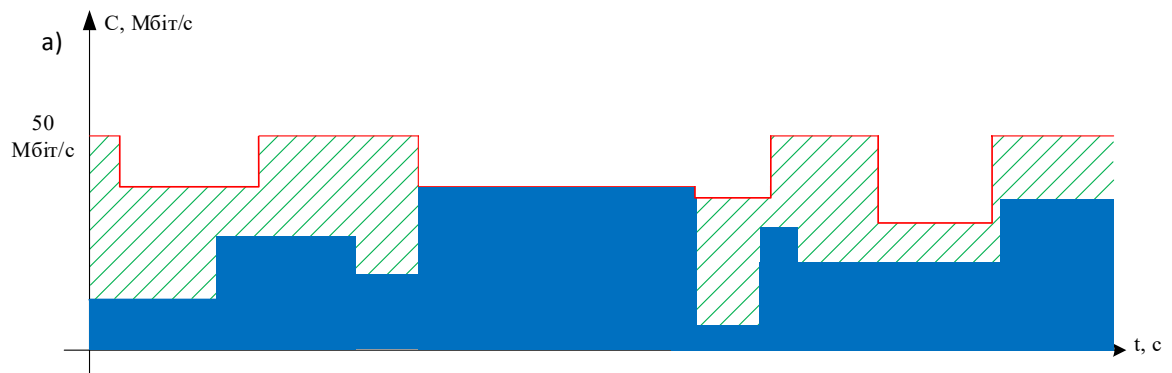
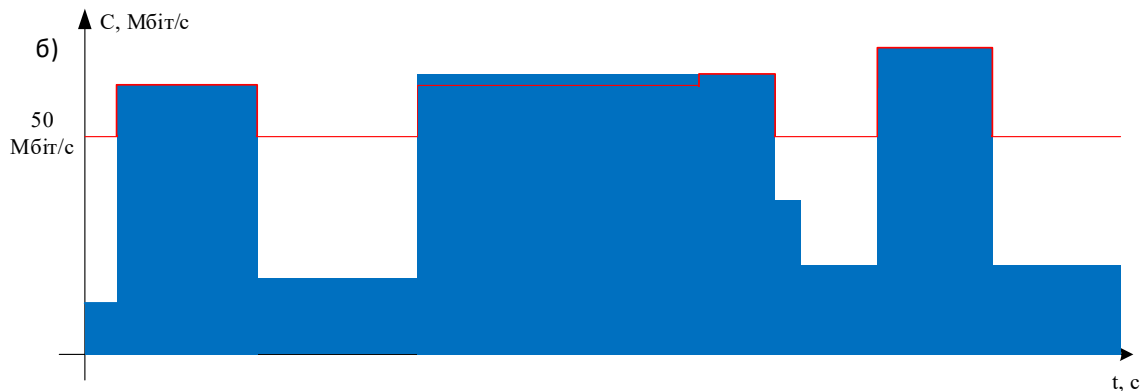


Рис. 2.8 Агресивний доступ Wi-Fi до середовища і відповідно повільний доступ LTE



а)



б)

Рис. 2.9 Часова діаграма вимог пропускної здатності для користувача LTE – а) та Wi-Fi –б) після застосування запропонованого методу

Як видно з рис. 2.9 а), у користувача LTE в моменти часу, коли ресурс каналу не використовувався на максимум, пропускна здатність знизилась, проте це ніяким чином не вплинуло на якість обслуговування. Проте запропоноване рішення дало змогу забезпечити QoS користувача шляхом виділення необхідної

пропускної здатності для Wi-Fi у ті відрізки часу, коли виникала потреба. Однак, є ділянка, де не можливо повністю забезпечити пропускну здатність для необхідної якості обслуговування Wi-Fi, не погіршивши при цьому QoS у LTE. У даному випадку, це кращий результат ніж дає відомий CSAT.

### **2.3 Алгоритм обслуговування черги каналного рівня в неліцензованій LTE-U/ Wi-Fi мережі для передавання даних, із забезпеченням необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку**

Для подолання наслідків короткочасних відмов каналу (інтерференція, низький рівень сигналу), що можуть виникнути у мережах Wi-Fi в умовах масового розгортання LTE-U, у роботі пропонується дисципліна обслуговування черги на каналному рівні, в основу якої вкладено наступні ідеї [12]:

1. Щоб не погіршити якість передавання відеопотоку отримувачам, для яких не було відмови каналу (тут і надалі для зручності опису будемо називати таких отримувачів «задоволеними якістю»), станція-джерело не повинна зменшувати кількість каналних ресурсів, які витрачаються на обслуговування цих отримувачів.

2. Щоб мінімізувати втрати якості передавання відеопотоку отримувачам, для яких відбулась відмова каналу (тут і надалі для зручності опису будемо називати таких отримувачів «незадоволеними якістю»), станція-джерело не повинна відкидати пакет після здійснення граничної кількості (Retry limit)  $RL=7$  спроб передавання пакета, надаючи можливість пакету бути переданим до тих пір, доки не буде перевищено обмеження на час доставляння пакета.

Щоб поєднати ці дві суперечливі на перший огляд ідеї, запропоновано відмовитись від дисципліни FIFO, яка використовується по замовчуванню в користь так званої модифікованої дисципліни обслуговування черги (PR.A-2), принцип роботи якої описано нижче. Перед передаванням пакета 1-ому отримувачу для якого відбулася відмова каналу, станція-джерело перевіряє, чи може ця передача викликати втрату пакетів для одного з «задоволених якістю»

отримувачів. Наступним кроком, для кожного пакета отримувачів «задоволених якістю», що знаходяться у загальній черзі перевіряється умова :

### **2.3.1 Алгоритм обслуговування черги каналного рівня з врахуванням додаткових (Retry limit) спроб передавання**

У разі, коли станції потрібно вибрати наступний пакет для передавання, вона переглядає чергу послідовно, починаючи з таких правил:

1. Ймовірність вибору пакету, що адресований отримувачу  $i$ , становить  $P_i$ . Відповідно, з ймовірністю  $1 - P_i$  відбуватиметься перехід до розгляду наступного пакета в черзі .

2. У випадку коли другий пакет для даного отримувача вже розглядався в якості кандидата для передавання в ході поточного перегляду черги і не був обраний для передавання, то здійснюється перехід до розгляду наступного пакета в черзі. Згідно опису процесу обслуговування пакетів дане правило означає, що в ході одного перегляду черги для кожного отримувача розглядається тільки його перший (головний) пакет в черзі.

3. Якщо досягнуто кінця черги, що означає завершення поточного перегляду черги, і при цьому пакет для передавання не вибрано, причому черга не пуста, то перегляд черги запускається заново, починаючи з початку черги.

4. Якщо черга пуста, станція відмовляється від передавання пакета.

Після успішного вибору пакета для передавання здійснюється спроба його передавання по каналу. Якщо пакет передано успішно, то даний пакет видаляється з черги, а станція заново починає перегляд черги. Якщо спроба передавання виявилась невдалою, то станція здійснює повторні спроби передавання даного пакета. Якщо всі відведені стандартом RL спроб передавання даного пакета виявляться невдалими, то пакет не видаляється з черги, для отримувача пакета детектується відмова каналу, а станція заново починає перегляд черги.

Приклад роботи базової модифікованої дисципліни обслуговування черги наведено на рис. 2.10. В даному прикладі в черзі знаходяться пакети для трьох отримувачів. Згідно викладеного алгоритму в якості кандидатів для

передавання розглядаються тільки головні пакети для кожного отримувача (в даному прикладі вони мають номери  $\{1,4,6\}$ ).

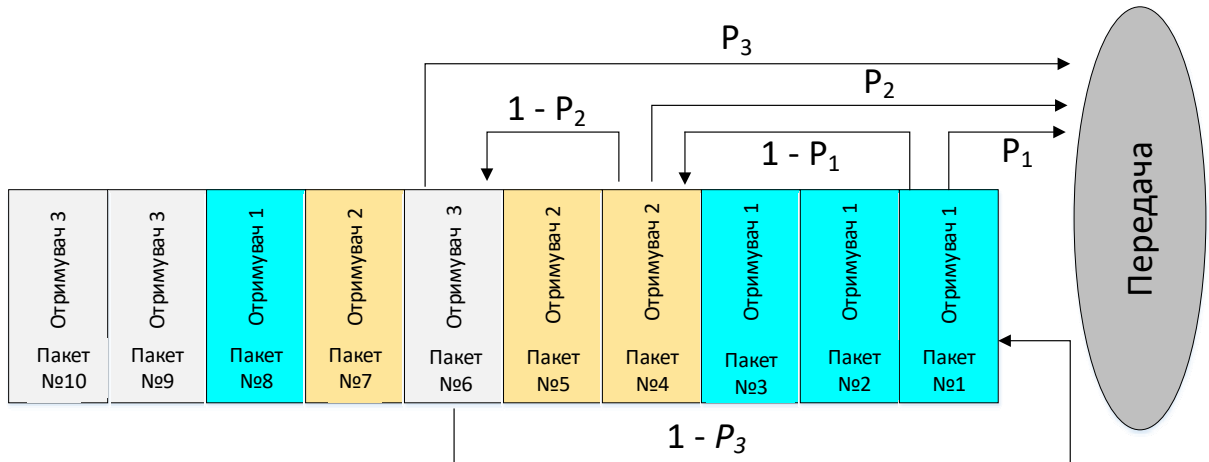


Рис. 2.10 Приклад роботи базової модифікованої дисципліни обслуговування черги [12]

Спочатку розглядається перший пакет у черзі, спроба передавання якого виконується з ймовірністю  $P_1$ , а з ймовірністю  $1 - P_1$  в якості кандидата на передавання розглядається пакет наступного отримувача. Якщо алгоритм перегляду черги дійде до пакета останнього отримувача, то спроба передавання цього пакета буде здійсненна з ймовірністю  $P_3$ , а з ймовірністю  $1 - P_3$  алгоритм знову перейде до розгляду в якості кандидата на передачу першого пакета в черзі. Таким чином, в результаті роботи даного алгоритму буде здійснена спроба передавання одного з пакетів під номерами  $\{1,4,6\}$ .

Якщо остання здійснена спроба передавання пакета отримувача  $i$  була успішною, то якість каналу вважається хорошою і значення ймовірності  $P_i$  вибирається рівним 1. Якщо ж останні RL спроб передавання пакета отримувачу  $i$  виявились невдалими, то значення ймовірності вибирається рівним  $P_i < 1$ , щоб не допустити блокування інших отримувачів і надати можливість для передавання адресованих їм пакетів.

Для того щоб визначити значення ймовірностей  $P_i$ , припустимо, що в черзі завжди знаходяться пакети  $X$  отримувачів, і для  $Y$  з них відбулась відмова каналу. Позначимо за  $P$  ймовірність вибрати для передавання пакет одному з  $z$

«незадоволених якістю» отримувачів, для яких відбулась відмова каналу, без уточнення, якому конкретно.

Нехай  $t_1$  і  $t_2$  – середній час обслуговування пакета у випадку, коли якість каналу до отримувача хороша, і у випадку, коли для отримувача відбулась відмова каналу, відповідно. Значення  $t_1$  і  $t_2$  можуть бути оцінені за допомогою збору статистичних даних в процесі роботи безпроводної мережі або ж вираховані теоретично, в припущенні відомої і однакової для всіх отримувачів ймовірності  $p$  успішної спроби передавання пакета поза проміжком відмови каналу наступним чином [36]:

$$t_1 = T + \frac{CW_{min} - 1}{2} \cdot \tau^{slot} + \sum_{k=1}^{RL-1} \left( T + \frac{\min(CW_{max}, 2^k CW_{min}) - 1}{2} \cdot \tau^{slot} \right) (1-p)^k, \quad (2.20)$$

$$t_2 = \sum_{k=0}^{RL-1} \left( T + \frac{\min(CW_{max}, 2^k CW_{min}) - 1}{2} \cdot \tau^{slot} \right), \quad (2.21)$$

де  $T = DIFS + T^{packet} + SIFS + T^{ack}$  - час передавання пакета ( $T^{packet}$ ) і кадру підтвердження ( $T^{ack}$ ), які визначаються швидкістю передавання, розмірами пакетів і протоколом фізичного рівня, який використовується в даному випадку;  $\tau^{slot}$  – тривалість часового слоту, яка визначається протоколом фізичного рівня;  $CW_{min}$  і  $CW_{max}$  - мінімальний і максимальний розмір конкурентного вікна;  $SIFS$  і  $DIFS$  – міжкадрові інтервали [36]. При обчисленні припускається, що поза проміжком відмови каналу спроба передавання пакета даних виявляється успішною з ймовірністю  $p$ , на проміжку відмови каналу спроба передавання пакета завжди невдала, кадр підтвердження завжди доставляється успішно, оскільки має малий розмір і передається з використанням найбільш робастної сигнально-кової конструкції, а при кожній наступній спробі передавання значення конкурентного вікна подвоюється до досягнення значення  $CW_{max}$  згідно методу DCF випадкового доступу.

На кожен відеопотік в середньому доводиться  $r = \frac{1}{X}$  доступних каналних ресурсів, в припущенні, що відеопотоки володіють однаковою інтенсивністю. Оскільки  $P$  – ймовірність вибрати для обслуговування пакет, то для одного із  $X$

– $Y$  «задоволених якістю» отримувачів ймовірність становитиме  $1 - P$ . Частка каналних ресурсів, що зайнята «незадоволеними якістю» отримувачами в такій ситуації складе:

$$r = \frac{P \cdot t_2}{t_1 - P \cdot (t_1 + t_2)}. \quad (2.22)$$

Щоб не зменшити кількість ресурсів, які виділяються на обслуговування «задоволених якістю» отримувачів, в припущенні, що в черзі знаходяться пакети для кожного з  $X$  отримувачів, достатньо, щоб частка ресурсів, які виділяються на обслуговування «задоволених якістю» отримувачів під час відмови каналу, не змінилась, що еквівалентно виконанню наступної умови:

$$\frac{P \cdot t_2}{t_1 - P \cdot (t_1 + t_2)} = \frac{Y}{X}. \quad (2.23)$$

Знаючи відношення  $\sigma = \frac{t_1}{t_2}$ , легко знайти значення ймовірності  $P$ :

$$P = \frac{Y \cdot \sigma}{X - Y + Y \cdot \sigma}. \quad (2.24)$$

Використовуючи значення  $P$  ймовірності вибрати для обслуговування пакет для одного з  $Y$  «незадоволених якістю» отримувачів, визначимо значення ймовірностей  $P_i$ ,  $i = 1, \dots, Y$ , вибрати для обслуговування пакет для кожного конкретного «незадоволеного якістю» отримувача. Для зручності припустимо, що отримувачі пронумеровані згідно з порядком їх головних пакетів в черзі. Підмітимо, що головні пакети для «незадоволених якістю» отримувачів зазвичай знаходяться в черзі перед пакетами для «задоволених якістю» отримувачів, тому перших  $Y$  отримувачів будемо вважати «незадоволених якістю». Для надання обом отримувачам однакових шансів бути обслуженими, необхідне виконання наступного співвідношення:

$$P_1 = P_2 - P_1 \cdot P_2 \quad (2.25)$$

Розглядаючи таким чином послідовно кожного з  $Y$  «незадоволених якістю» отримувачів, отримуємо:



$$\begin{aligned}
 P_2 &= P_3 - P_2 P_3 \\
 &\dots \\
 P_{Y-1} &= P_Y - P_{Y-1} P_Y.
 \end{aligned}
 \tag{2.26}$$

Ймовірність не вибрати для обслуговування пакет для жодного з  $Y$  «незадоволених якістю» отримувачів складає  $\prod_{i=1}^Y (1 - P_i)$ . З іншої сторони, ця ж ймовірність по визначенню рівняється  $1 - P$ . Таким чином, необхідне виконання наступної рівності:

$$1 - P = \prod_{i=1}^Y (1 - P_i)
 \tag{2.27}$$

Неважко показати, що наступні значення ймовірностей є рішенням (2.25), (2.26), (2.27):

$$\left\{ \begin{array}{l} P_1 = \frac{P}{Y}, \\ P_i = \frac{P_{i-1}}{1 - P_{i-1}}, \quad i = 2, \dots, Y. \end{array} \right.
 \tag{2.28}$$

### 2.3.2 Алгоритм вибору пакета для передавання з черги канального рівня з врахуванням тривалості очікування пакету

Згідно з базовою модифікованою дисципліною обслуговування черги назвемо його (PR.A-1) значення ймовірності  $P_i$  вибору пакета для передавання отримувачу  $i$  визначаються з припущення, що на кожний відеопотік витрачається однакова кількість ресурсів станції-джерела, що правильно в дуже обмеженому класі сценаріїв. Таке припущення суттєво звужує область застосування базової модифікованої дисципліни обслуговування черги, оскільки, наприклад, відеопотоки можуть суттєво відрізнитись по структурі і інтенсивності. Навіть якщо потоки повністю ідентичні, якість каналу до різних отримувачів, яким ці відеопотоки передаються, може суттєво відрізнитись, що, зокрема, веде до відмінності в середньому часі обслуговування пакета.

Крім цього було виявлено, що втрати пакетів для «задоволеного якістю» отримувача можуть відбуватись не тільки на інтервалі відмови каналу для «незадоволеного якістю» отримувача безпосередньо, а вже після його

закінчення. Це пов'язано з тим, що під час відмови каналу на початку черги утворюється велика кількість пакетів для «незадоволеного якістю» отримувача (пакети для «незадоволеного якістю» отримувача відкидаються з черги тільки через перевищення обмеження на час доставки пакета), послідовна передача яких після завершення відмови каналу потребує багато часу, що призводить до суттєвої паузи в обслуговуванні пакетів для «задоволеного якістю» отримувача.

У даному розділі розробляється покращена модифікована дисципліна обслуговування черги передавання пакетів. На відміну від базової дисципліни, яка розглядає проблему блокування черги головним пакетом тільки під час погіршення якості з'єднань для «незадоволених якістю» отримувачів, запропонована в даному розділі дисципліна має два етапи, один з яких відноситься безпосередньо до інтервалу, на якому погіршується якість з'єднань для «незадоволених якістю» отримувачів, а другий – до інтервалу відновлення нормального стану системи після завершення відмови каналу. На першому етапі дана дисципліна, на відміну від базової, враховує відмінності в часі обслуговування і інтенсивності відеопотоків, що передаються, а також дозволяє швидше детектувати момент завершення відмови каналу для «незадоволеного якістю» отримувача. На другому етапі дисципліна приймає до уваги той факт, що обслуговування пакетів для «незадоволених якістю» отримувачів, що скупчились на початку черги, може вповільнити обслуговування пакетів для «задоволених якістю» отримувачів, що призведе до відкидання цих пакетів і погіршення якості відеопотоків, які приймаються «задоволеними» отримувачами. У зв'язку з цим на другому етапі пакети для «незадоволених якістю» отримувачів іноді можуть не обслуговуватись, якщо це потягне за собою відкидання пакетів для «задоволених якістю» отримувачів. Розглянемо обидва етапи роботи дисципліни більш детально.

### **Перший етап**

На першому етапі роботи покращеної модифікованої дисципліни для врахування відмінностей у часі обслуговування і інтенсивності відеопотоків, що передаються, пропонується змінити алгоритм обрахування ймовірності  $P_i$ .

Нехай станція-джерело передає  $X$  відеопотоків різним отримувачам і для  $Y$  отримувачів в даний момент часу відбулась відмова каналу. Без втрати спільності будемо вважати, що потоки, які призначені отримувачам, для яких відбулась відмова каналу, мають номери  $i = 1, \dots, Y$ .

Нехай  $\lambda_i$  – інтенсивність надходження в чергу пакетів  $i$ -го відеопотоку, під якою розуміється кількість пакетів, які надходять за 1 секунду,  $t_i$  – середній час обслуговування пакета  $i$ -го відеопотоку поза інтервалом відмови каналу.

Коли якість каналу для всіх отримувачів хороша, то на  $k$ -й відеопотік в середньому доводиться:

$$r = \frac{\lambda_k t_k}{\sum_{i=1}^X \lambda_i t_i} \quad (2.29)$$

доступних каналних ресурсів. Тут і надалі припускається, що мережа функціонує в режимі, близькому до насичення.

Знайдемо  $t_1$  і  $t_2$ . На першому етапі роботи покращеної дисципліни станція-джерело здійснює по одній спробі передавання пакета «не задоволеному якістю» отримувачу, але при цьому отримує можливість здійснювати їх частіше, що дозволить детектувати відновлення якості з'єднання швидше, витративши при цьому такий же об'єм каналних ресурсів. Для цього в якості значення  $t_2$  варто використати середній час, необхідний для здійснення однієї спроби передавання пакета для «незадоволеного якістю» отримувача. Для визначення  $t_1$  в даній версії дисципліни середній час обслуговування пакета поза інтервалом відмови каналу усереднюється по всіх потоках, для яких не відбулась відмова каналу:

$$t_1 = \frac{\sum_{i=Y+1}^X \lambda_i t_i}{\sum_{i=Y+1}^X \lambda_i}. \quad (2.30)$$

Значення  $\lambda_i$  і  $t_i$  оцінюються на основі збору статистичних даних в процесі роботи безпроводної мережі.

Шукаємо  $P$  – ймовірність вибрати на обслуговування пакет для одного з «незадоволених якістю» отримувачів. Частка каналних ресурсів, яка зайнята «незадоволеними якістю» отримувачами поза інтервалом відмови каналу, складає:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^Y \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^X \lambda_i t_i} \quad (2.31)$$

Як і раніше, вимагаємо, щоб відмова каналу не вплинула на розподілення каналних ресурсів між отримувачами, що в припущенні знаходження в черзі пакетів для всіх отримувачів еквівалентно виконанню наступної рівності:

$$\frac{P \cdot t_2}{t_1 - P \cdot (t_1 + t_2)} = \frac{\sum_{i=1}^Y \lambda_i t_i}{\sum_{i=1}^X \lambda_i t_i}. \quad (2.32)$$

Позначивши  $\sigma = \frac{t_1}{t_2}$ ,  $a = \sum_{i=1}^Y \lambda_i t_i$ ,  $b = \sum_{i=1}^X \lambda_i t_i$ , легко виразити значення ймовірності  $P$ :

$$P = \frac{a \cdot \sigma}{b + a \cdot \sigma - a}. \quad (2.33)$$

Далі необхідно визначити значення ймовірностей  $P_i$ ,  $i = 1, \dots, Y$ , вибору на обслуговування пакета для кожного конкретного отримувача  $i$ , для якого відбулась відмова каналу. Рішення цієї задачі вже розглядалось при описі базової модифікованої дисципліни обслуговування черги і визначається формулою (2.28).

### Другий етап

Після того, як зв'язок між станцією-джерелом та  $i$ -тим отримувачем для якого відбувалася відмова каналу відновлюється, то ймовірність передачі  $P_i$  становить 1 (зокрема отримувач 1, пакет 1, 2, 3 показаних на рис. 2.11а). У цей час на початку черги знаходяться пакети, призначені для даного отримувача та відбувається його обслуговування. Відповідно послідовне обслуговування згідно алгоритму Adaptive Round Robin всіх цих пакетів 1, 2, 3 може зайняти тривалий час і призвести до відкидання з черги пакетів для «задоволених

якістю» отримувачів (зокрема отримувач 2, пакети 4, 5, 7 показаних на рис. 2.11б ). Щоб уникнути втрати пакетів для «задоволених якістю» отримувачів, на другому етапі роботи дисципліни пропонується відкласти передачу пакета для «незадоволеного якістю» отримувача (рис.2.11б), якщо вона може призвести до втрати пакетів для «задоволених якістю» отримувачів.

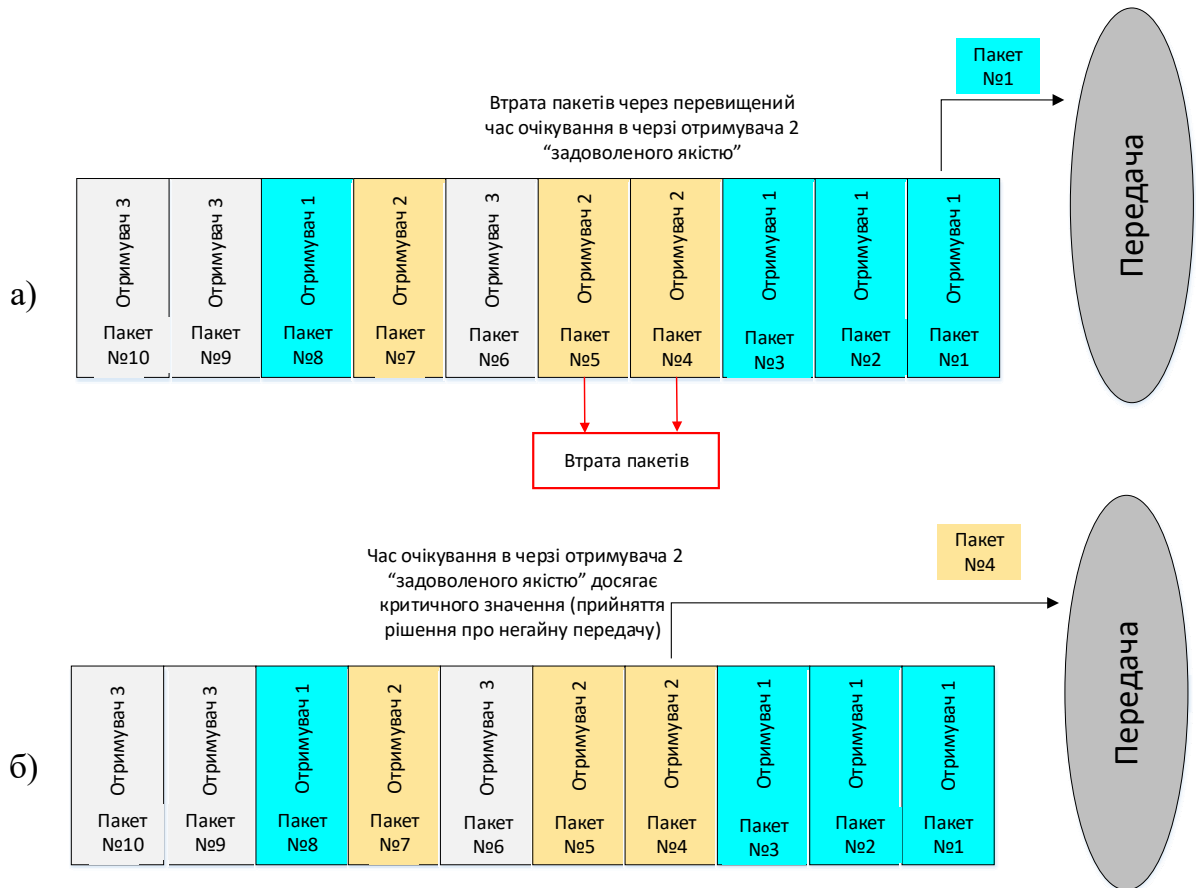


Рис. 2.11 Принцип роботи існуючого алгоритму обслуговування черг Adaptive Round Robin на каналному рівні – а) та пропонуваного у роботі алгоритму обслуговування черг із врахуванням допустимого часу очікування PR.A-2

Згідно запропонованого алгоритму обслуговування черг із врахуванням допустимого часу очікування PR.A-2, перед передаванням пакета 1-ому отримувачу для якого відбулася відмова каналу, станція-джерело перевіряє, чи може ця передача викликати втрату пакетів для одного з «задоволених якістю» отримувачів. Наступним кроком, для кожного пакета отримувачів «задоволених якістю», що знаходяться у загальній черзі перевіряється умова :

$$T_{\max} > t_1 + \sum_{j=4}^i t_j, \quad (2.34)$$

де  $T_{\max}$  – максимальна величина затримки  $i$ -го пакета,  $t_1$  – час обслуговування пакета для «незадоволеного якістю» отримувача та  $t_j$  – сумарний час перебування в черзі  $j$ -тих пакетів для «задоволених якістю» отримувачів до  $i$ -го пакета включно.

Згідно даної умови час перебування пакетів для «задоволених якістю» отримувачів не повинен перевищувати значення максимально можливої величини затримки пакетів при якій не відбувається погіршення якості обслуговування відео потоків реального часу. Таким чином досягнувши критичного значення часу очікування у черзі, першочергово передаватимуться пакети користувачів для яких не відбувалося відмови каналу.

#### **2.4. Метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi**

Виходячи з мети роботи та поставлених у ній задач розроблено метод адаптивного формування структури радіодоступу з гарантуванням необхідної якості обслуговування та можливістю широкосмугового передавання. Для реалізації цього методу вдосконалено процес роботи базових станцій усіх рівнів.

Оскільки абонентське навантаження локалізоване нерівномірно, звичайний гексагональний шаблон розміщення базових станції є недостатньо ефективним, адже в такому випадку буде спостерігатися нерівномірне завантаження базових станції, адже одні будуть перевантажені, інші ж будуть простоювати.

Максимально ефективною буде робота рівня радіодоступу, який формується залежно від статистики локалізації абонентського навантаження, яка є в оператора мобільного зв'язку. В місцях де спостерігається велике абонентське навантаження, малі комірки мають бути встановлені щільніше, в місцях з малим абонентським навантаженням навпаки.

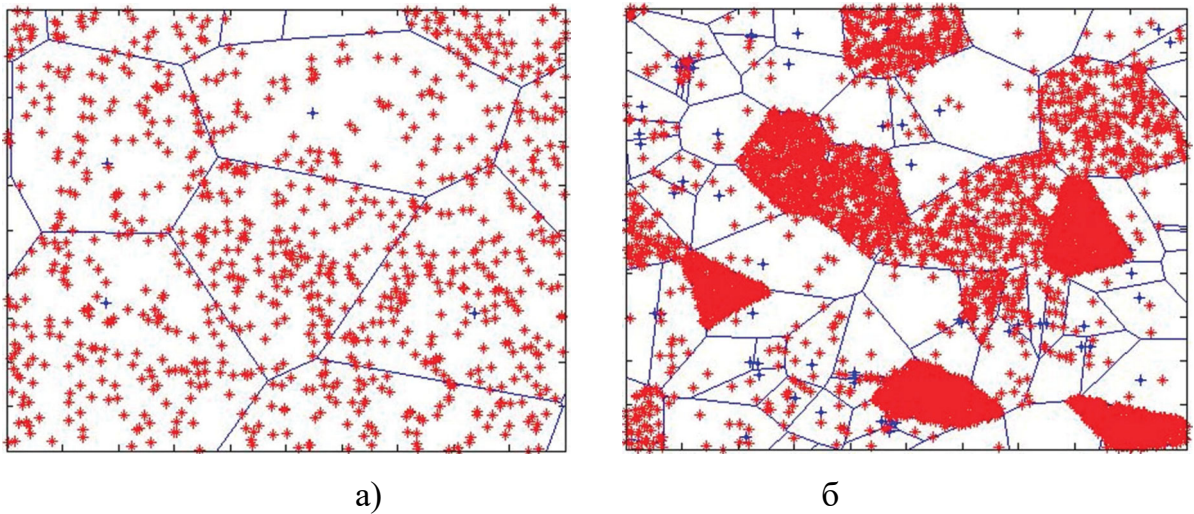


Рис. 2.12 Формалізація залежно від статистики локалізації абонентського навантаження: а) низьке рівномірне навантаження; б) високе не рівномірне навантаження

У процесі проектування рівня радіодоступу мобільних мереж із таким підходом до розміщення базових станцій постає задача побудови зон близькості для всіх точок площини, для яких відстань  $s$  до об'єктів множини  $\{a_i\}$  є мінімальною. Ця задача вирішується з використанням принципів стохастичної геометрії а саме теселяції Вороного.

За допомогою цього методу можна отримати картину рівня радіодоступу подібну до зображеної на рис. 2.13, де точками зображені базові станції, багатокутники навколо базових станції – ідеалізована зона дії окремої базової станції, утворена з використанням теселяції Вороного.

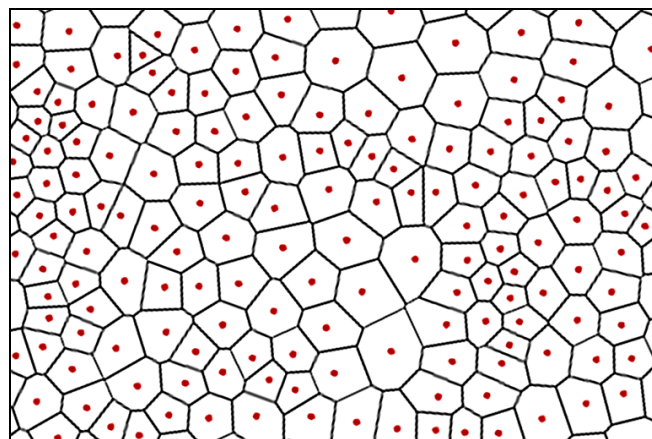


Рис. 2.13 Вигляд одного рівня покриття, сформованого згідно принципів Вороного

Теселяція Вороного дозволяє поділити територію на області, що не перетинаються відповідно до розміщення базових станцій. Коротко розглянемо алгоритм її побудови.

Нехай маємо масив базових станцій  $BS_1 - BS_N$ , де  $N = 5$  і деяку площу покриття, яку необхідно розбити на зони (рис 2.14 а). Перш за все потрібно визначити точки, що знаходяться посередині відрізка між сусідніми станціями. Позначимо ці точки  $BS_{ij}$ , де  $i, j$  – індекси сусідніх станцій (рис.2.14 б).

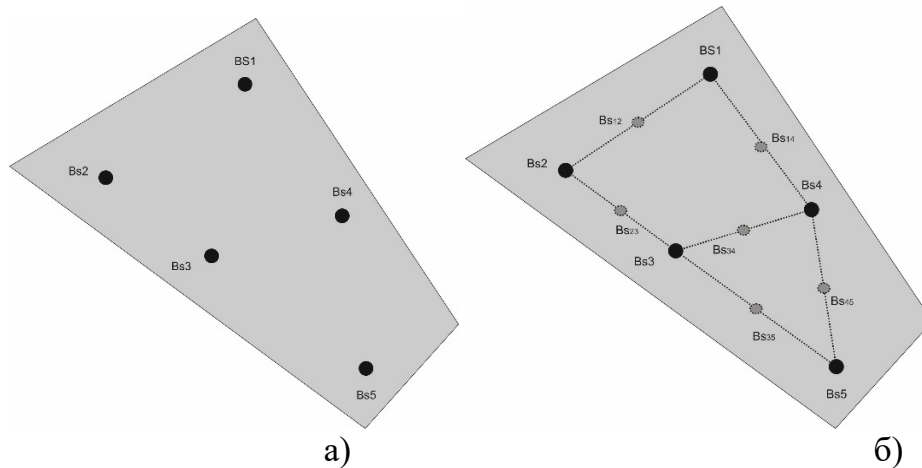


Рис. 2.14 Принципи теселяції Вороного: а) розміщення базових станцій; б) знаходження точок для побудови серединних перпендикулярів

Через точки  $BS_{ij}$  проводимо перпендикуляри до відрізка  $(BS_i, BS_j)$ . Знаходимо точки перетину перпендикулярів між собою або із границею досліджуваної ділянки (рис.2.15-а). з точок перетину формуються відрізки (рис. 2.15-б).

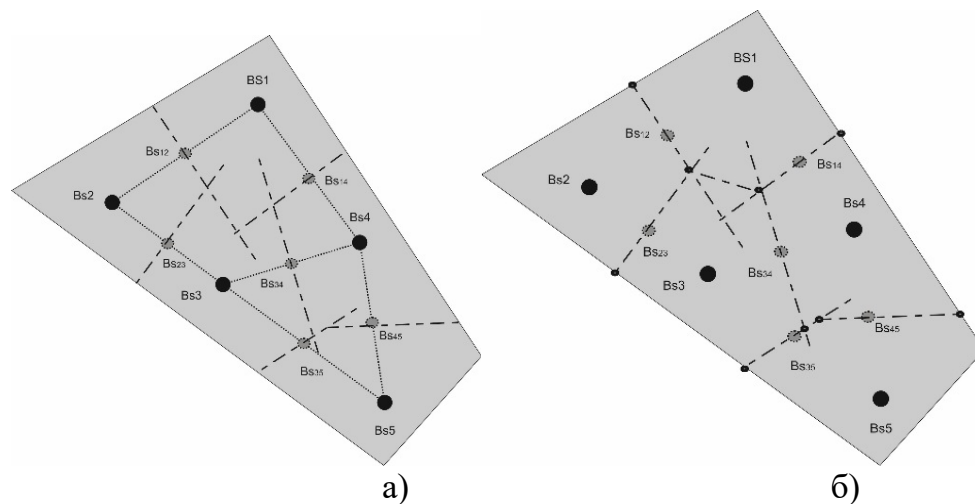


Рис. 2.15 Побудова серединних перпендикулярів – а) і визначення точок їх перетину – б)



Замкнені фігури навколо базових станцій – є зоною дії базових станцій (рис. 2.16). Застосування такого підходу дозволяє максимально ефективно розмежувати зони дії кожної базової станції (не лише в межах класичного «шестикутника») та забезпечити абонентів на межі розподілу комірок послугами з низьким рівнем інтерференційних завад.

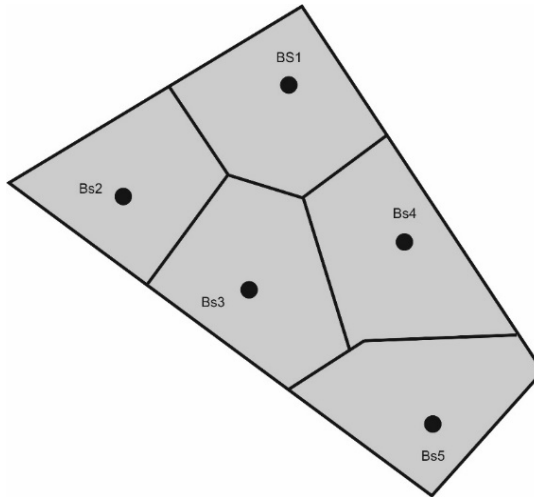


Рис. 2.16 Площа покриття розділена з допомогою теселяції Вороного

Базові станції рівня пікокомірок доцільно розміщувати згідно принципів стохастичної геометрії з подальшою теселяцією Вороного. Оскільки фемтокомірки в більшості встановлюються всередині приміщень і мають малий радіус дії, їх варто встановлювати лише в місцях великого скупчення абонентського навантаження, таких, як офіси, вокзали і т.д.

Важливу роль для оператора має енергоефективність мережі, оскільки в гетерогенних мережах у порівнянні з однорівневими з'являється велика кількість малих комірок. Хоча вони є малопотужними, але в сукупності рівень малих комірок використовує багато електроенергії. При цьому слід врахувати, що абонентське навантаження розподілене нерівномірно по території. Велику частину малі комірки не обслуговують абонентів взагалі. Для оператора було б вигідно, щоб базові станції працювали лише тоді, коли це потрібно і приносить оператору прибуток. Коли базові станції не обслуговують жодного абонента слід їх переводити в режим енергозбереження і тим самим формувати структуру Radio Access Network (RAN), яка буде підлаштовуватися під потреби абонентів, тобто параметри рівня радіодоступу будуть динамічно змінюватися

залежно від абонентського навантаження та врахування покриття карти Wi-Fi. Знаючи розташування точок доступу Wi-Fi можна уникнути інтерференції шляхом вибору технології обслуговування. Наприклад в місцях із щільним покриттям Wi-Fi пропонується обслуговувати абонентів технологією LTE. У місцях де немає Wi-Fi покриття абонентів можна обслуговувати використовуючи інтегровані базові станції які працюють, як на ліцензійних частотах LTE так і на неліцензійних частотах LTE-U та дасть змогу забезпечити більшу швидкість передавання даних для кінцевих користувачів.

Метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу базується на трьох основних етапах представлених у вигляді алгоритмів (рис.2.17) [4]. На першому етапі на основі сигналізаційних даних від абонентів здійснюється локалізація навантаження та створюється карта навантаження. Аналогічно припускається, що операторам відомо карту покриття технологією Wi-Fi. На другому етапі методу аналізується інформація, отримана в результаті виконання першого етапу та на її основі приймається рішення про те, яким чином обслуговувати абонентів. На третьому етапі приймається автоматизоване рішення про модифікацію, або формування (якщо не була створена до цього моменту) структури рівня радіодоступу.

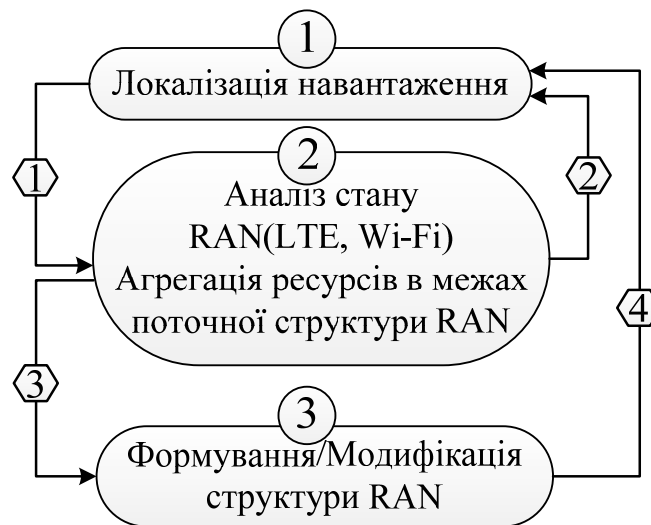


Рис. 2. 17 Блок схема методу адаптивного формування структури рівня радіо доступу

Розглянемо детально роботу даного алгоритму. Усі абоненти на початковому етапі підключаються до макрокомірки  $M(S)=\{MC_1, MC_2, \dots, MC_j\}$ . Кожен абонент характеризується набором параметрів:

- Порогова потужність (Pпор.) випромінювання від абонента до базової станції;
- SINR;
- QoS\_class.

Згідно цих параметрів UE формує запит на обслуговування (QoSrequest), який відсилається по каналу «вверх» (Uplink, або UL) до базових станцій. Варто зазначити, що у всіх базових станціях малих комірок, що знаходяться в режимі енергозбереження є вимкнутим канал «вниз» (Downlink), увімкнутим залишається лише канал «вверх». Детальний принцип роботи першого етапу алгоритму зображено на рис.2.18.

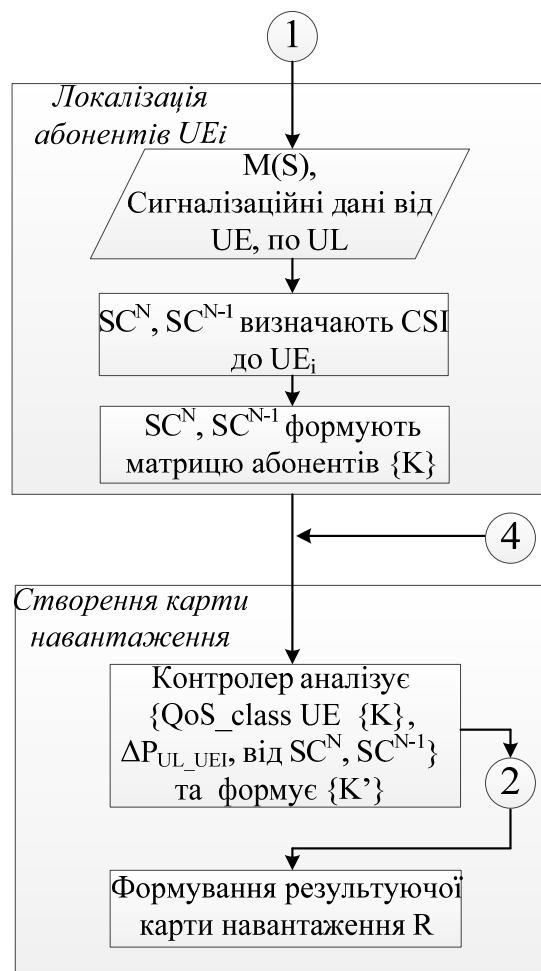


Рис. 2.18 Алгоритм локалізації абонентського навантаження та створення карти навантаження

Після того, як на вхід базової станції макро рівня прийшла інформація від абонентів, вона дасть вказівку малим коміркам, використовуючи UL, розрахувати Channel State Information (CSI), а саме вектор зміни відстані до базової станції (БС) за рахунок зміни потужності сигналу ( $\Delta P_{UL\_UEi}$ ), в результаті чого для кожної малої комірки сформується матриця «допустимих абонентів»  $\{K\}$ , яка містить інформацію про всіх абонентів, що потенційно можуть бути обслужені конкретною базовою станцією.

Формування карти навантаження відбувається наступним чином: контролер проводить аналіз матриць  $\{K_i\}\{S_i\}$  ( $\{K_i\}$ -матриця абонентських пристроїв, які потенційно можуть бути обслужені БС,  $\{S_i\}$ -матриця абонентських пристроїв, які вже обслуговуються БС) та «відкидання» абонентів, які не можуть бути обслужені через невідповідність параметрів якості.

$$K_i = [UE_{reserv}, UE_{reserv}, \dots, UE_{reserv}], S_i = [UE_{current}, UE_{current}, \dots, UE_{current}] \quad (2.35)$$

де  $UE_{reserv}$  - абонентський пристрій, який знаходиться в радіусі дії комірок  $SC^N$ ,  $SC^{N-1}$  та потенційно може бути нею обслужений,  $UE_{current}$  - абонентський пристрій, який обслуговується в даний момент  $SC^N$ ,  $SC^{N-1}$ .

В результаті для кожної базової станції рівня  $SC^N$ ,  $SC^{N-1}$  утворюються матриці  $\{K'\}$ , які міститимуть інформацію про абонентів, яких потрібно обслужити конкретною базовою станцією. Керуюча інформація передається на нижчий рівень і формується результуюча карта поточного навантаження  $R_i$ .

$$R_i = \sum K_i + \sum S_i \quad (2.36)$$

Для кожної з малих комірок утворюється матриця абонентів  $\{K'\}$  (2.37), які потенційно повинні бути обслужені конкретною базовою станцією.

$$K'_i = K_i - \sum UE_{notserviced} \quad (2.37)$$

$UE_{notserviced}$  - абонентський пристрій, який не може бути обслужений конкретною базовою, через невідповідність параметрів низхідного каналу або мобільності.

На основі керуючої інформації та карти поточного навантаження формується матриця  $\{R'\}$ (2.38), яка містить в собі інформацію про стан абонентів, що вже є на обслуговуванні структурою рівня радіодоступу та інформацію про абонентів, що потенційно повинні бути обслужені конкретною базовою станцією.

$$R'_i = \sum K'_i + \sum S_i \quad (2.38)$$

Роботу другого етапу алгоритму, а саме аналіз стану рівня радіодоступу зображена на рис. 2.19

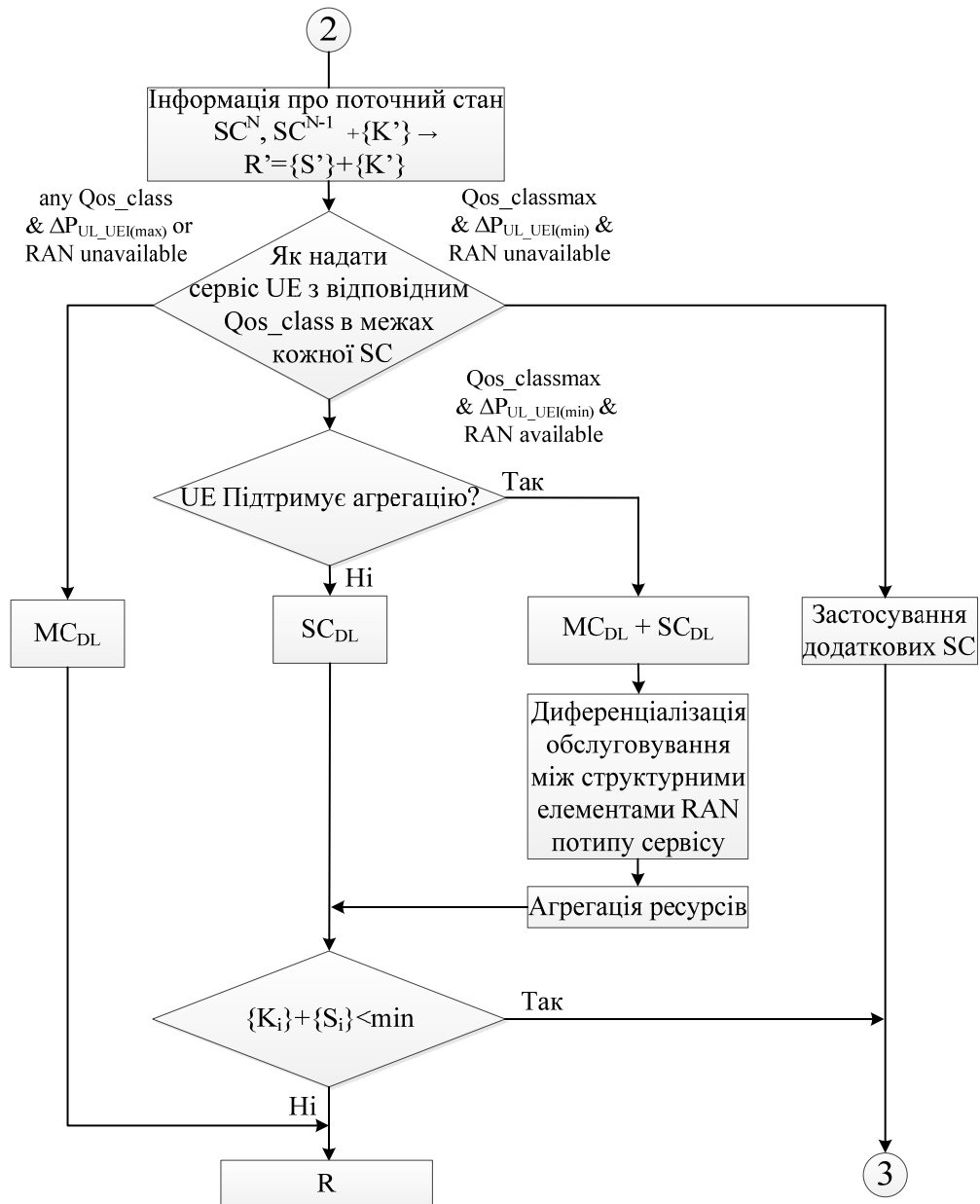


Рис.2.19 Алгоритм аналіз стану RAN [11]

Система вирішує як надати сервіс  $UE$  в межах кожної базової станції. Вибір робиться на основі трьох правил:

1) Якщо в  $UE$  високе значення вектора зміни відстані до БС, то обслуговування відбуватиметься макрокомірною  $MC_{Di}$ . Також макрокомірною будуть обслуговуватися абоненти з будь-яким  $QoS\_class$ , якщо немає можливості їх підключення до альтернативної  $SC$  малої комірки.

2) Якщо в абонента низьке значення вектора зміни відстані до БС та великі вимоги до трафіку  $QoS\_classmax$  і підключення його до активних структурних елементів рівня радіодоступу не спричинить перенавантаження, то система підключить його до відповідної  $SC$  і за можливості використовуючи агрегацію до базової станції  $MC_{Di}$ . Таким чином за рахунок агрегації частот забезпечується краща якість обслуговування. Після цього проводиться перевірка матриць  $\{Ki\}$  і  $\{Si\}$ , щоб з'ясувати чи є потреба у зміні структури рівня радіодоступу, тобто вимкненні малих комірок. Якщо така потреба виникла, то керування передається до третього блоку, якщо ж ні, то перебудовується карта поточного навантаження і керування передається на перший етап загального алгоритму.

3) Якщо в  $UE$  низьке значення вектора зміни відстані до БС та абонент потребує великих обсягів трафіку  $QoS\_classmax$  і немає можливості підключення його до активних структурних елементів рівня радіодоступу виноситься рішення про застосування додаткових малих комірок та керування передається на третій етап загального алгоритму.

Після отримання інформації про  $UE_i$ , що мають бути обслужені конкретною базовою станцією та матриці  $\{Si\}$ , що містить інформацію про активних абонентів малих комірок і використовуючи дані про розміщення базових станцій та зону їх покриття, контролер вирішує які базові станції та їхню кількість необхідні для обслуговування поточного навантаження. Як результат відбувається перебудова структури мережі рівня радіодоступу (рис. 2.20а )

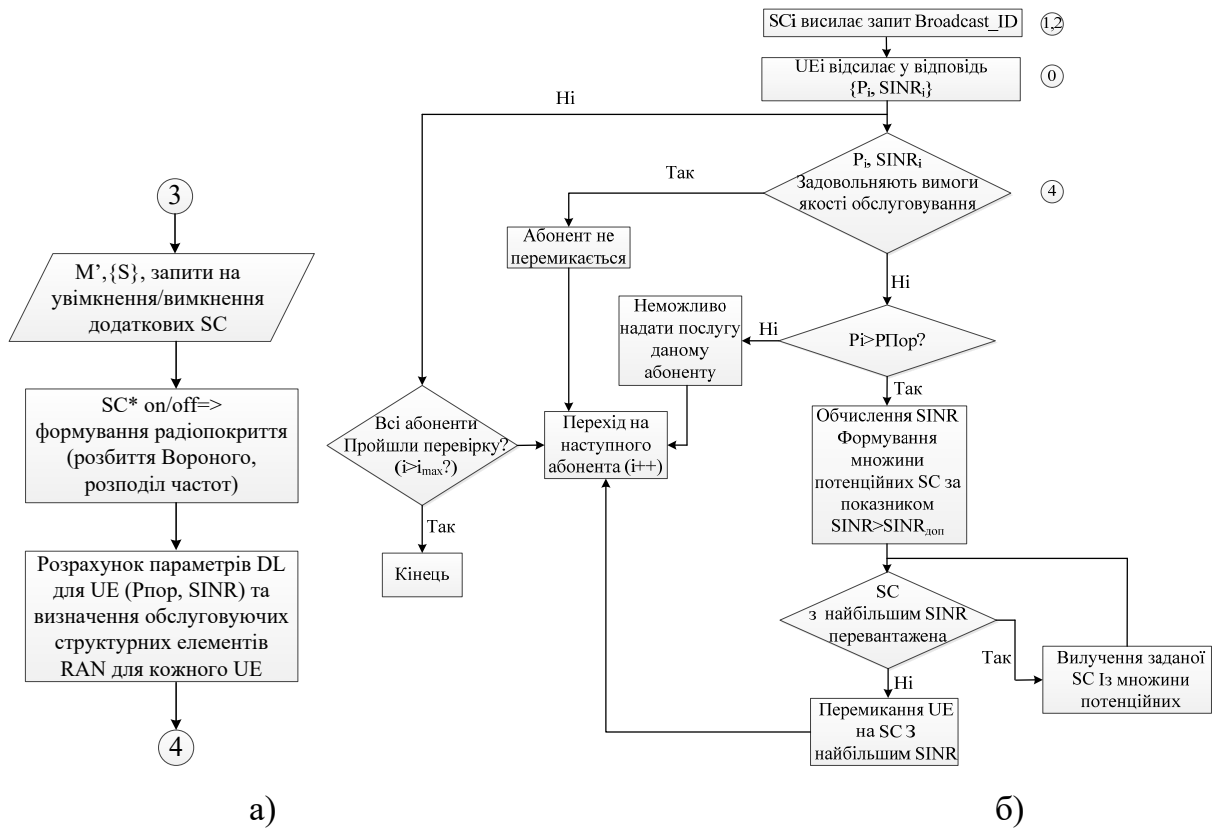


Рис. 2.20 а) Принцип роботи третього етапу методу  
 б) Розрахунок параметрів DL для UE та визначення обслуговуючих структурних елементів рівня радіодоступу для кожного UE

Далі здійснюється розрахунок та перевірка параметрів DL для UE та визначення обслуговуючих структурних елементів рівня радіодоступу для кожного UE<sub>i</sub> згідно алгоритму представлено на рис. 2.20 б).

Кожна SC формує множину абонентів, для яких значення прийнятої потужності сигналу більше деякого порогового значення  $P_{пор}$ . Для цього кожна SC посилає ширококомовний ехо-запит, що містить ідентифікатор даної SC до всіх абонентів в зоні своєї дії. Кожен UE, отримавши запит відповідає на нього вказавши значення потужності прийнятого сигналу, інтерференційних завад і шумів в тому ж діапазоні ( $P_i$ ,  $SINR_i$ ). Ці дані передаються до контролера. Він порівнює отримані значення потужності з пороговим і відкидає тих абонентів, у яких прийняте значення менше від порогового, адже цих абонентів неможливо обслуговувати, оскільки жодна з комірок не має достатньої потужності для цього. Тоді для кожного абонента з отриманої множини

формується множина  $SC$ , для яких показник  $SINR$  є більшим за допустиме значення. Ці  $SC$  формують множину потенційних абонентів, які могли б обслуговувати абонента. Далі з множини потенційних вибирається  $SC$  яка може обслужити абонента з найбільшим показником  $SINR$  і перевіряється, чи не є вона перевантаженою. Якщо вибрана  $SC$  є перевантаженою вона вилучається з множини потенційних і процес повторюється знову, доки не буде вибрана  $SC$  яка може обслуговувати абонента. Тоді контролер дає вказівку на перемикання абонента до вибраної  $SC$ . Якщо ж усі  $SC$  виявляються перевантаженими абонента обслуговує макрокомірка. Якщо макрокомірка перевантажена, то застосовується обслуговування абонентів за технологією LTE-U, яка використовує 5ГЦ неліцензійний діапазон Wi-Fi. Після виконання цих дій система повертається до виконання кроку 3 (блок створення карти навантаження).

Залежно від параметрів мобільності, послуг, якості сигналу абонентів і завантаженості базових станцій, абоненти обслуговуються коміркою певного радіусу відповідно до таких міркувань:

- Абоненти які здійснюють телефонні розмови, повинні завжди обслуговуватися макрокоміркою, оскільки тоді забезпечується мінімальна кількість хендверів, а сама телефонна розмова використовує мало ресурсів базової станції. Абоненти, які користуються послугою передавання даних, але їх трафік є малий, якщо це можливо, повинні бути обслужені макрокоміркою.
- Високомобільні абоненти, якщо це можливо, повинні обслуговуватися коміркою найбільшого радіусу.
- Малорухомих абонентів, що потребують високої пропускної здатності варто обслуговувати малими комірками, адже таким чином розвантажується макропокриття, яке, за рахунок цього може бути використане для обслуговування інших абонентів.

Використання алгоритму адаптивного формування рівня радіодоступу дозволяє покращити такі параметри мережі:

- 1) Зменшити енергоспоживання



Перехід малих комірок в енергозберігаючий режим дає суттєвий вииграш в електроенергії, оскільки в цьому режимі весь передавальний комплекс, такий, як передавальні антени, підсилювачі та ін. є виключеними [11].

Звичайно, що величина виграшу в електроенергії залежить від типу базової станції. Для прикладу візьмемо параметри базової станції Huawei AtomCell BTS3202B (табл.2.1).

Таблиця 2.1

Параметри базової станції Huawei AtomCell BTS3202B

Виробник	Модель	Радіус дії, м	Споживча потужність, при звичайному режимі роботи, Вт/ год	Споживча потужність, режим енергозбереження, Вт/ год
Huawei	AtomCell BTS3202B	200	14.7	7.0

При роботі у звичайному режимі енергоспоживання однієї такої базової станції становить 14.7 Вт, а при роботі в енергозберігаючому режимі – 7 Вт, економія електроенергії становить 55%.

Слід зазначити, що в мережах 5G малі комірки будуть розміщуватися дуже щільно, тому питання енергоефективності є дуже важливим [9].

2) Мінімізувати інтерференційні завади між базовими станціями  
Внутрішньоканальна інтерференція залежить від середньої відстані між комірками одного рівня. Використання даного алгоритму дозволить зменшити взаємні інтерференційні завади від базових станцій, що знаходяться неподалік, внаслідок зменшення кількості активних базових станцій в кожен момент часу і як наслідок покращення стану DL для частини абонентів.

3) Зменшення частоти хендверів для абонентів малих комірок.

Частота хендверів – показник якості обслуговування. Вона залежить від середньої відстані між базовими станціями. Коли абонент, що обслуговується однією базовою станцією переходить в зону дії іншої, відбувається хендвер. Якщо малі комірки розміщені дуже щільно, то процедура хендверу буде відбуватися часто при русі абонента. Внаслідок використання алгоритму

адаптивного формування структури рівня радіодоступу зменшується кількість активних SC, зменшується частота хендверів

Важливим завданням для систем мобільного зв'язку є забезпечення високої пропускної здатності абонентам, які перебувають на межі дії БС. Це пов'язано з невеликим рівнем сигналу по потужності та негативним впливом сусідніх БС. Внаслідок обмеженої кількості частотних каналів, для збільшення ємності і зменшення інтерференції в системах мобільного зв'язку застосовують принцип повторного використання частот показано на рис.2.32. З точки зору економічної ефективності оператора мобільного зв'язку, доцільним є застосування методу планування частот з коефіцієнтом використання частот  $F=1$ . Використання методів планування частот з різним коефіцієнтом використання частот  $F=1, 2, 3, 7$  показана на рис.2.21.

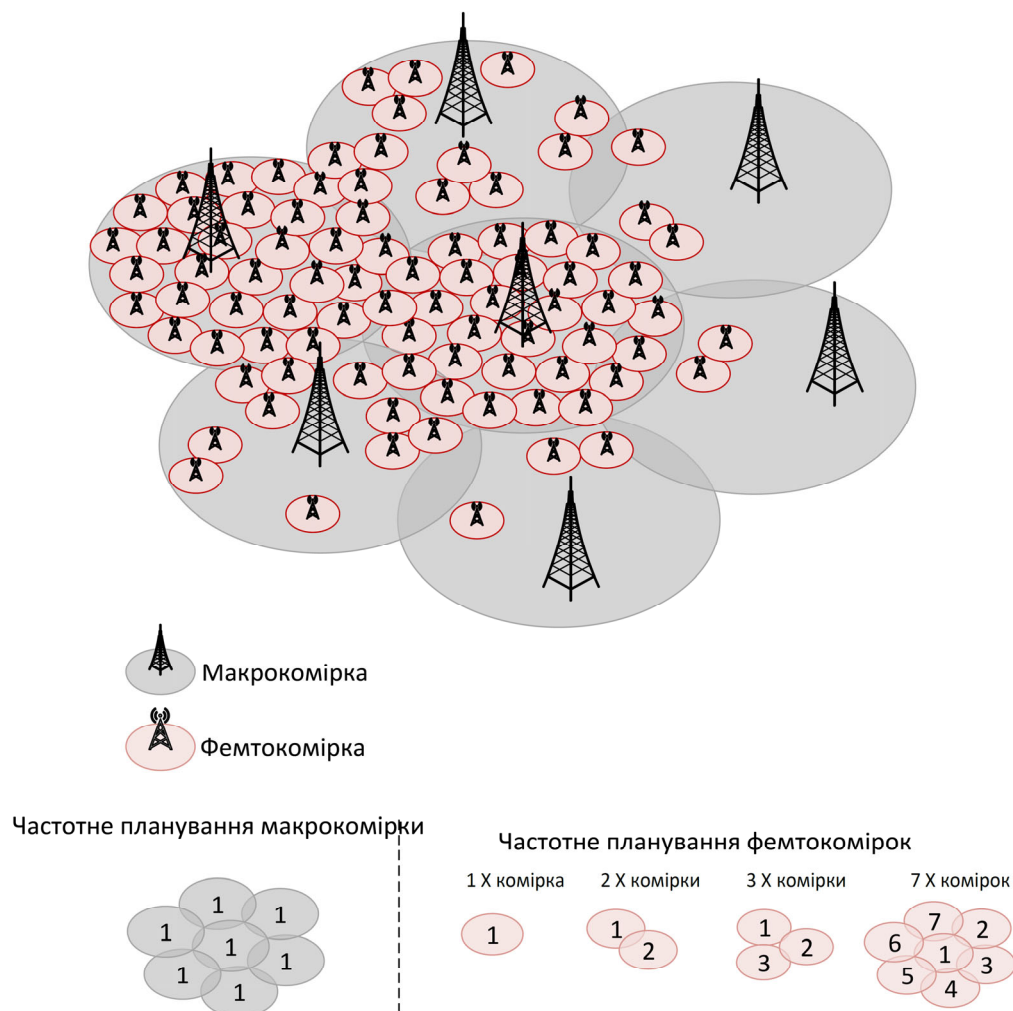


Рис. 2.21 Використання методів планування частот з різним коефіцієнтом використання частот  $F=1, 2, 3, 7$

Згідно з запропонованим методом адаптивного формування структури радіодоступу інтегрованої мережі, радіуси дії малих комірок є значно меншими, ніж радіус дії макро базової станції, отже, таких базових станцій буде значно більше на одиницю площі в умовах високого навантаження.

Оскільки сучасні методи частотного планування не розраховані на використання у гетерогенних мережах з динамічним формуванням структури радіодоступу, то внаслідок збільшення малих комірок значно зростає частота появи міжкоміркової інтенференції. Тому, виникає потреба в пошуках нових методів частотного планування, які б мінімізували кількість інтенференцій на всіх рівнях.

Пропускна здатність сучасних мобільних мереж оцінюють, базуючись на середніх значеннях спектральної ефективності комірки в певних умовах. Спектральна ефективність систем це показник, що визначається як відношення швидкості передавання даних на 1 Гц використовуваної смуги частот (біт / с / Гц). Спектральна ефективність є показником ефективності використання частотного ресурсу, а також характеризує швидкість передавання інформації в заданій смузі частот.

Середня пропускна здатність 1 комірки eNB LTE може бути отримана шляхом прямого множення ширини каналу на спектральну ефективність каналу:

$$R_{\text{комірки}} = S_{\text{сеп.сп.еф.}} \cdot F, \quad (2.39)$$

де  $S_{\text{сеп.сп.еф.}}$  - середня спектральна ефективність комірки (біт / с / Гц);

$F$  - ширина каналу (МГц);  $A = 1.4, 3, 5, 10, 15, 20, 100$  МГц.

Спектральну ефективність мережі  $S_{\text{спектр.еф.мережі}}$  розраховують як відношення швидкості передавання даних всіх абонентів мережі в певній географічній області (комірки, зоні) на 1 Гц смуги частот (біт / с / Гц / стільник), а також як відношення максимальної пропускної здатності мережі до ширини смуги одного частотного каналу.

$$S_{\text{спектр.еф.мережі}} = \frac{\sum_{i=1, j=1}^{k, n} R_{i, j}}{F} \quad (2.40)$$

де  $S_{\text{сер.сп.эф.}}$  - середня спектральна ефективність комірки (біт / с / Гц);

$R_{i,j}$  - сумарна швидкість передавання даних  $i$ -х користувачів, в  $j$ -комірках

Для того щоб проаналізувати вплив внутрішньосистемних перешкод на пропускну здатність напишемо вираз для потенційної швидкості передавання інформації (формула Шеннона) для двох випадків: корисний сигнал передається в присутність адитивного білого Гауссівського шуму (АБГШ); корисний сигнал передається в присутність АБГШ і інтерференційних перешкод.

Межа Шеннона швидкості передавання в смузі  $\Delta F$  для першого випадку:

$$R_{\text{без(інтерференції)}} = F \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_c \cdot L_c}{N_0} \right) \quad (2.41)$$

де:

$F$  - смуга частот;

$P_c$  - потужність передавача корисного сигналу;

$L_c$  - коефіцієнт послаблення корисного сигналу між передавачем і приймачем;

$N_0$  - спектральна щільність потужності АБГШ.

Потенційна швидкість передавання інформації в присутність АБГШ і інтерференційних перешкод:

$$R_{\text{з(інтерференцією)}} = F \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{P_c L_c}{N_0 + \sum_{i=1}^k P_i L_i} \right) \quad (2.42)$$

$i$  - номер джерела перешкоди;

$P_i$  - потужність випромінювання  $i$ -ї перешкоди;

$L_i$  - послаблення  $i$ -ї перешкоди між передавачем і точкою прийому.

$$\begin{aligned}
\Delta R &= R_{\text{без(інтерференції)}} - R_{\text{з(інтерференцією)}} = \\
&= F \cdot \log_2 \left( \frac{1 + \frac{P_c L_c}{N_0}}{1 + \frac{P_c L_c}{N_0 + \sum_{i=1}^k P_i L_i}} \right) - F \cdot \log_2 \left( \frac{1 + \frac{P_c L_c}{N_0}}{1 + \left( \frac{N_0}{P_c L_c} + \sum_{i=1}^k \frac{P_i L_i}{P_c L_c} \right)} \right) = \\
&= F \cdot \log_2 \left( \frac{1 + h^2}{1 + \left( \frac{1}{h^2} + \frac{1}{q^2} \right)^{-1}} \right),
\end{aligned} \tag{2.43}$$

де:

$$h^2 = \frac{P_c L_c}{N_0} - \text{відношення сигнал-шум,}$$

$$q^2 = \frac{P_c L_c}{\sum_{i=1}^k P_i L_i} - \text{відношення сигнал-перешкода}$$

Згідно з формулами можна зробити висновок, за умови, якщо користувач знаходиться на краю комірки, то потужність міжканальних перешкод співмірна з потужністю корисного сигналу. У такій ситуації відбувається значне зниження пропускної здатності користувачів, що знаходяться на краю комірки. Таким чином, для підвищення пропускної здатності і ймовірності з'єднання необхідне вдосконалення методів уникнення міжкоміркової інтерференції в умовах динамічної зміни форми комірки.

Відповідно, щоб отримати максимальну спектральну ефективність пропонуються різні модифіковані схеми ПВЧ (повторного використання частот) для звичайної шестикутної моделі комірок. Однак, згідно з проведеним оглядом робіт у 1 розділі, планування частот в межах комірки з неправильною геометрією (форми Вороного) з метою уникнення інтерференції не розглядалися.

У дисертаційній роботі запропоновано метод динамічного повторного використання частот для сформованих різного розміру комірок Вороного.

Згідно з даним методом кожна комірка неправильної форми розділена на дві зони - центральна і гранична зона комірки.

Відповідно призначення піднесучих відбувається залежно від знаходження користувача в певній зоні. Коефіцієнт повторного використання частот у центральній зоні дорівнює 1, отже, всі користувачі цієї зони у всіх

сусідніх комірках отримують частоти з одного діапазону, а користувачі на межі комірки обслуговуються з коефіцієнтом повторного використання частот рівним 3.

На відміну від відомого методу часткового повторного використання частот розподіл загальної смуги частот відбувається статично, запропонований метод динамічно визначає розподіл смуги частот між центральною зоною та зоною на межі комірки в залежності від місця локалізації навантаження.

Оскільки відношення сигнал/шум є хорошим показником відстані користувача від БС, ми використовуємо середнє отримане значення відношення сигнал/шум в середині комірки для класифікації користувачів до граничної площі комірки (ГПК) або центральної площі комірки (ЦПК). БС визначає користувачів із відношенням сигнал/шум який, меншим за граничну, як користувачі граничної площі комірки, тоді як користувачі із значенням відношення сигнал шум, що перевищують граничне значення, визначаються як користувачі центральної площі комірки (рис. 2.22).

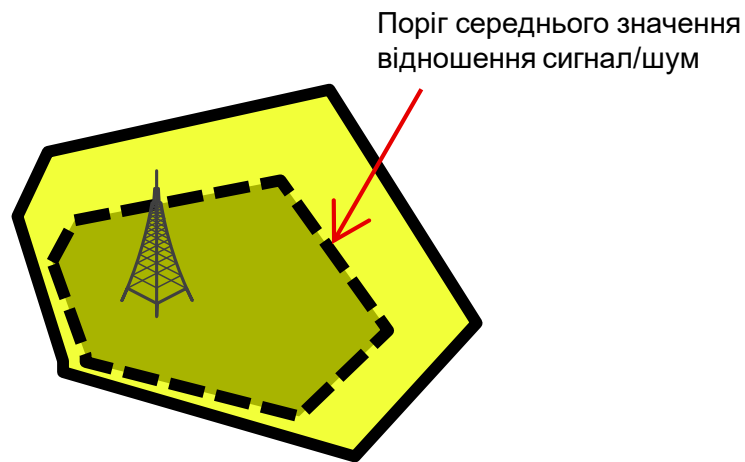


Рис. 2.22 Поділ на частотні зони комірки неправильної форми на основі виміряного значення сигнал/шум

На відміну від досконалого шестикутника, форма та площа кожного сектора є випадковими залежно від геометрії комірки та локалізації навантаження, як показано на рис. 2.23.

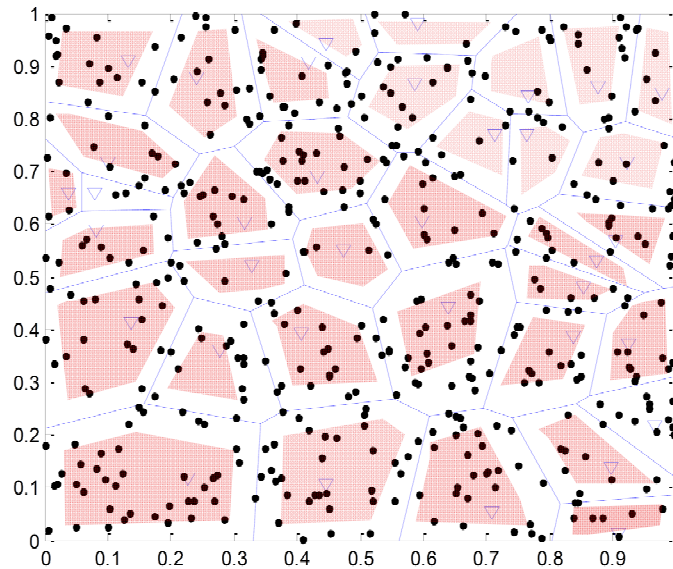


Рис. 2.23 Принцип класифікації користувачів до граничної площі комірки (ГПК) або центральної площі комірки (ЦПК) в залежності від локалізації абонентського навантаження

В умовах, коли користувачі нерівномірно розподілені в комірці, кожна зона матиме різну кількість користувачів, відповідно, чим більша кількість користувачів у певній зоні, тим більша необхідна пропускна здатність для цієї зони, що у свою чергу вимагає ширшої смуги каналу. Метод часткового повторного використання частот в комірках побудованих на основі Вороного. Важливо динамічно розподілити спектр відповідно до вимог у кожній зоні, схема фіксованого та динамічного розподілу частоти показано на рис. 2.25 та рис. 2.26.

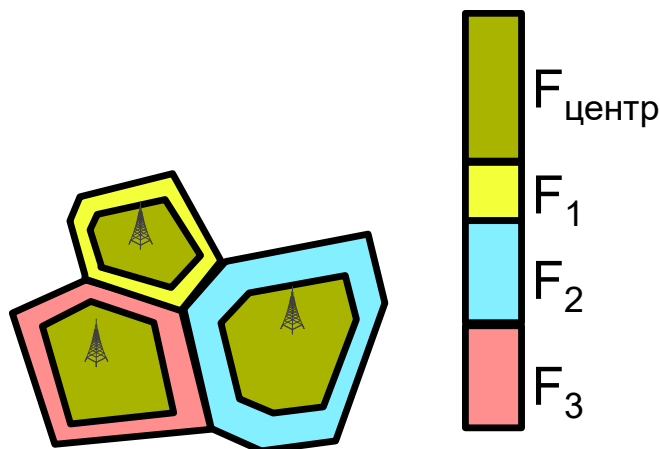
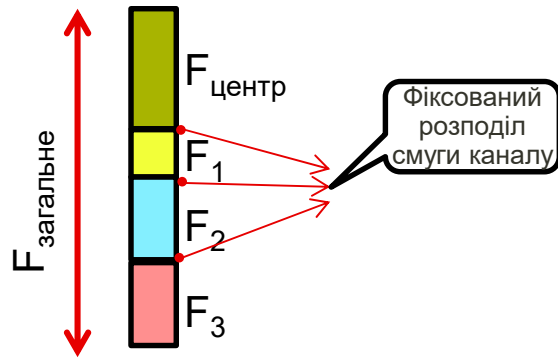
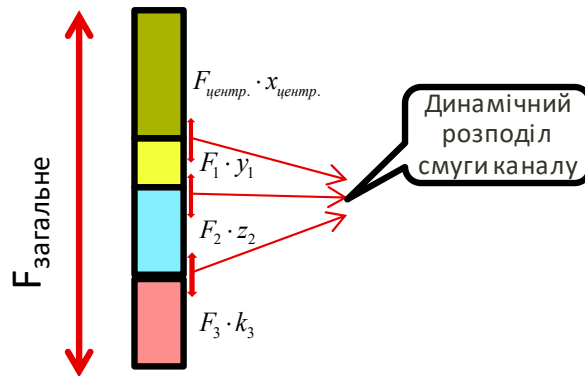


Рис. 2.24 Метод часткового повторного використання частот в комірках побудованих на основі Вороного



а)



б)

Рис. 2.25 Фіксований розподіл смуги частот між зонами комірок (існуючий підхід) – а) та динамічний розподіл смуги частот між зонами комірок (запропонований підхід) – б)

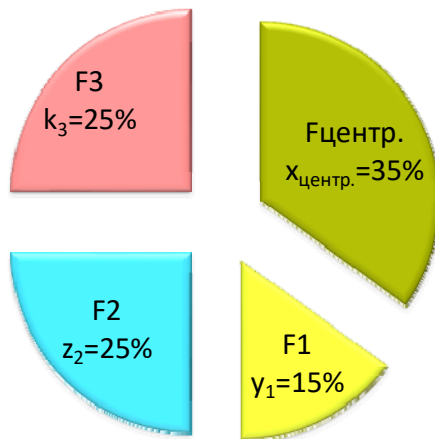


Рис. 2.26 Процентне співвідношення смуги частот при динамічному розподілі частот



Метод з фіксованим розподілом смуги частот між зонами:

$$F_{заг.} = F_{центр.} + F_1 + F_2 + F_3 \quad (2.44)$$

$$F_{заг.комірки_1} = F_{центр.} + F_1 \quad (2.45)$$

$$F_{заг.комірки_2} = F_{центр.} + F_2 \quad (2.46)$$

$$F_{заг.комірки_3} = F_{центр.} + F_3 \quad (2.47)$$

Метод з динамічним розподілом смуги частот між зонами:

$$F_{заг.} = F_{центр.} \cdot x_{центр.} + F_1 \cdot y_1 + F_2 \cdot z_2 + F_3 \cdot k_3 \quad (2.48)$$

Де  $x_{центр.}, y_1, z_2, k_3$  - коефіцієнти частки використання частот

$$x_{центр.} + y_1 + z_2 + k_3 = 1 \quad (2.49)$$

$$F_{заг.комірки_1} = F_{центр.} + F_1 \quad (2.50)$$

$$F_{заг.комірки_2} = F_{центр.} + F_2 \quad (2.51)$$

$$F_{заг.комірки_3} = F_{центр.} + F_3 \quad (2.52)$$

Відповідно, в існуючих LTE мережах запропонований спосіб адаптивного управління ресурсами, який дасть змогу обслуговувати користувачів, що знаходяться в граничній і центральній площі комірки із необхідним рівнем якості. А також, дозволить уникнути простою ресурсів мережі, міжкоміркову інтерференцію та підвищити загальну пропускну здатність системи в порівнянні з існуючими методами.

## 2.5. Висновки до розділу 2

У розділі представлено концептуальну модель інтегрованої мобільної мережі наступного покоління на основі використання технологій LTE-U та Wi-Fi, яка базується на централізованому SDN контролері для реалізації адаптивного управління ресурсами мережі. Запропоновано метод адаптивного використання неліцензійного діапазону частот мережами Wi-Fi та LTE-U для забезпечення необхідної якості послуг. Даний метод на основі вимог QoS користувачів централізовано приймає обґрунтовані рішення щодо частки використання радіоресурсів оператором мобільного зв'язку LTE, що дало змогу

підвищити спектральну ефективність в інтегрованих мережах LTE з уникненням міжсистемної інтерференції.

Запропоновано алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу в умовах передавання декількох відеопотоків реального часу. Застосування даної дисципліни дозволяє уникнути зниження якості передачі відеопотоків отримувачам, для яких якість з'єднань не погіршувалась, а також зменшити зниження якості передавання відеопотоків отримувачам, для яких відбулась відмова каналу.

Розроблено метод адаптивного планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi, що базується на діаграмі Вороного та дало змогу уникнути міжкоміркову та міжсистемну інтерференцію.

## РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ІНТЕГРОВАНИХ МЕРЕЖ LTE/WI-FI

### 3.1 Дослідження території покриття LTE та Wi-Fi за допомогою мобільних додатків для імітаційного моделювання мережі

У цьому розділі методи, які були попередньо продемонстровані для розвантаження стільникової мережі, набудуть гіпотетичного втілення на території Львова. Таким чином буде проведено аналіз ефективності використання гетерогенної мережі. Запропоновано взяти до уваги центральну частину міста, Національний університет «Львівська політехніка», парк ім. Івана Франка, частину Краківського базару та Личаківського району (рис. 3.1). Таким чином, на цій території знаходяться райони, у яких можна спостерігати усі випадки концентрації користувачів мобільних пристроїв, чи то мобільний телефон, планшет, ноутбук чи ін. У подальшому аналізі буде з'ясовано, де потрібно буде сконцентрувати увагу на розвантаженні і яким саме чином.

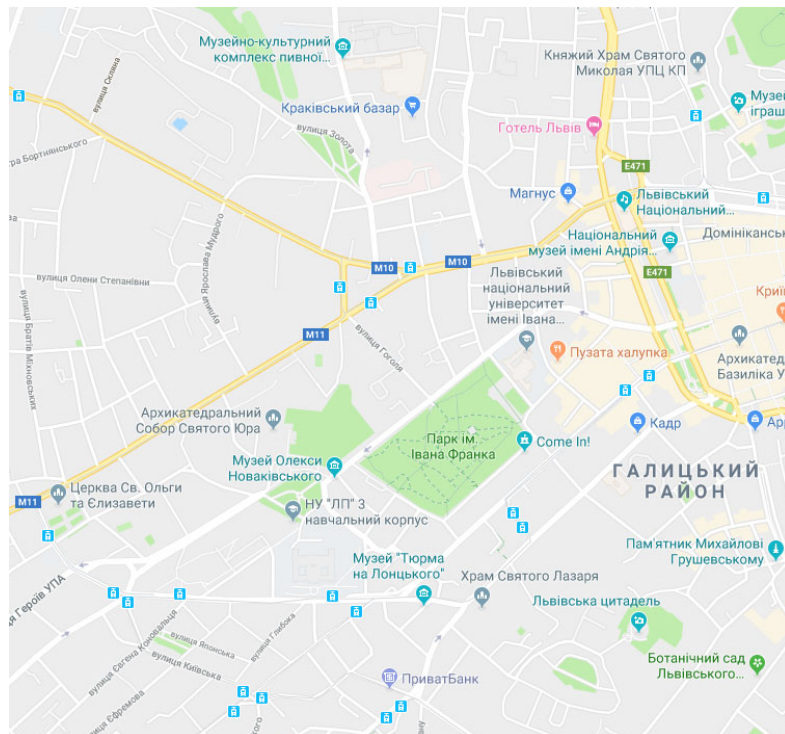


Рис. 3.1 Територія Львова, яка буде досліджуватись

Спершу потрібно зробити порівняльний аналіз карт покриття Wi-Fi та LTE мереж. Для цього використано безкоштовні мобільні додатки, які знаходяться у вільному доступі: Wi-Fi Map; RFBenchmark та OpenSignal. Нижче наведено короткий опис даних програм.

### Wi-Fi Map

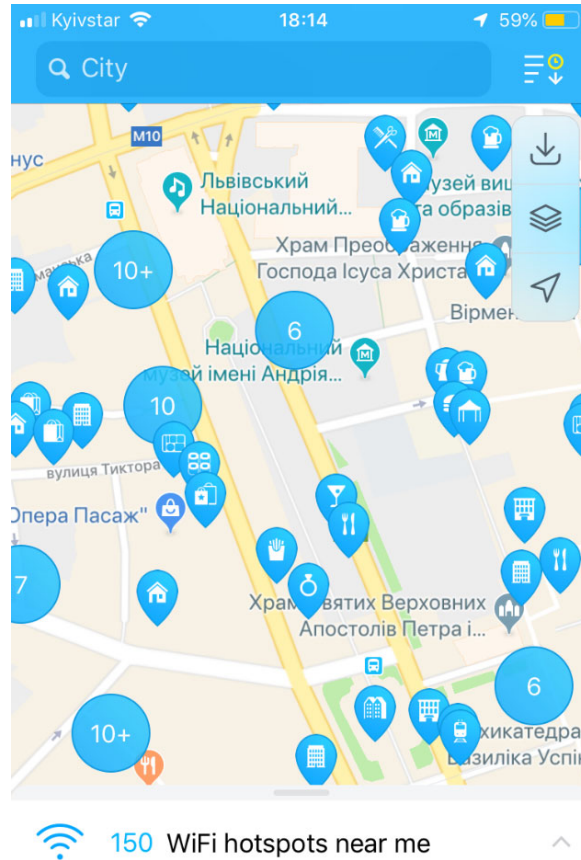


Рис. 3.2 Вигляд додатку Wi-Fi Map

Функціонал цього додатка дозволяє дізнатись, де знаходяться точки доступу до публічних Wi-Fi мереж, які є захищені паролем або повністю відкриті. На жаль, оновлення бази даних ведеться безпосередньо самими користувачами, тобто відбувається ручне створення точки доступу, де вказується назва мережі та її пароль. Саме тому можна зробити припущення, що деяка інформація в цьому додатку може бути вже неактуальна. Також є можливість дізнатись затримку, швидкість передавання та приймання і розблокувати пароль. Зі всіх доступних додатків, цей має найбільшу базу даних.

Наступні два додатки стосуються мережі LTE.

## RFBenchmark

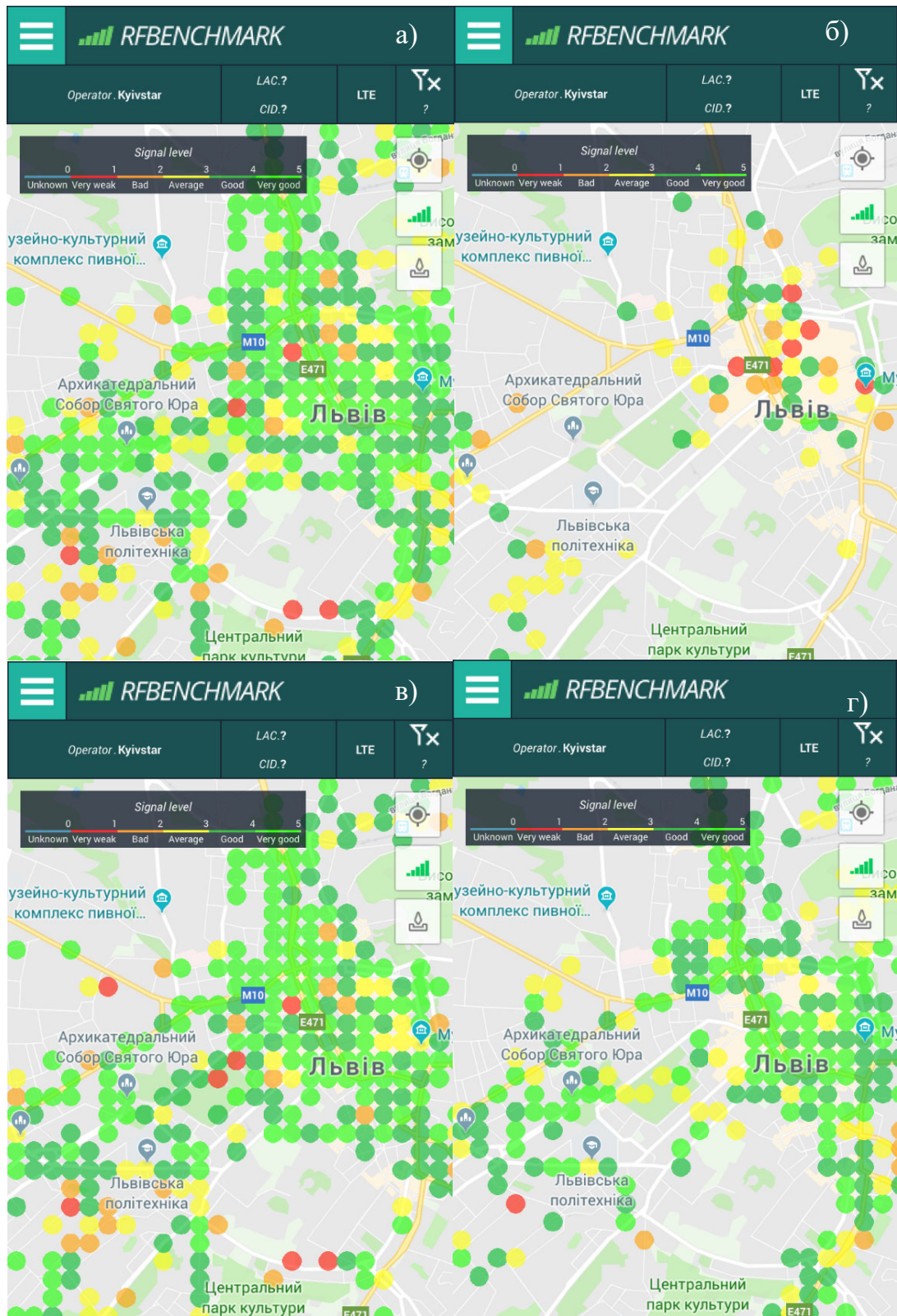


Рис. 3.3 Видгляд додатку для покриттів: а) 2G, 3G, 4G; б) тільки 2G; в) тільки 3G та г) тільки 4G відповідно

Відразу слід зауважити, що різнокольорові круги не є окремі комірки, де в центрі розташовані базові станції. На рисунку зображено щільність покриття, де є слабкий сигнал, а де сильніший. Також, можна відобразити покриття окремо або одночасно всіх операторів Kyivstar; Lifecell, VodaFone та технологію стільникового зв'язку GSM; UMTS; LTE.

### OpenSignal

Цей додаток схожий до попереднього: у ньому можна спостерігати щільність покриття окремо або одночасно всіх операторів та технологію стільникового зв'язку . Але також у ньому відображається місце розташування базових станцій, але без їх радіусу дії. Можна дізнатись унікальний ідентифікатор ID кожної комірки та її локальний код LAC.

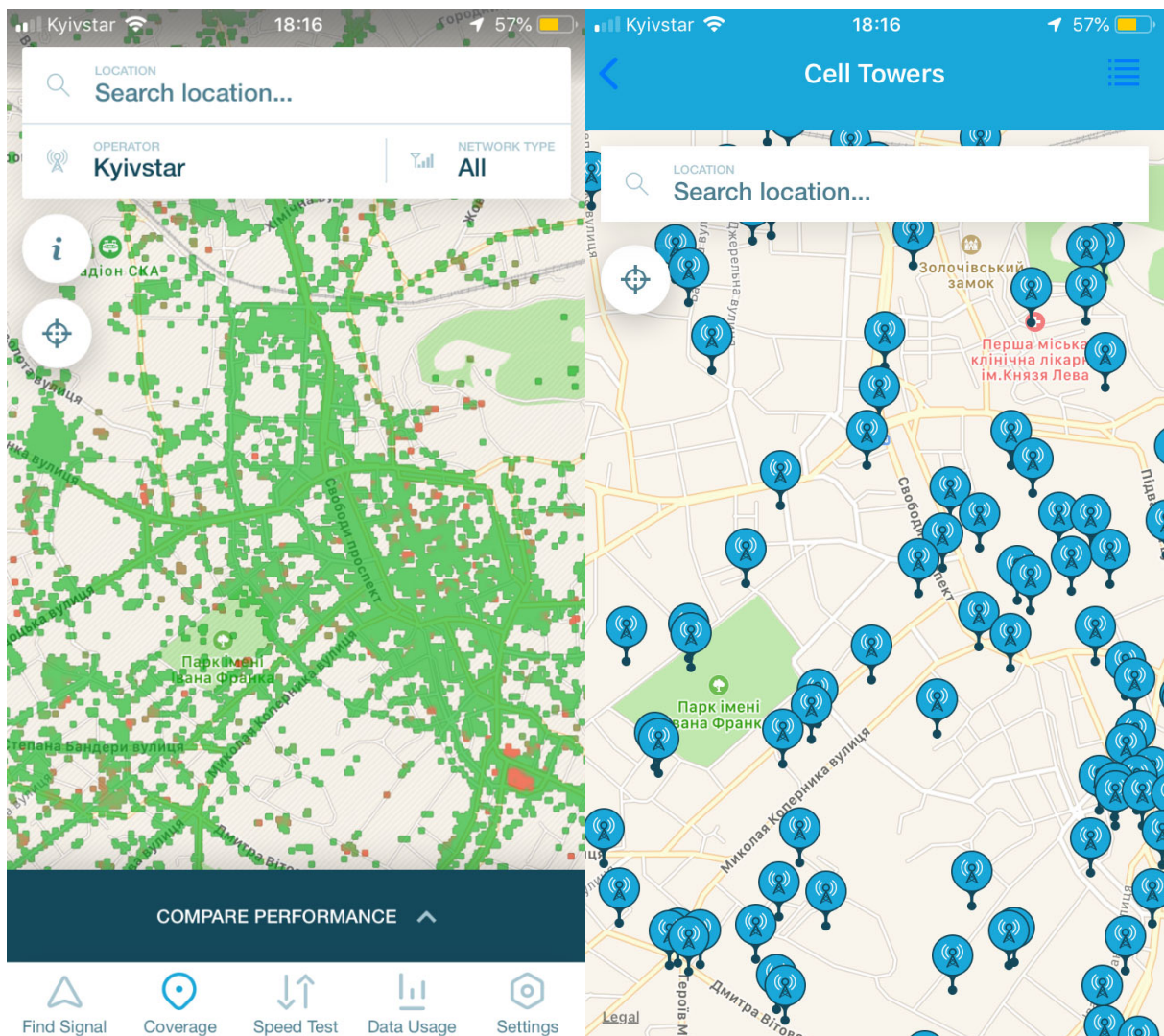


Рис. 3.4 Вигляд додатку OpenSignal

### 3.2 Моделювання сценаріїв адаптивного розподілу навантаження в процесі інтеграції технологій LTE/Wi-Fi/LTE-U

Використавши карти з попередніх додатків, можна отримати загальне покриття міста Львів (рис. 3.5). Слід зазначити, що вона може відрізнятись від тієї, яка є за базою даних операторів на даний момент, оскільки додатки не часто підлягають оновленню.

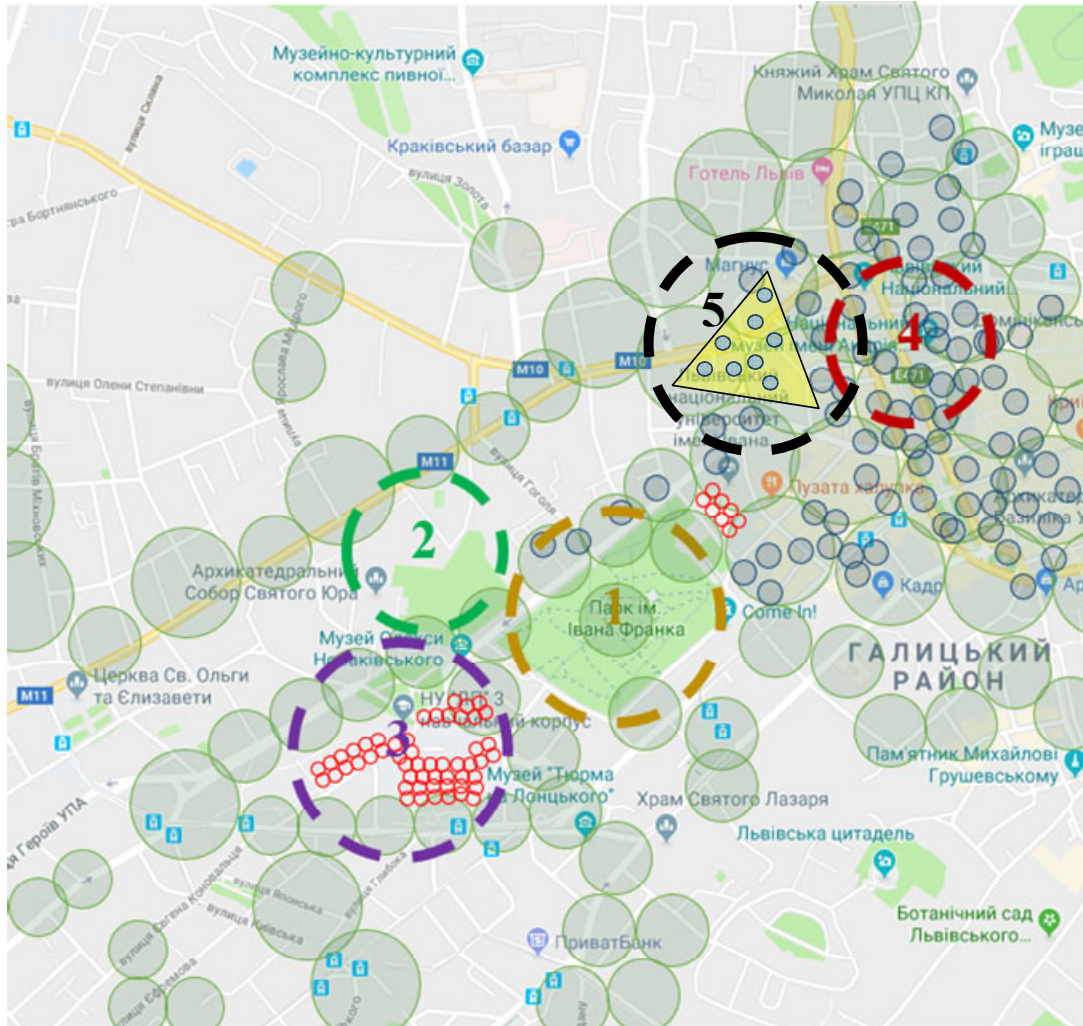


Рис. 3.5 Загальний вигляд покриття на території Львову

- Зелене коло – покриття базовою станцією.
- Синє коло – покриття точкою доступу Wi-Fi.
- Червоне коло – власна корпоративна мережа.

Дана карта дає зрозуміти, як краще розвантажувати трафік. Варто розглянути чотири випадки, які зображені штрихованими зонами. П'ятий

випадок для моделювання покриття згідно з методикою адаптивного формування радіоструктури.

### 3.2.1 Адаптивний розподіл навантаження в LTE мережі в умовах інтеграції із технологією Wi-Fi (hotspot 2.0/Wi-Fi Certified Passpoint)

Вищі навчальні заклади переповнені студентами, яким майже завжди потрібен доступ мережі. Зона 3 демонструє, що «Львівська Політехніка» оточена покриттям LTE, однак на самій території зв'язок дуже поганий, тим паче всередині корпусів. Університет має все, щоб вирішити цю проблему, шляхом договору з оператором, який надає покриття для використання своїх ресурсів, при цьому вся мережа буде керуватися контролерами Wi-Fi. За задумом організації Wi-Fi Alliance, оператори повинні надавати своїм абонентам можливість користуватися громадськими точками доступу без необхідності введення логіна і пароля, так як авторизація здійснюється автоматично за допомогою пристрою, який використовує SIM-карту. Така модернізація може стосуватись не тільки університетів, а й інших корпоративних мереж.

Проведемо більш детальний огляд системи, коли відбувається розвантаження LTE трафіку за допомогою точки доступу Wi-Fi (територія НУ «ЛП», де перекриваються ці дві технології). Отже, припустимо, що на відрізок часу 1 год, поступають випадковим чином виклики і кожному абоненту потрібна лише одна послуга. Кожна послуга вимагає різні швидкості (таблиця 3.1). Тривалість виклику  $T_{\text{трив}}$  згенерована за Пуасонівським законом розподілу із середнім значенням  $\lambda=1500$  с моменти початків викликів  $T_{\text{поч}}$  згенерованих випадковим чином з рівномірним законом розподілу; моменти кінців викликів, визначених як  $T_{\text{кін}} = T_{\text{поч}} + T_{\text{трив}}$ . Пропускна швидкість мережі LTE і всіх сервісів становить:

Таблиця 3.1

Швидкості телекомунікаційних послуг

LTE	IPTV	VoIP	VoD	WEB	Відеоконференція	Сигналізація
100 Мбіт/с	10 Мбіт/с	128 кбіт/с	4 Мбіт/с	512 кбіт/с	2 Мбіт/с	64 кбіт/с



Незавантажена мережа LTE буде мати наступний вигляд:

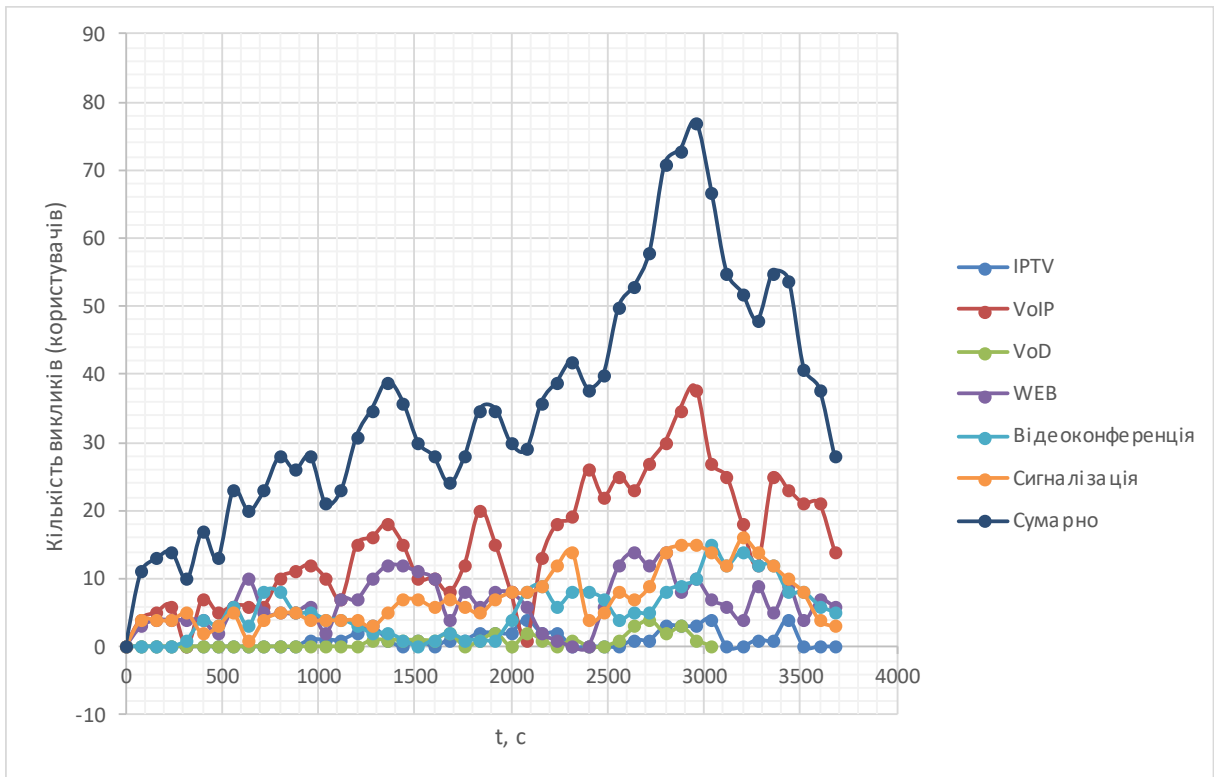


Рис. 3.6 Кількість викликів різних видів послуг в мережі LTE у часі

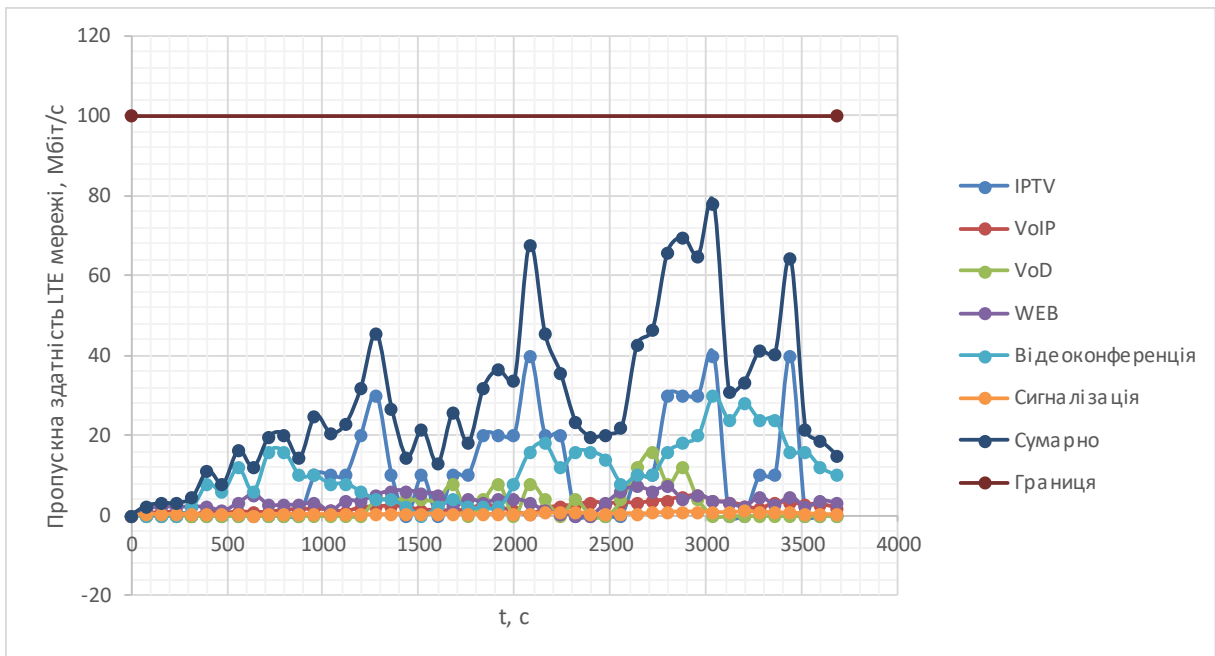


Рис. 3.7 Пропускна здатність видів послуг, які поступили в LTE мережу

Однак, в годину найбільшого навантаження мережа буде переповнена і відбудуться втрати з'єднань. Нижче показано результати завантаженості:

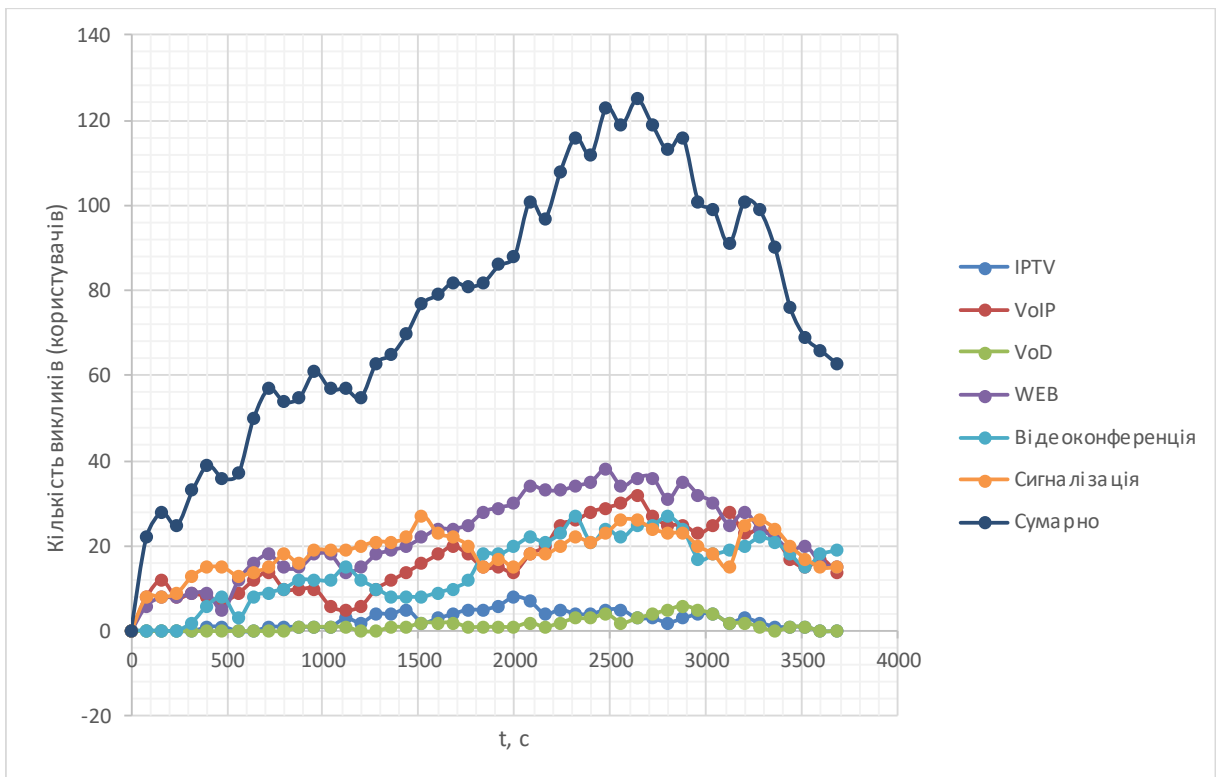


Рис. 3.8 Кількість викликів різних видів послуг в завантаженій мережі LTE у часі

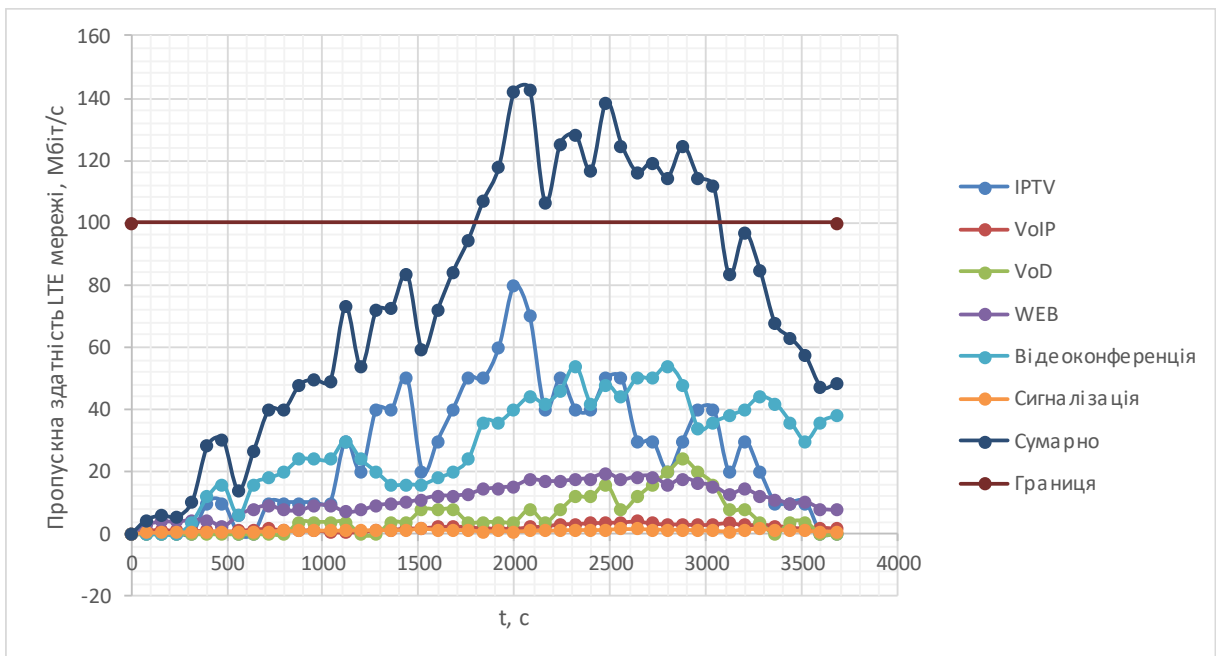


Рис. 3.9 Пропускна здатність видів послуг, які поступили в завантажену LTE мережу

Все що знаходиться вище границі 100 Мбіт/с буде втрачено (рисунок 3.9). Тому одна з більш-менш вільних точок доступу Wi-Fi може розвантажити частину трафіку. Ось вигляд такої точки доступу:

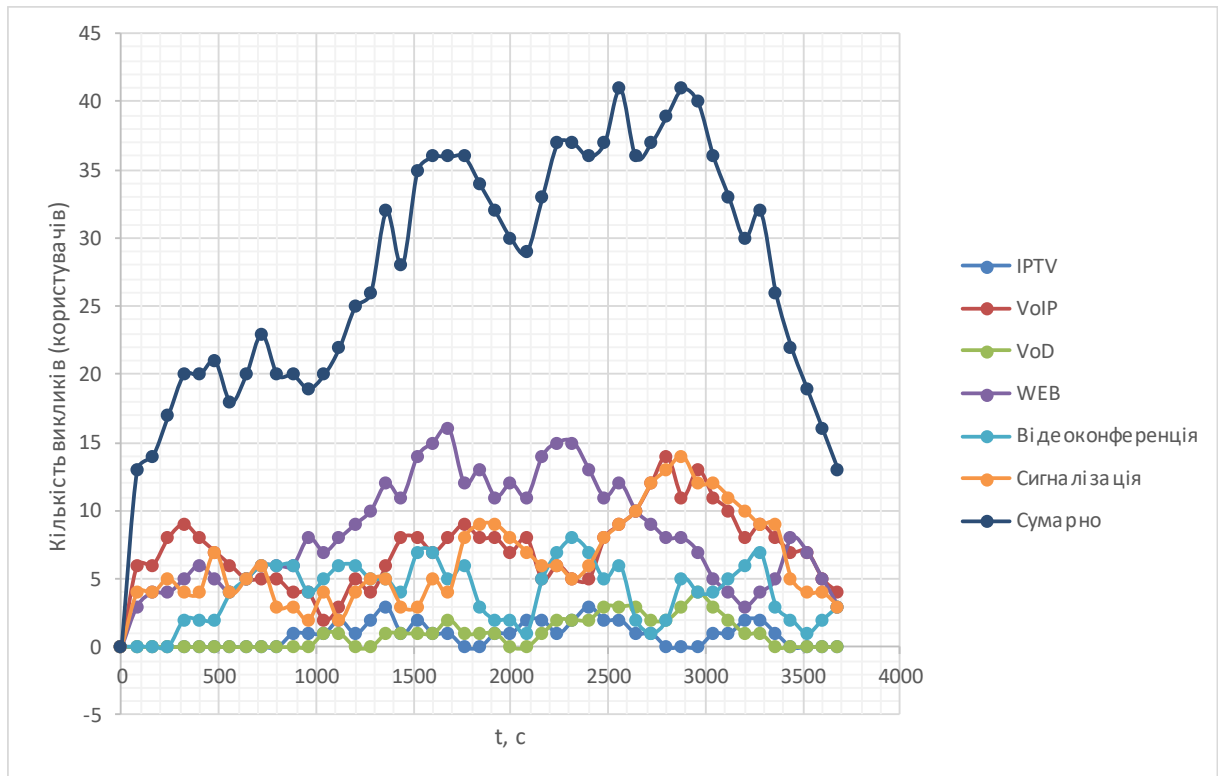


Рис. 3.10 Кількість викликів різних видів послуг в мережі Wi-Fi у часі

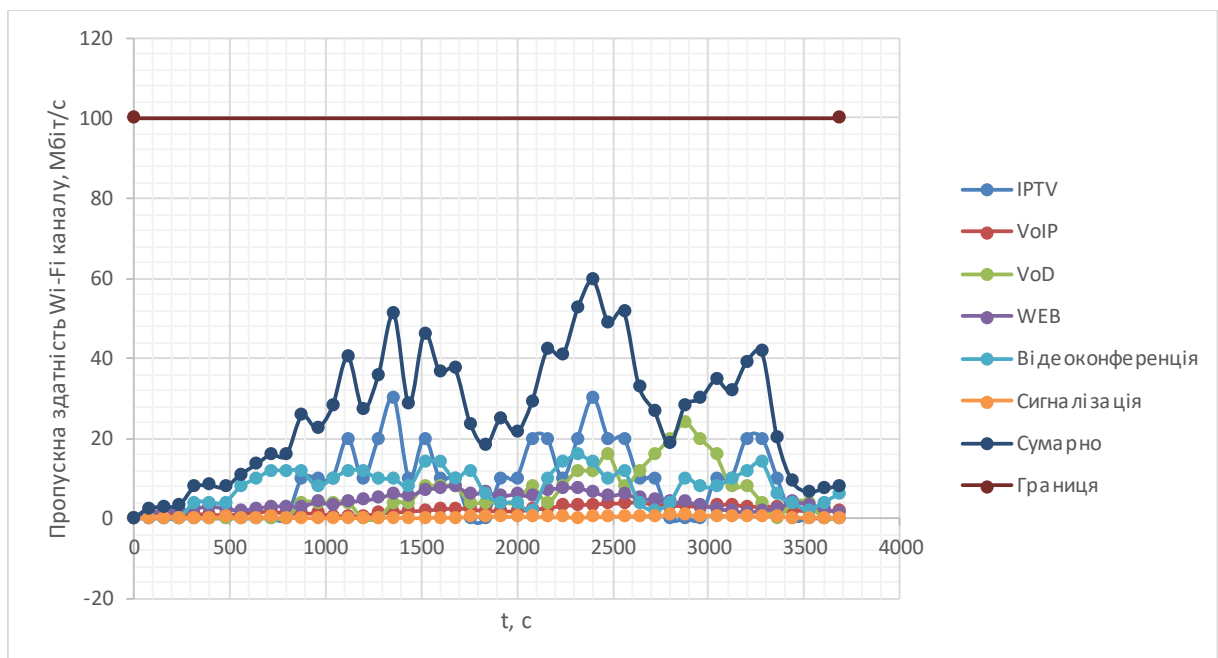


Рис. 3.11 Пропускна здатність видів послуг, які поступили в Wi-Fi мережу

Кінцевий результат буде мати наступний вигляд:

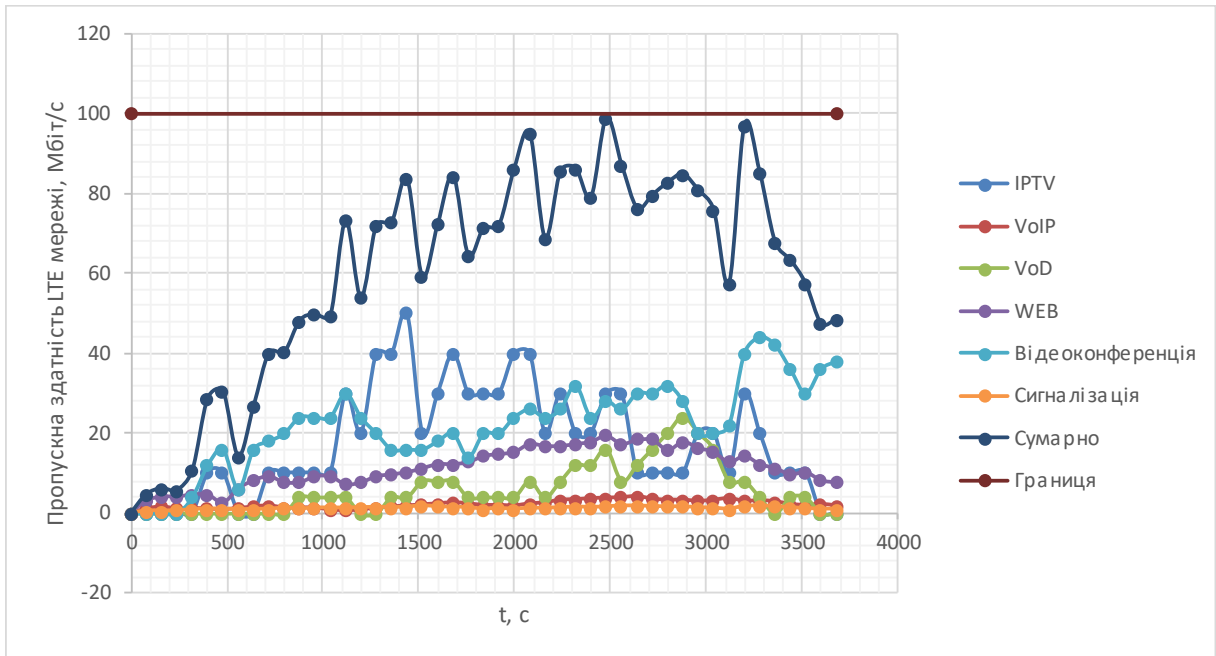


Рис. 3.12 Пропускна здатність видів послуг у розвантаженій LTE мережі

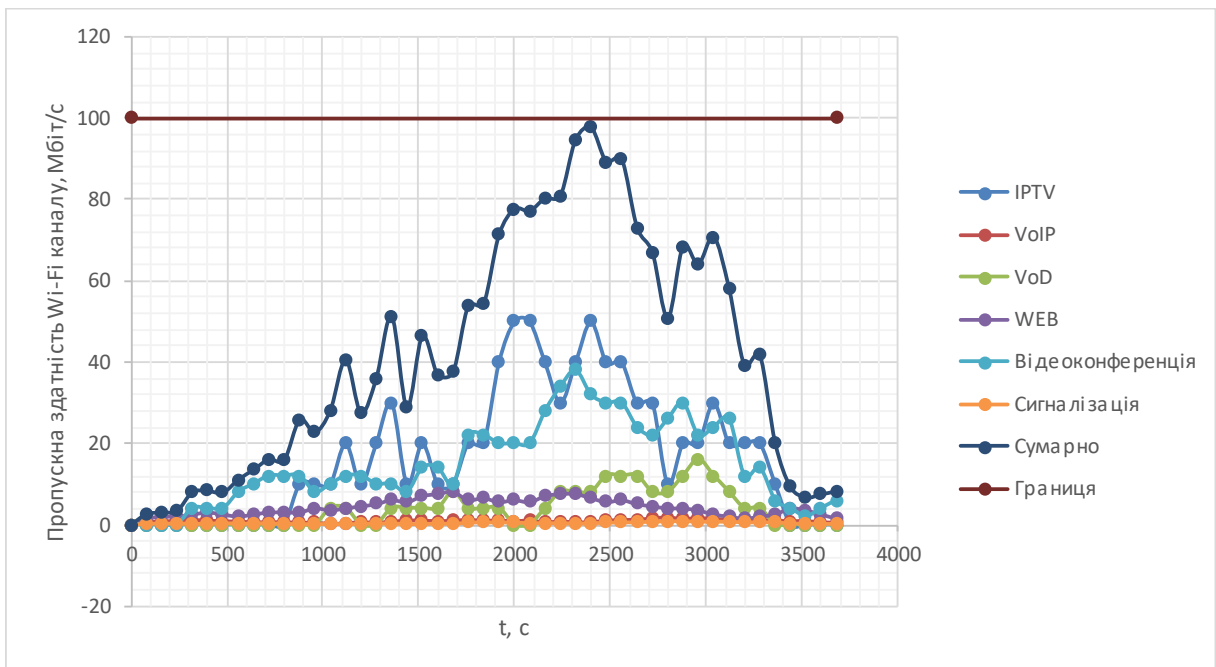


Рис. 3.13 Пропускна здатність видів послуг у Wi-Fi мережі з частиною користувачів, які були перенаправленні з завантаженого LTE

Отже, у результаті частина користувачів з завантаженої мережі LTE були перенаправленні у мережу Wi-Fi. У даному випадку слід було задіяти тих користувачів, які найбільше споживали трафік.

### 3.2.2 Адаптивний розподіл навантаження в LTE мережі в умовах інтеграції із технологією LTE-U

Територія під номером 1 має лише стільникове покриття LTE мережі, а також там відсутні публічні точки доступу Wi-Fi. Як відомо, технологія LTE використовує ліцензований спектр. Тому найкращим методом для оператора буде встановлення LTE-U. Таким чином у нього з'явиться неліцензований спектр, який є набагато дешевшим, іншими словами буде збільшено пропускну здатність на цій території, як показано на рисунку 3.15 та 3.16.

Припустимо знову ситуацію, як у попередньому розділі, де випадковим чином у часі будуть надходити виклики на певну послугу від абонентів. Параметри залишаються ті самі, що й були використані у попередньому розділі.

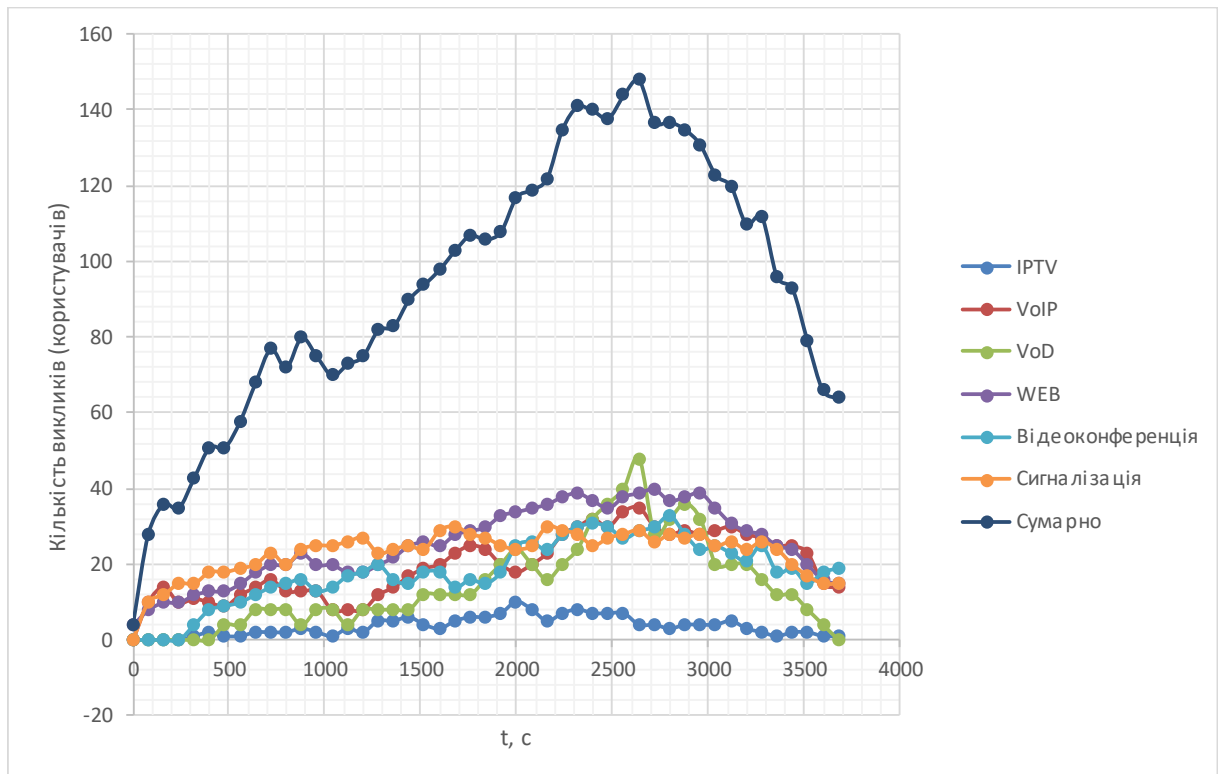


Рис. 3.14 Кількість викликів в мережі LTE на різні види послуг у часі

Як видно з рисунку 3.15, кількість викликів, які поступили в мережу LTE, дають сумарну пропускну здатність, яку канал зв'язку не може забезпечити. Тому застосування технології LTE-U може покращити якість обслуговування, тим самим збільшивши пропускну здатність (рис. 3.16).

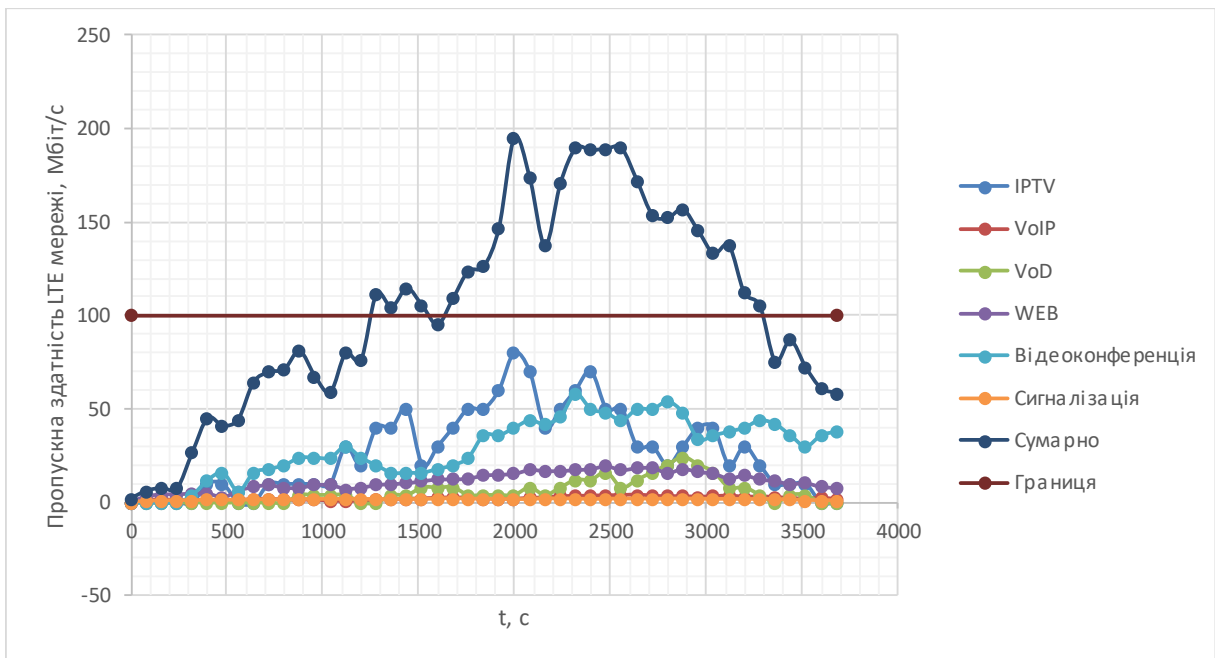


Рис. 3.15 Пропускна здатність LTE мережі в залежності від виду послуги

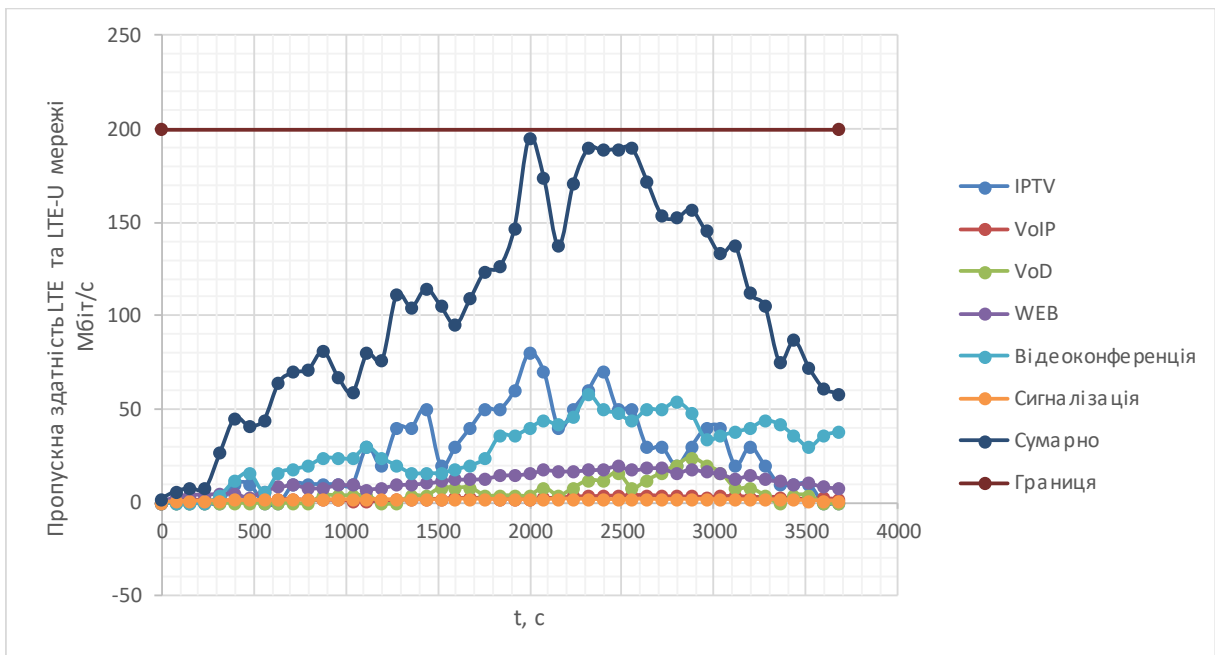


Рис. 3.16 Розвантажена мережа LTE з використанням технології LTE-U

Таким чином пропускна спроможність мережі зростає вдвічі. Однак це буде дві окремі технології, які будуть знаходитись поряд, але фізичне з'єднання між ними відсутнє. Перемикання буде відбуватись шляхом пересилання сигналізаційних повідомлень на систему оператора.

### **3.3 Моделювання та дослідження процесу функціонування інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi та LTE-U**

Зону під номером 2 можна вважати «мертвою», там наявне лише 2G/3G покриття. Парк ім. Івана Франка знаходиться поблизу центру та ЛНУ ім. І. Франка, а там часто відбувається велике скупчення людей (рис.3.5). Цього достатньо для дзвінків у період не пікового навантаження, але не для мультимедіа. Скоріш за все оператор хоче заощадити і тому буде вважати, що достатньо буде лише 2-3 базові станції LTE. Проте, коли виясниться, що цього мало, доведеться впроваджувати додаткові LTE-U. Для того, щоб такого не відбулося і не переплатити двічі, краще відразу використати гібридну базову станцію LTE/Wi-Fi. На відміну від попереднього методу, ці дві технології об'єднані. Слід зауважити, що краще за все в таку базову станцію встановити правило, за яким пріоритет на встановлення нового з'єднання буде надаватись мережі Wi-Fi і лише в умовах її завантаженості, перемикає на LTE. Таким чином, аналогічно до попереднього методу, буде збільшено пропускну здатність мережі.

Останній випадок, коло 4 та 5, є найскладнішими (рис.3.5). Він досить розповсюджений, у ньому присутні мережі LTE та Wi-Fi одночасно. І існує тільки один спосіб розвантаження макрокомірок – це впровадження малих комірок з реалізацією адаптивного формування рівня радіодоступу залежно від локалізації абонентського навантаження та підтримкою новітньої технології LTE-U. Проте, внаслідок такого формування будуть відбуватись колізії та інтерференції як у ліцензійному так і неліцензійному діапазоні, що без ефективних методів їх уникнення може призведе до погіршення якості обслуговування більшості користувачів. Методи вирішення цих завдань запропоновано у другому розділі. Дослідження ефективності цих методів проводиться у наступних підрозділах.

#### **3.3.1 Розробка імітаційної моделі інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi/LTE-U**

Для оцінки ефективності запропонованих рішень побудовано імітаційну модель. Імітаційну модель розроблено з використанням мови програмування

C++ та LTE-A Downlink System Level Simulator. Модель складається з робочого поля, на якому розміщені станції 3-х рівнів: макростанції, пікостанції, Wi-Fi точки доступу [4]. Центри макростанцій утворюють трикутник. Вони утворюють регулярну структуру мобільної мережі. На робочому полі моделі не показано всієї зони дії макрокомірок, оскільки цікавою для дослідження є величина навантаження на сектор базової станції( $60^0$ ). В цьому трикутнику розміщені SC та Wi-Fi. Місцезнаходження пікокомірок встановлено відповідно до розробленого методу. Якщо є потенційне навантаження, вони вмикаються, коли навантаження на них немає, вони вимикаються і зникають із робочого поля. Ввімкнення і вимкнення пікокомірок призводить до зміни структури рівня радіодоступу.

На початку моделювання генерується статистичний розподіл абонентів і, з використанням параметричного точкового процесу з параметром мінімальної відстані між базовими станціями, генеруються координати пікокомірок. Потім внаслідок теселяції Вороного, формується зона покриття кожної з малих комірок.

Багаторівнева структура рівня радіодоступу забезпечує високу спектральну ефективність, гнучкість побудови мережі, адаптивність мережі до вимог абонентів.

Базові станції кожного з рівнів мають різні параметри і можуть обслуговувати різні категорії абонентів.

Залежно від швидкості руху абонента і трафіку, який він буде генерувати, абонент буде обслуговуватися базовою станцією одного рівня, або декількома станціями різних рівнів (при агрегації спектру).

Фемтокомірки і пікокомірки орієнтовані на малорухомих абонентів, які будуть генерувати великий обсяг трафіку. Ці комірки ефективно розвантажують макрокоміркове покриття, а якщо навантаження на них невелике, взагалі виключаються. Мережа радіодоступу на рівні SC підлаштовується під потреби абонентів.

Макрокомірки орієнтовані на високомобільних абонентів, а також абонентів, яких не можуть обслужити SC, або тих абонентів, які



обслуговуються спільно на макрокомірці і SC(агрегація спектру). Для генерації трафіку та моделювання швидкості руху абонентів використовуються генератори на основі рівномірного та логнормального законів розподілу, які у поєднанні дають змогу отримати близькі до реальних мереж мобільного зв'язку сценарії поведінки абонентів.

Кожен абонент має такі атрибути: координата, швидкість руху, напрям руху, послуга, якою хоче скористатися абонент(швидкість передавання, яку вимагає абонент), ймовірність активності абонента, розглянемо детальніше кожен із них.

Для початку розглянемо, яким чином відбувається поява абонента, як визначається його початкове місцезнаходження.

У реальних мережах абонентське навантаження розподілене нерівномірно. У певних ділянках статистично спостерігається більше завантаження мережі, в інших менше. Як вже було описано вище, на початку моделювання здійснюється генерація статистики абонентського навантаження. Згодом враховуючи ці значення розміщуються абоненти.

Абоненти генеруються таким чином: частина абонентів є приблизно рівномірно розподілені в межах робочого поля моделі, існують протягом всього часу моделювання. Друга частина абонентів – локалізовані в трикутнику абоненти, місцезнаходження яких визначається Пуасонівським законом розподілу. Ці абоненти існують протягом деякого моменту часу, після чого вони зникають. За допомогою локалізованих в трикутнику абонентів моделюється коливання абонентського навантаження впродовж доби.

Абоненти не стоять на місці, а перебувають в постійному русі переходячи від однієї базової станції до іншої. Реальний рух абонентів є дуже складним, але з деякою похибкою його можна описати з допомогою найпростіших законів розподілу, таких, як логнормального, рівномірного та нормального законів розподілу.

В густонаселених районах (центр міста, офіси, вокзал) абоненти є здебільшого малорухомими або нерухомими, а зі зростанням швидкості руху кількість абонентів має тенденцію до зменшення. Відповідно до цих міркувань

швидкість руху абонента найкраще описується нормальним законом розподілу з такими параметрами: математичне сподівання рівне 0, дисперсія – 35. Розподіл швидкості руху абонентів в м/с подана на рис. 3.2.

Рух абонента в моделі є квазіпостійним. Це означає, що абонент деякий час буде рухатися з постійною швидкістю, після чого йому буде присвоєно нове значення швидкості руху. Напрямок руху розраховується відповідно до декількох сценаріїв, які розроблено в моделі:

1. Мінімальне навантаження на мережу. Рух абонентів є випадковим. Абоненти доволі рівномірно розподілені по полі моделі.
2. Зростання потенційного навантаження від абонентів. Досягається збільшенням кількості абонентів і їх рухом із деяким тяжінням до центру моделі.
3. Робота мережі в режимі в ГНН.
4. Поступове зменшення навантаження на мережу. Поступово зменшується кількість абонентів, вони рухаються від центра моделі. Подальший напрям руху – випадковий.

Ці сценарії роботи мережі є дуже подібними до тих, які спостерігаються в реальних мережах. Дійсно, у нічний час спостерігається мала кількість абонентів, згодом зранку спостерігається невеликий екстремум навантаження, після чого воно може зменшуватися, або дещо наростати. У середині дня спостерігається ще один стрибок навантаження, оскільки в багатьох людей починається обідня перерва і виникає більше абонентів, які користуються послугами мобільного зв'язку. Ввечері спостерігається ГНН, мережа працює в піковому режимі. Після цього в подальшому абонентське навантаження зменшується.

Крім генерації абонентів необхідно ще встановити, яке навантаження створює окремий абонент в кожен момент часу.

Навантаження реальних абонентів залежить від багатьох факторів: часу доби, погоди, індивідуальних звичок і зацікавленостей кожного абонента. Разом з тим абоненти в більшості використовують найчастіше вживані сервіси, такі, як:

Навантаження реальних абонентів залежить від багатьох факторів: часу доби, погоди, індивідуальних звичок і зацікавленостей кожного абонента. Разом з тим абоненти в більшості використовують найчастіше вживані сервіси, такі, як:

- Голосовий дзвінок Skype -- 100 кбіт/с
- Відеодзвінок Skype від 300 кбіт/с
- Соцмережі – декілька комірокень кбіт/с
- Потокowe відео -- від 200 кбіт/с до декількох Мбіт/с (залежно від якості)
- Обмін файлами – таке навантаження, яке дозволить мережа, або термінал абонента.

Через досить високу вартість послуг доступу до мережі Інтернет дуже багато абонентів генерують низькошвидкісний трафік (соцмережі, голосові дзвінки, потокове відео низької якості), а зі зростанням швидкості кількість абонентів, які потребують її зменшується.

Параметри реальних абонентів не є сталими, а постійно змінюються. Також абонент не весь час користується певною послугою, а лише невелику свого часу. Тому доцільно абонентів в кожен момент часу ділити на дві групи: активних, тобто таких, що в даний момент часу займають ресурси мережі, пасивних, тобто таких, що практично не займають ресурси мережі і навантаженням яких можна знехтувати.

Індивідуальною особливістю абонента є ймовірність його активності. Зробимо припущення, що абоненти з ймовірністю  $P$  генерують трафік (активні абоненти) і з ймовірністю  $(1 - P)$  не генерують ніякого навантаження (пасивні абоненти).

Параметр  $P$  буде присвоюватися абоненту при його створенні.

Для кожного абонента у всій ітерації циклу моделювання будуть визначатися три параметри:

- Кількість ітерації циклу  $N_{it}$  протягом яких будуть сталими згенеровані параметри.

- Виходячи з ймовірності активності абонента  $P$  параметр «активний абонент» або «пасивний абонент»

- Навантаження абонента, Мбіт/с.

Абонент має квазісталі параметри. Це означає, що протягом  $N_{im}$  його швидкість, навантаження, параметр активності не змінюється. Після  $N_{im}$  ітерацій циклу відбувається перевизначення параметрів абонента, потім генерується сам параметр  $N_{im}$  і все починається знову.

Перед початком роботи моделі потрібно створити всі об'єкти моделювання і задати їм певні параметри. Послідовність дій наступна:

- 1) Визначення позицій макрокомірок відбувається згідно принципів детермінованої геометрії. Координати першої базової станції визначаються довільно, після чого будується рівносторонній трикутник з вершиною що відповідає базовій станції, і стороною, що відповідає діаметру макрокомірки.

- 2) У трикутнику генерується статистичний розподіл абонентського навантаження.

- 3) Визначення позицій пікокомірок: згідно згенерованого розподілу визначаються позиції базових станцій використовуючи параметричний точковий процес, при цьому перевіряємо, чи згенерована базова станція не є ближче до сусідньої базової станції ніж на діаметр пікокомірки.

- 4) Генеруємо координати абонентів випадковим чином в межах робочого поля моделі. Присвоюємо абонентам атрибути.

### **3.3.2 Оцінка ефективності застосування запропонованих рішень на основі імітаційного моделювання**

Після того, як відбулася ініціалізація об'єктів моделювання, необхідно з певною періодичністю здійснювати зміни їх параметрів, а також оновлювати робоче поле моделі, графіки.

Саме моделювання відбувається з використанням об'єкта «таймер», який кожних 50 мілісекунд подає запит на оновлення робочого поля. При цьому виконуються такі операції:

1) Для кожного абонента проводиться перерахунок параметрів. Згідно з поточною мобільністю переміщуємо абонента шляхом зміни його координати.

2) Проводиться розрахунок потенційного абонентського навантаження на кожен комірку. Для кожної комірки визначається, чи необхідно змінити її стан.

3) Виводимо на робоче поле геометричні фігури: Очищуємо робоче поле, згодом виводимо на екран оновлення робочого поля, лінії розмітки, трикутник, базові станції, радіуси дії фемтокомірок та макрокомірок.

4) Проводимо тесе́ляцію Вороного для пікомірок (інтегрованої LTE/Wi-Fi(LTE-U)) у межах трикутника, отримуємо багатокутники, що описують зони дії базових станцій, виводимо лінії, що утворені тесе́ляцією Вороного.

5) На робоче поле накладаємо абонентів.

6) Визначаємо потенційні базові станції абонента, які можуть його обслужити згідно принципів диференціації трафіку.

7) Від допустимої пропускну здатності віднімаємо пропускну здатність абонента.

8) Підраховуємо навантаження, спектральну ефективність, частку активних малих комірок, здійснюємо оновлення графіків.

Для отримання об'єктивних результатів, необхідно вдало підібрати параметри роботи моделі. Оскільки модель відображає роботу гетерогенної мережі з трьома рівнями базових станцій, то для кожного з рівнів базових станцій потрібно визначити такі параметри:

1) Потужність випромінювання і середній радіус дії.

2) Величина смуги частот

3) Режим передавання

4) Вид модуляції

5) Кількість базових станцій кожного рівня

Згідно із загальноновживаною класифікацією потужність МС становить 46 дБп, а радіус дії 1.2 км. Оскільки досліджувана область – один трикутник, який утворюється трьома базовими станціями, приймемо, що кількість МС рівна

трьом. Смуга частот, що надається макрокомірці становить 20 МГц. Для підвищення ефективності використання частот і як наслідок збільшення пропускної здатності використовується режим передавання MIMO 4x4 та модуляція 64QAM, при якій один символ переносить зразу 6 біт.

Малі комірки працюють в режимі передавання MIMO 2x2, мають смугу частот по 15 та 5 МГц, використовують модуляцію 64QAM. Кількість комірок вибрана на початку моделювання статично: пікокомірок – 25, фемтокомірок – 15, а в процесі моделювання адаптується динамічно в залежності від локалізації абонентського навантаження. Потужність дії пікостанцій 23- 30 дБп, радіус дії – 200-300м, потужність фемтокомірок – до 23 дБп, радіус дії – 50м. Топологія модельованої інтегрованої мережі LTE / LTE-U / Wi-Fi показано на рис.3.17.

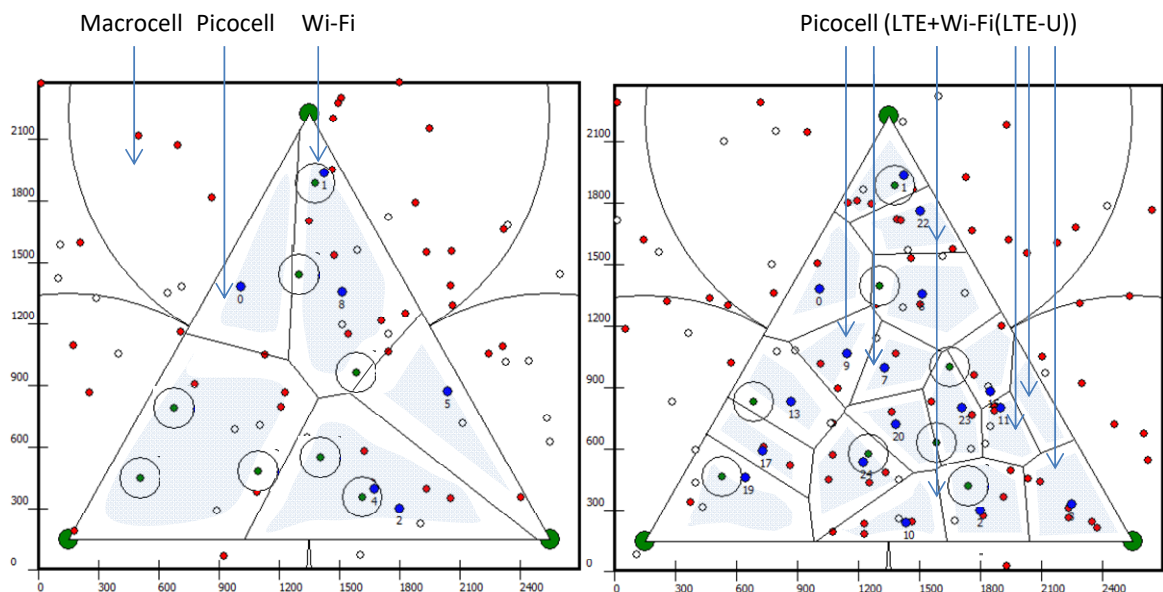


Рис.3.17 Топологія модельованої інтегрованої мережі LTE / LTE-U / Wi-Fi [4]

Завдяки використанню методу адаптивного формування структури рівня радіодоступу спостерігаються коливання спектральної ефективності. При невеликому навантаженні структура рівня радіодоступу цієї мережі схожа на структуру рівня радіодоступу звичайних однорівневих мереж, а також не суттєво відрізняється значенням спектральної ефективності системи. Маючи велике значення навантаження, мережа має яскраво виражену багаторівневу структуру рівня радіодоступу та високу системну ефективність спектра.

Оцінюючи ефективність впровадження певного методу, слід використовувати критерій ефективності. Таким критерієм може бути ймовірність того, що абонент отримає певну пропускну здатність каналу. Для цього у роботі використано кумулятивну функцію розподілу (cumulative distribution function, CDF) – функція, що описує ймовірність випадкової величини прийняти значення  $\leq$  конкретного значення.

На основі статистичних результатів, отриманих із серії моделювання 20, абоненту надається графік кумулятивної функції ймовірності (CDF) зі швидкістю передавання  $C$  Мбіт/с (рис.3.18).

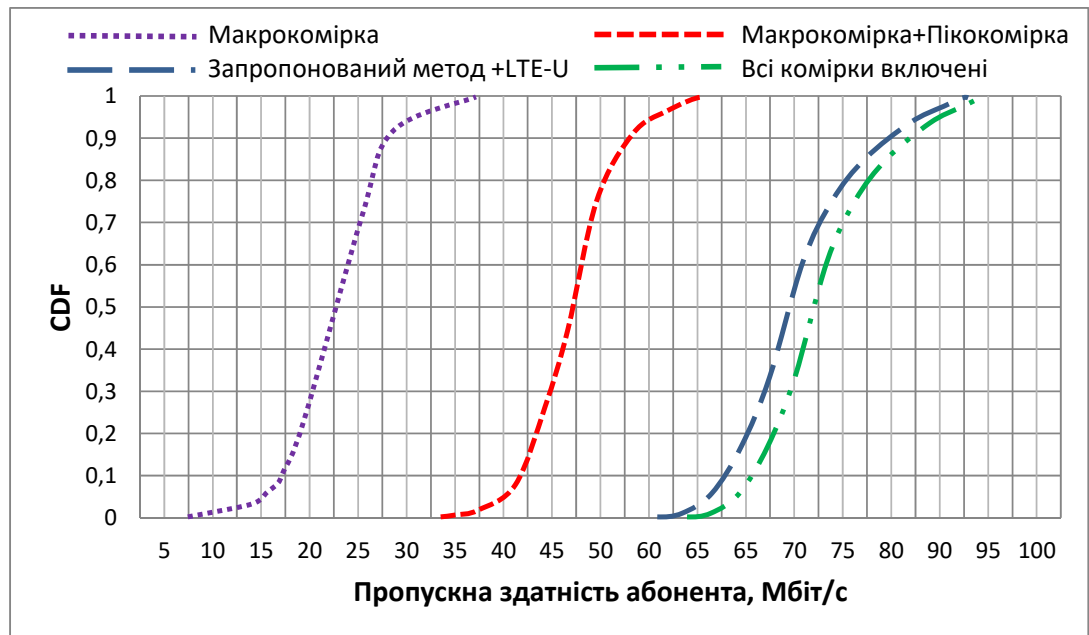


Рис. 3.18 Кумулятивна функція розподілу ймовірності середньої швидкості передавання для одного абонента в низхідному каналі при різних варіантах формування радіо структури [4]

На рис. 3.18 зображені криві, що відповідають чотирьом режимам роботи мережі:

- Працює лише макрокомірка (MC), (SC) вимкнені.
- Працює макрокомірка (MC) та пікокомірка (SC).
- Інтегрована SC з підтримкою LTE-U (SC+LTE-U) вмикаються і

вимикаються залежно від абонентського навантаження згідно запропонованого методу.

- Постійно включені всі SC.

З рис.3.18 випливає, що якщо мережа складається лише з рівня макрокомірок, то в середньому один абонент може отримувати пропускну здатність від 20 до 25 Мбіт / с, при обслуговуванні макрокоміркою та пікокоміркою 45-50 мбіт/с, а при обслуговуванні абонента в гетерогенній мережі з трьома рівнями базових станцій включаючи LTE-U використання неліцензійного діапазону Wi-Fi, середня пропускну здатність становить 67-71 Мбіт/с, відповідно коли усі включені малі комірки середня пропускну здатність становить 70-75 Мбіт/с. Порівнюючи графіки, отримані при конфігурації рівня радіодоступу таким чином, що включені усі малі комірки і коли працює метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу варто відзначити, що в другому випадку при зменшенні пропускну здатності на 1- 4 % спостерігається значний виграш в електроенергії 30 – 42 %. Це дасть змогу оператору надавати абонентам такі послуги, як якісне потокове відео, відеодзвінки в мережі, доступ до послуг IoT, а також зручність телемедицини для кожного абонента.

Внаслідок проведення 20 серій моделювання отримано графік середньої частки активних малих комірок (рис.3.19).



Рис.3.19 Графік середньої частки активних малих комірок [4]



Середня кількість активних малих комірок становить 58 %, тому немає необхідності, щоб всі SC були активними протягом всього часу. Дана мережа з використанням алгоритму адаптивного формування структури рівня радіодоступу володіє значно кращими показниками по енергоефективності, що на пряму впливає з середнього значення частки активних малих комірок.

Навіть в години найбільшого навантаження немає потреби вмикати всі пікокомірки та фемтокомірки, адже абонентське навантаження локалізоване нерівномірно і деякі базові станції не обслуговують жодного абонента. Використання методу адаптивного формування структури рівня радіодоступу алгоритму є ефективним як при низькому, так і при високому навантаженні на мережу, тільки при великому навантаженні спостерігається дещо менший вигравш в енергоефективності, ніж при невеликому.

Оскільки фемтокомірки мають малий радіус дії і встановлюються переважно всередині приміщень, вони частіше простоюють, ніж пікокомірки. Пікокомірки, які встановлюються для покриття території радіусом 200 – 300м є активними більший проміжок часу, ніж фемтокомірки, адже за рахунок більшого радіусу дії спостерігається більша ймовірність появи абонента в зоні дії пікокомірки, ніж в зоні дії фемтокомірки.

Зменшення пропускної здатності рівня радіодоступу, при використанні алгоритму адаптивного формування структури рівня радіодоступу зумовлене порогом чутливості малих комірок при якому відбувається зміна їх стану. Тобто якщо мала комірка знаходиться в енергозберігаючому режимі і реєструючи запити від абонентів встановлює, що їм необхідно надати лише дуже малу пропускну здатність, то, в цілях економії електроенергії мала комірка не перейде в активний режим і абонента буде обслуговувати макрокомірка. В ГНН це може спричиняти деяке зменшення ємності мобільної мережі. Проте, регулюючи поріг чутливості базових станцій можна зближувати криві графіка CDF, тим самим збільшуючи ємність мережі збільшувати енергоспоживання, і навпаки, віддаляючи криві одна від одної зменшувати ємність мережі, але покращувати енергоефективність.

### 3.4 Висновки до розділу 3

Проведено огляд покриття мереж радіодоступу на обраній області, за допомогою мобільних додатків у вільному доступі. Проаналізовано, де найбільш раціональним буде використання всіх трьох методів розвантаження, а саме:

- розвантаження за допомогою Wi-Fi;
- розвантаження за допомогою LTE-U;
- розвантаження за допомогою LTE/Wi-Fi/LTE-U.

Даний підхід дозволив збільшити пропускну здатність, тим самим покращивши якість обслуговування систем.

Для оцінки ефективності запропонованих рішень побудовано імітаційну модель з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу LTE/Wi-Fi. Модель розроблено з використанням мови програмування C++ та LTE-A Downlink System Level Simulator. У результаті моделювання, встановлено, що якщо мережа складається лише з рівня макрокомірок, то в середньому один абонент може отримувати пропускну здатність від 20 до 25 Мбіт/с, при обслуговуванні макрокоміркою та пікокоміркою 45-50 Мбіт/с, а при обслуговуванні абонента в гетерогенній мережі з трьома рівнями базових станцій включаючи LTE-U, середня пропускну здатність становить 67-71 Мбіт/с, відповідно коли усі малі комірки включені, то середня пропускну здатність становить 70-75 Мбіт/с.

На основі розробленої імітаційної моделі та реалізації алгоритму аналізу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі показано, що запропоновані рішення дають змогу підвищити енергоефективність мережі на 30-42% при зменшенні середньої пропускну здатності мережі на 1 – 4%.

## **РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ АДАПТИВНОГО ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ РІВНЯ РАДІОДОСТУПУ ТА ТЕХНІЧНІ АСПЕКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕГРОВАНИХ МЕРЕЖ LTE/WI-FI В КОРПОРАТИВНУ ІНФРАСТРУКТУРУ**

### **4.1 Дослідження топології реальної інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” для реалізації інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi**

Локальна обчислювальна мережа - це основа інформаційної інфраструктури НУ “Львівська політехніка”. Впровадження сучасних технологій і сервісів стає неможливим без керованої, прозорої, з точки зору функціонування, та надійної мережі, як стратегічної платформи для інформаційного забезпечення навчального процесу та господарської діяльності університету.

Локальна мережа охоплює всі навчальні корпуси НУ “Львівська політехніка”, які підключені переважно з використанням оптичних високошвидкісних магістралей, мережу гуртожитків, безпроводну мережу, мережі зовнішніх юридичних та фізичних осіб. На даному етапі сумарно наявно більше 11 тисяч точок підключення до мережі університету.

Спрощену логічну архітектуру досліджуваної мережі можна подати у вигляді сукупності сегментів мережі, структура, яких корелюється з організаційною структурою закладу, ця структура наведена на рис.4.1.

Умовно мережу можна поділити на 7 складових - зон, які відповідно позначені на рис. 4.1.

1. Це кореневий маршрутизатор, який складає основу ядра мережі і виконує функції по агрегації та маршрутизації трафіку з усіх зон мережі;
2. Демілітаризована зона;
3. Зона корпоративної мережі університету;
4. Зона мережі студмістечка університету;
5. Зона централізованої безпроводної мережі кампусу;
6. Зона підключення як внутрішніх так і зовнішніх користувачів до мережі з використанням технології ADSL;

7. Зона підключення користувачів по виділених оптичних та мідних лініях зв'язку.

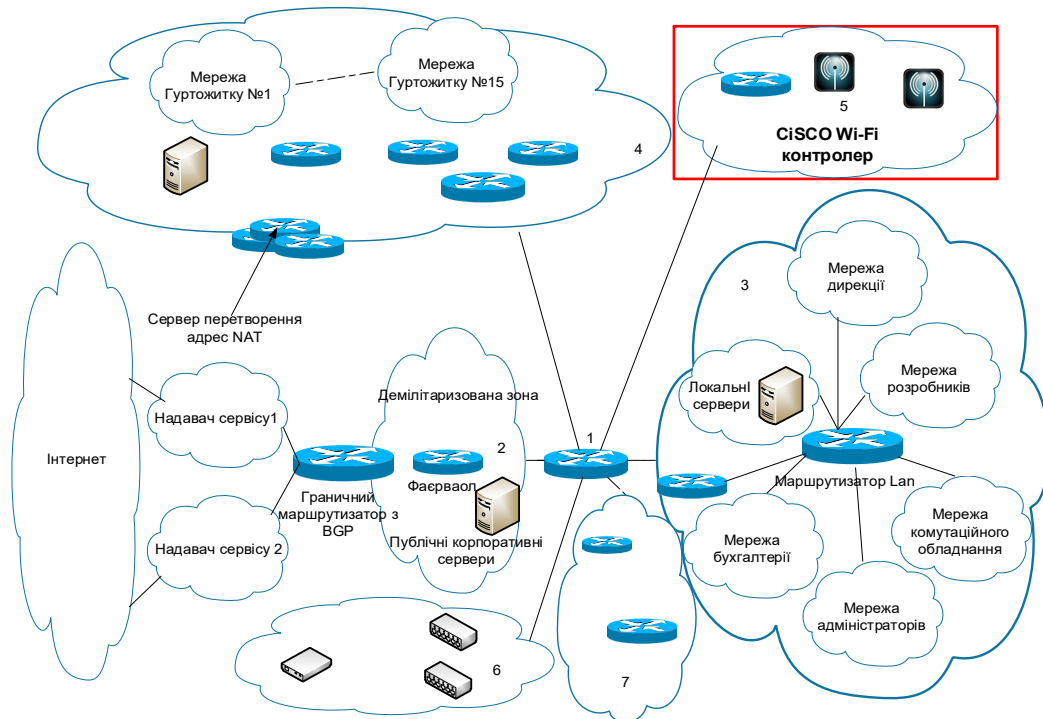


Рис. 4.1 Спрощена логічна структура інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка”

Основу мережі складають маршрутизатори, фаєрвол, публічні (розміщені в демілітаризованій зоні) та локальні сервери, а також сегменти локальної мережі, які відповідають підрозділам університету. Для маршрутизації інтернет трафіку використовується — граничний маршрутизатор з налаштованим протоколом динамічної маршрутизації BGP. Така конфігурація дозволяє використовувати одночасно два провайдера інтернет послуг- таким чином забезпечивши резервування каналів Інтернет.

У демілітаризованій зоні зосереджені сервери, що надають публічні сервіси. У даній зоні встановлений фаєрвол для захисту даних серверів від різного роду атак; а також для захисту мережі за рахунок гнучкого налаштування фільтрації пакетів, використовуючи пакетні фільтри та списки контролю доступу. Це дає можливість налаштувати передачу лише дозволеного трафіку. Використання серверів перетворення приватних адрес Nat дозволяє

приховати зі сторони інтернету внутрішню локальну мережу і ресурси мережі, забезпечивши при цьому доступ з локальної мережі до мережі Інтернет.

Мережа університету побудована відповідно до класичної трирівневої моделі: рівень ядра, рівень розподілу, рівень доступу. Такий розподіл дозволяє легко масштабувати мережу, додавати нові пристрої й функції. Система стає простіше для розуміння, супроводу й обслуговування. З'являється можливість реалізовувати дублювання важливих вузлів мережі та настроювати балансування навантаження між пристроями й каналами зв'язку.

Кожний рівень виконує свої певні завдання.

Рівень доступу не тільки забезпечує фізичне підключення користувачів до мережі. На цьому ж рівні виконуються функції, що впливають на такі якості мережі як:

- надійність (Spanning Tree - PVST+, Rapid PVST+, PortFast, UplinkFast, PAg/LACP, UDLD, протоколи маршрутизації);
- підтримка QoS (маркування трафіку, визначення границь "довіри", автоналаштування QoS);
- інтелектуальний розподіл багатоадресного трафіку (IGMP snooping);
- безпека (port security, DHCP snooping, 802.1x);
- можливість подавати електроживлення по мережному кабелі у відповідності зі стандартом IEEE 802.3af.

Рівень розподілу відповідає за агрегування трафіку від комутаторів рівня доступу й підключення до магістралі мережі. У функції рівня розподілу входить:

- забезпечення якості обслуговування;
- розподіл навантаження й швидке відновлення у випадку виникнення збоїв;
- агрегація трафіка від комутаторів рівня доступу;
- маршрутизація й комутація локального трафіка [14];
- реалізація політики керування трафіком;
- забезпечення безпеки й захисту від несанкціонованого доступу;

- маршрутизація між віртуальними мережами (VLAN).

Рівень магістралі поєднує всі конструктивні блоки мережі. Основні вимоги до цього рівня:

- найвища надійність;
- продуктивність.

Ядро мережі –це основна частина в організаційній схемі мережі. Структура схема ядра мережі університету приведена на рис.4.2. Ядро мережі формується комутаторами третього рівня Cisco Catalyst 6509, Cisco Catalyst 4948, D-Link DGS-6604, між якими забезпечено 10Гіг/с з'єднання та надлишкові з'єднувальні лінії з пропускнуою здатністю 1Гіг/с. Це дає можливість підвищити відмово стійкість основної ланки мережі, використовуючи протоколи динамічної маршрутизації. Крім цього в ядро мережі входить серверне обладнання яке забезпечує функціонування мережі та надання базових мережевих послуг.

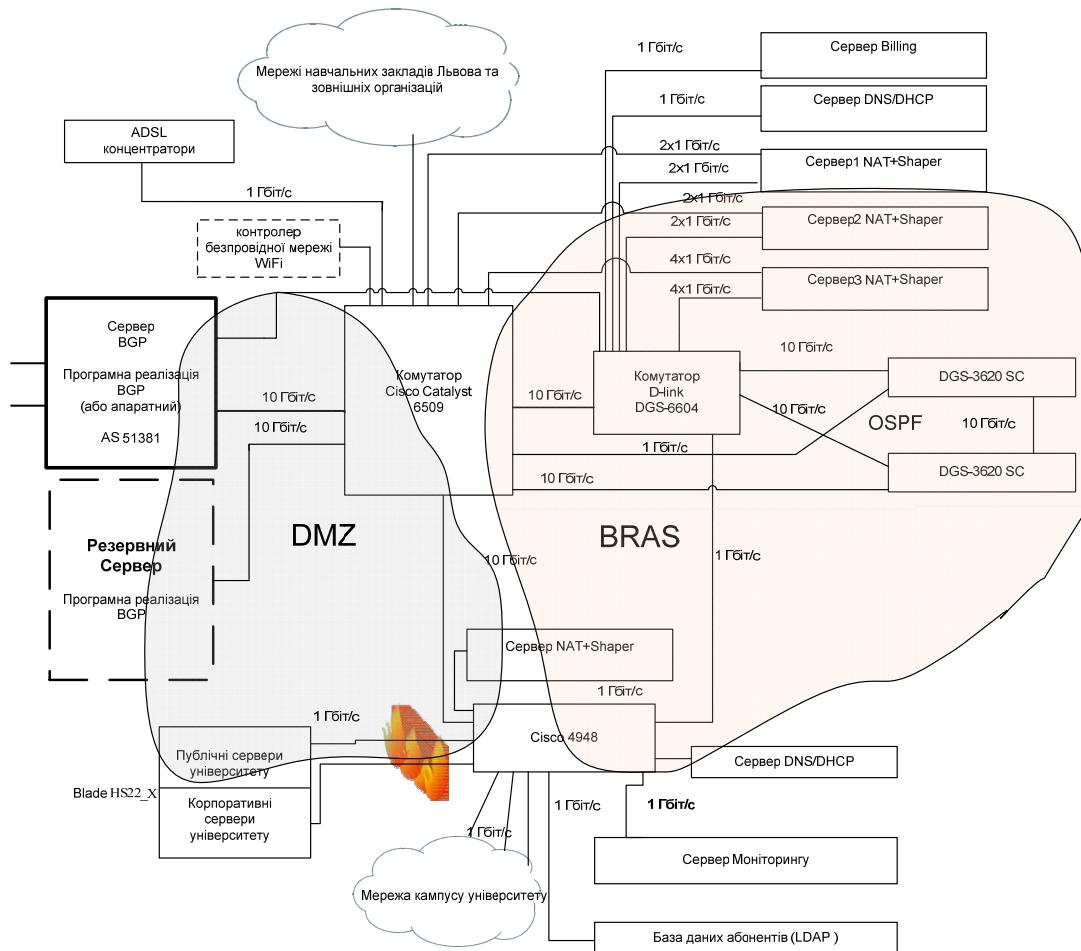


Рис. 4.2 Структурна схема організації ядра мережі університету

На рівні розподілу використовується високопродуктивне комутаційне обладнання, яке забезпечує функції фільтрації та маршрутизації внутрішнього мережевого трафіку. До цих пристроїв відносяться комутатори третього рівня Cisco Catalyst 3750, D-Link DGS-3620 SC.

Основна задача обладнання рівня доступу полягає у забезпеченні фізичного підключення пристроїв користувача до мережі. Тому тут використовується багатовендорне обладнання, що відповідає вимогам по надійності і володіє необхідним для надання послуг функціоналом.

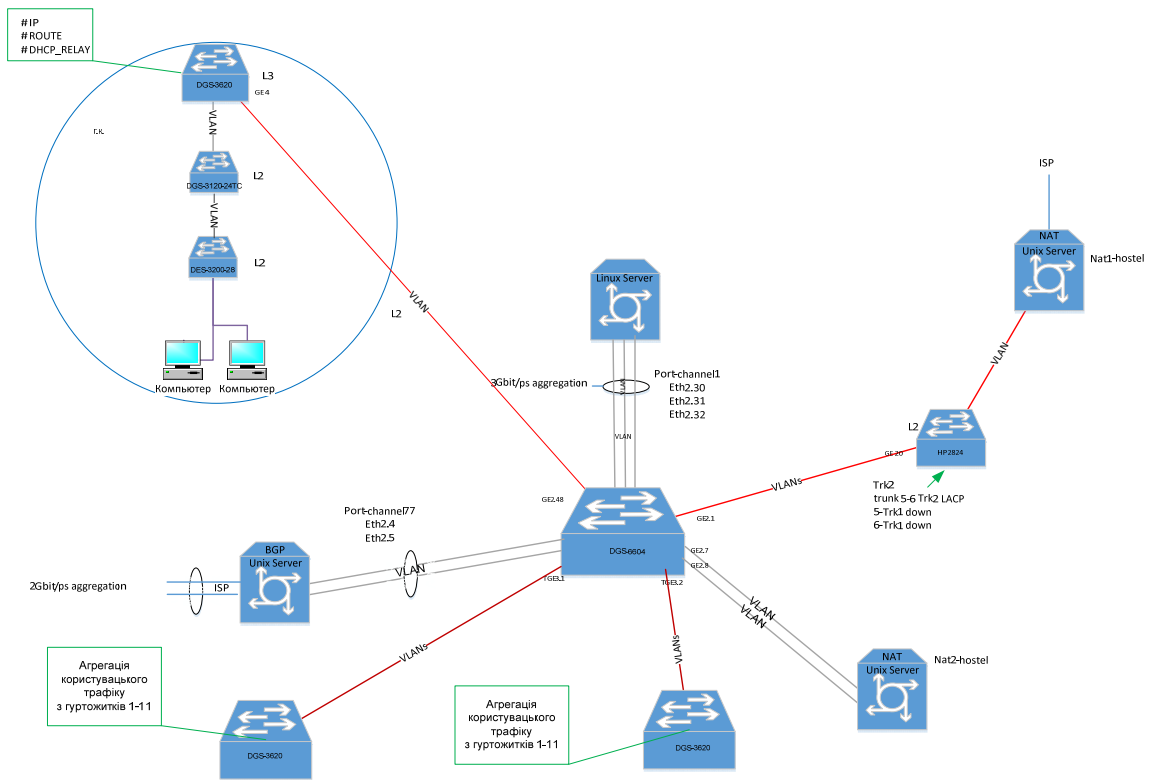
Основні послуги, які надаються з використанням мережі, це доступ до внутрішніх ресурсів, публічних корпоративних сервісів (веб-сайт університету, віртуальне навчальне середовище, доступ до системи NetStorage та ін.); корпоративна електронна пошта; організація спеціалізованих мереж та доступ до мережі Інтернет.

Провівши аналіз приведених вище даних можна зазначити наступні особливості досліджуваної мережі:

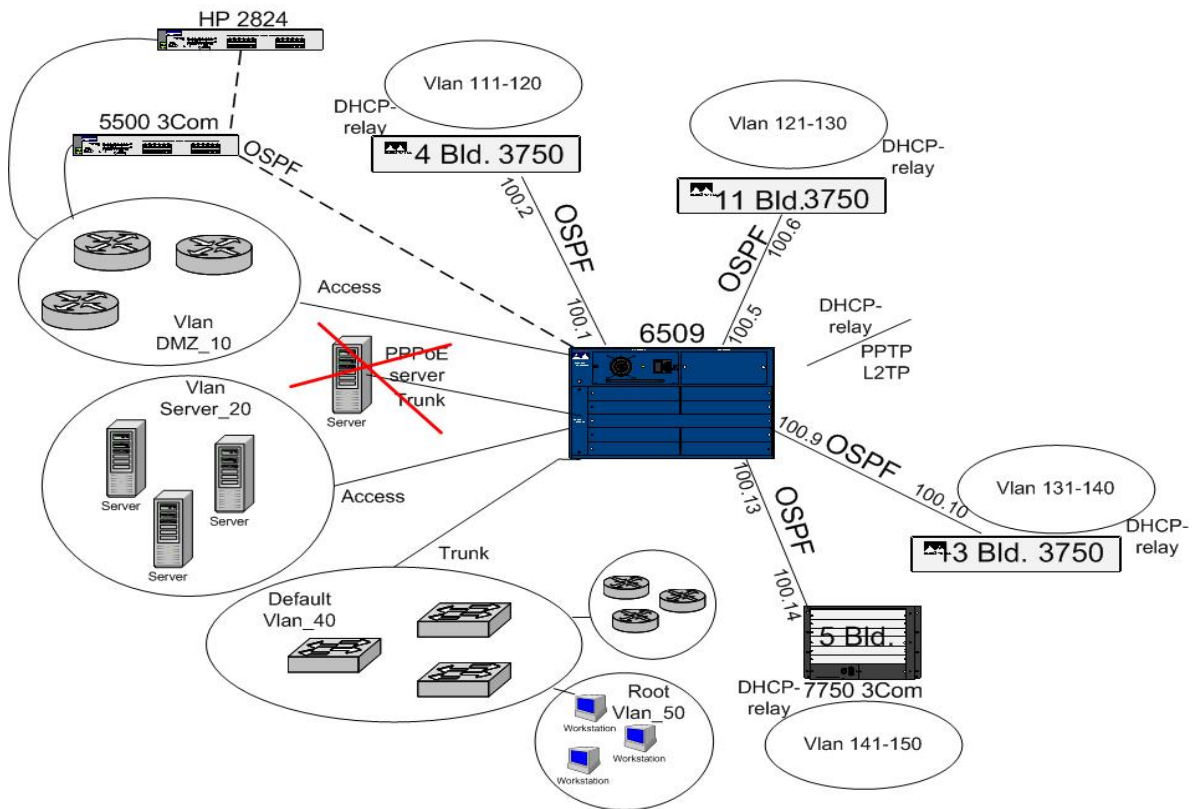
- велика кількість користувачів
- багатовендорність обладнання, що використовується
- хороша відмова стійкість
- складна структура
- використання великої кількості комутаційного обладнання

Схем рівня розподілу для мережі в зоні студмістечка університету та корпоративної мережі приведена на рис.4.3. В даному випадку на рівні розподілу використовується три комутатори третього рівня D-Link DGS-3620 SC, які підключаються безпосередньо до обладнання ядра мережі, в даному випадку комутатор третього рівня D-Link DGS-6604.

З рис.4.3 видно, що обладнання доступу в даному випадку комутатор D-Link DGS-3200-28 підключений через комутатор агрегації трафіку від комутаторів доступу на каналному рівні, D-Link DGS-3120, до L3 комутатора рівня розподілу D-Link DGS-3620 SC. По аналогії реалізовано підключення на рівні доступу у всіх гуртожитка студмістечка університету.



a)



б)

Рис. 4.3 Структурна схема організації рівня розподілу мережі зони студмістечка університету – а) та корпоративної мережі університету– б)



Централізована безпроводна мережа використовує контролер Cisco серії 5500 призначений для роботи в мережах 802.11n стандарту. Як і інші продукти Cisco дані контролери легко інтегруються в уже існуючу безпроводну мережу. Залежно від подальшого розвитку бізнесу і відповідно розширення мережі, існує можливість масштабування контролера за допомогою ліцензування та задіяння додаткового програмного забезпечення, без заміни самого обладнання.

Контролери Cisco серії 5500 здатні підтримувати від 12 до 250 точок доступу, при максимальній пропускній здатності 8Гбіт / с, дозволяючи обслуговувати при цьому до 7 000 користувачів одночасно.

Контролер Cisco 5500 серії дозволяє об'єднати в одну мережу пристрої Cisco Aironet access points, Cisco Wireless Control System (WCS), Cisco Mobility Services Engine. Вибудувати єдину систему безпеки, систему запобігання вторгнення, QoS. Точки доступу, що працюють під управлінням контролерів Cisco серії 5500, можуть підключатися до будь-якого інтернет-доступу, при цьому вся інформація буде в цілковитій безпеці, так як робота корпоративної мережі компанії здійснюється через захищений канал.

Підтримка контролерів Cisco серії 5500 здійснюється програмним ядром Cisco MSE, яке надає користувачам розширені функціональні можливості новітньої архітектури. Шляхом використання одного контролера можна розгорнути кілька сервісів. Для тестування та ознайомлення з їх роботою передбачені спеціальні Trail-версії, які дозволяють використовувати їх протягом обмеженого часу і в обмеженому масштабі.

Для 3 000 точок доступу підтримується адаптивна система wIPS Cisco, яка надає цілковиту інформацію про всі події, що відбуваються при передаванні даних, таких як спроби злому, хакерські атаки, блокування доступу і інші. Крім цього дана система може контролювати функціонування не тільки існуючої бездротової мережі, але і відстежувати спроби зовнішнього проникнення в мережеву структуру.

Завдяки системі централізованого управління безпроводною корпоративною мережею (Cisco Wireless Control System «WCS»), яка має вбудовані можливості планування і графічний інтерфейс, здійснюється пошук

несправностей в безпроводній мережі і надається гнучка система звітності. Залежно від необхідних вимог системного адміністратора, існує можливість індивідуальних налаштувань програмного інтерфейсу. Надзвичайно широкі функціональні можливості даного програмного забезпечення дозволяють контролювати повністю всю роботу безпроводної мережі: панель статистики; карта поверхів; надання повної інформації про помилки, несправності та інші.

Безпроводний контролер Cisco 5508 забезпечує надійну продуктивність, підвищену гнучкість і нульові втрати для критично важливих безпроводних з'єднань при хендовері з однієї точки доступу на іншу. Режим роботи мережі 802.11n в 9-ть разів збільшує її продуктивність, в порівнянні зі стандартом 802.11a / g. Інтерактивні мультимедійні додатки, такі як передача голосу і відео, тепер працюють бездоганно в безпроводних мережах даного типу, клієнти всередині мережі можуть легко переміщатися, без переривання з'єднання. Гнучке ліцензування дозволяє легко додавати доступ до нових точок доступу мережі (збільшуючи їх кількість), а також дозволяє оновлювати ліцензію до більш високого рівня. WI-FI контролер Cisco AIR-CT5508-250 підтримує можливість управління до 500 точок доступу Cisco, має можливість установки додаткового джерела живлення для більшої надійності. Розширення ємності контролера проводиться шляхом придбання і установки додаткових ліцензій. Контролер WI-FI Cisco 5508-250 має 8 портів SFP для надійного з'єднання з мережею агрегації, має вбудовані механізми балансування та резервування фізичних з'єднань з мережею передавання даних. Контролер має всі необхідні алгоритми криптографії щоб захистити свою мережу середовища передавання даних від атак і втрати інформації і є ідеальним рішенням для побудови надійних, безпечних безпроводних WI-FI мереж нового покоління.

У роботі розглядається спосіб інтеграції мобільної мережі LTE з безпроводною мережею Wi-Fi побудованої на базі контролера WI-FI Cisco 5508, що використовується в інформаційній мережі НУ “Львівська політехніка”. На рис.4.4 показано графічний інтерфейс системи централізованого управління безпроводною корпоративною мережею НУ “Львівська політехніка” на базі контролера Cisco 5508.

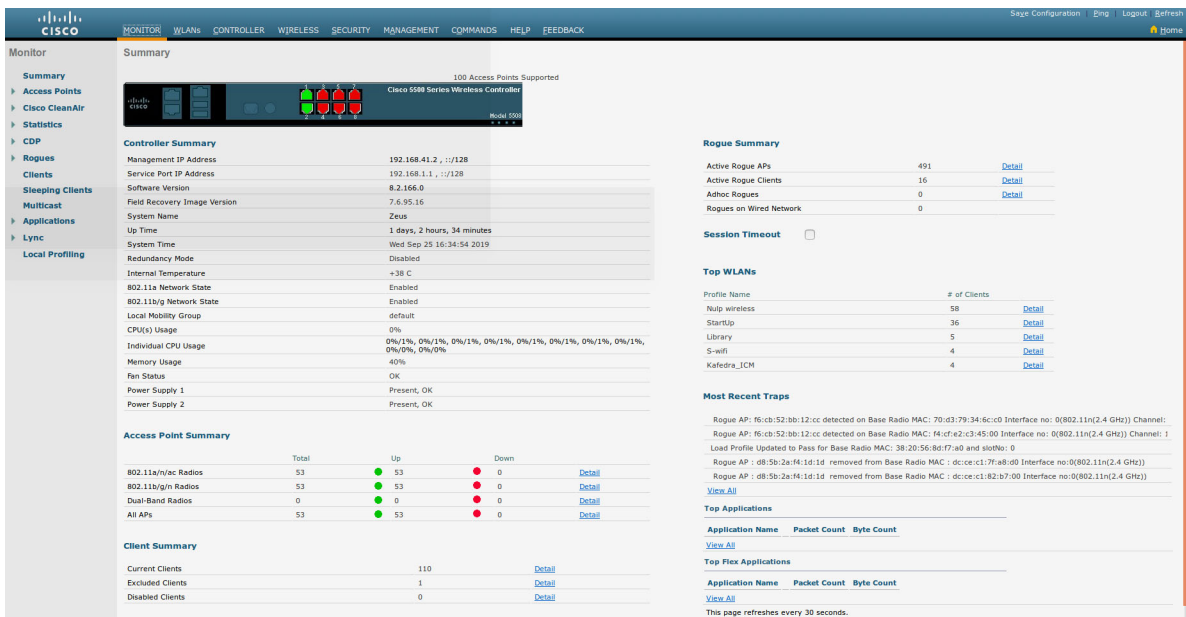


Рис.4.4 Графічний інтерфейс системи централізованого управління безпроводною корпоративною мережею НУ “Львівська політехніка” на базі контролера Cisco 5508

Для агрегації даних від точок доступу на контролері задіяно два порти 1 та 2 з 8 можливих портів. Статус портів можна перегляду з допомогою командного вікна

Контролер в корпоративній мережі університету служить для управління точками доступу компанії Cisco та надання користувачам високошвидкісний досту до Інтернету. Контролер є єдиним джерелом управління безпроводними точками доступу. Також використання контролера дає змогу вибудувати єдину систему безпеки, запобігання вторгнення і якості QoS, а також об'єднати в одну мережу пристрої Cisco Wireless Control System (WCS), Cisco Aironet access points і Cisco Mobility Services Engine.

Контролер Cisco підтримує 802.11n стандарт в мережі. Всі точки доступу, які працюють під його керуванням можуть підключатися до будь-якого інтернет-доступу, при цьому вся інформація буде в цілковитій безпеці, так як робота корпоративної мережі компанії здійснюється через захищений канал. Керовані контролером точки доступу можуть бути автономними (ті, які використовуються окремо і мають повноцінне ПО) і неавтономними (мають адаптоване ПО і можуть управлятися тільки контролерами).

```

Status and Counters - Port Counters for port 11
Name :
Link Status : Up
Totals (Since boot or last clear) :
  Bytes Rx : 80,853,600
  Unicast Rx : 2,939,588,694
  Bcast/Mcast Rx : 16,214,778
  Errors (Since boot or last clear) :
    FCS Rx : 0
    Alignment Rx : 0
    Runts Rx : 0
    Giants Rx : 0
    Total Rx Errors : 0
  Bytes Tx : 2,125,685,728
  Unicast Tx : 197,484,378
  Bcast/Mcast Tx : 295,799,338
  Drops Rx : 0
  Collisions Tx : 0
  Late Colln Tx : 0
  Excessive Colln : 0
  Deferred Tx : 0
Rates (5 minute weighted average) :
  Total Rx (bps) : 35123776
  Unicast Rx (Pkts/sec) : 5018
  B/Mcast Rx (Pkts/sec) : 3
  Utilization Rx : 03.51 %
  Total Tx (bps) : 17992200
  Unicast Tx (Pkts/sec) : 1835
  B/Mcast Tx (Pkts/sec) : 23
  Utilization Tx : 01.79 %

```

a)

```

Status and Counters - Port Counters for port 12
Name : Vudavnuctvo
Link Status : Up
Totals (Since boot or last clear) :
  Bytes Rx : 3,550,395,243
  Unicast Rx : 156,624,752
  Bcast/Mcast Rx : 15,655,590
  Errors (Since boot or last clear) :
    FCS Rx : 0
    Alignment Rx : 0
    Runts Rx : 0
    Giants Rx : 0
    Total Rx Errors : 0
  Bytes Tx : 183,477,960
  Unicast Tx : 2,805,138,617
  Bcast/Mcast Tx : 47,468,761
  Drops Rx : 0
  Collisions Tx : 0
  Late Colln Tx : 0
  Excessive Colln : 0
  Deferred Tx : 0
Rates (5 minute weighted average) :
  Total Rx (bps) : 23498344
  Unicast Rx (Pkts/sec) : 3152
  B/Mcast Rx (Pkts/sec) : 1
  Utilization Rx : 02.34 %
  Total Tx (bps) : 40527136
  Unicast Tx (Pkts/sec) : 5806
  B/Mcast Tx (Pkts/sec) : 0
  Utilization Tx : 04.05 %

```

б)

Рис. 4.5 Статус задіяних входних портів контролера з переглядом статистики –а) порт 11– б) порт 12

З допомогою системи моніторингу Check МК, що використовується для моніторингу ІТ-інфраструктури НУ “Львівська політехніка визначено інтенсивності входного та вихідного трафіку від користувачів Wi-Fi, у різні періоди часу на двох портах. За допомогою даного рішення у роботі пропонується відслідкувати моменти постійного простою мережі з метою переведення точок доступу у енергозберігаючий режим або навіть централізованого їх відключення для зменшення енергоспоживання.

Згідно з рис.4.6 бачимо що протягом тижня спостерігається постійний простій мережі на проміжку часу доби від 20.00 до 7.00 год. Що пояснюється відсутністю навантаження, а саме в межах безпроводного покриття Wi- Fi на території кампусу не спостерігається присутність студентів ,викладачів та іншого допоміжного персоналу.



Рис. 4.6 Статистика вхідного та вихідного навантаження на порти 1, 2 контролера Cisco 5508 протягом тижня

На рис.4.7 показано інформацію про кількість підключених користувачів до точок доступу централізованої Wi-Fi мережі в межах кампусу НУ “Львівська політехніка”, що дає змогу безпосередньо відслідковувати навантаження по кількості активних підключень з метою балансування навантаження [1].

AP Name	Slots	AP Model	Ethernet MAC	Location	Country	IP Address	Clients	DSE Location
AP217rGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b5:1a	217 room GK	UA	192.168.41.152	0	[0,0,0]
AP8rkolesy	2	AIR-CAP1602E-E-K9	04:62:73:26:72:b3	8 room kolesy fl	UA	192.168.41.154	2	[0,0,0]
APconfrkolesy	2	AIR-CAP1602E-E-K9	80:e0:1d:fe:4c:20	conference room	UA	192.168.41.155	18	[0,0,0]
AP301br4K	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b3:d6	301b room 4K	UA	192.168.41.142	1	[0,0,0]
AP4rkolesy	2	AIR-CAP1602E-E-K9	80:e0:1d:fe:4c:5d	4 room kolesy 3f	UA	192.168.41.144	7	[0,0,0]
AP109r11K	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b4:47	109 room 11K	UA	192.168.41.145	3	[0,0,0]
APhallrSB	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b5:c0	hall SB	UA	192.168.41.156	1	[0,0,0]
AP235rGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b5:9c	235 room GK	UA	192.168.41.149	2	[0,0,0]
APprjoectr13k	2	AIR-CAP1602E-E-K9	04:62:73:26:72:f9	project room ntc	UA	192.168.41.157	4	[0,0,0]
AP416r4K	2	AIR-CAP1602I-E-K9	80:e0:1d:fe:4a:ef	416 room 4K	UA	192.168.41.158	2	[0,0,0]
APAZ2r1k	2	AIR-CAP2702I-E-K9	74:a0:2f:ff:e3:dc	Aktova Zala room	UA	192.168.41.159	0	[0,0,0]
APhallNB	2	AIR-CAP2702I-E-K9	a4:6c:2a:26:21:30	Hall NB	UA	192.168.41.160	1	[0,0,0]
AP202rGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	80:e0:1d:fe:4a:bc	202 room GK	UA	192.168.41.161	1	[0,0,0]
AP6rkolesy	2	AIR-CAP1602E-E-K9	04:62:73:26:72:f8	3 room kolesy	UA	192.168.41.162	2	[0,0,0]
--More or (q)uit current module or <ctrl-z> to abort								
AP7rkolesy	2	AIR-CAP1602E-E-K9	04:62:73:26:72:f6	7 room kolesy	UA	192.168.41.163	3	[0,0,0]
AP2floorSB	2	AIR-CAP2702I-E-K9	a4:6c:2a:26:01:bc	2 floor SB	UA	192.168.41.129	5	[0,0,0]
APhallr1k	2	AIR-CAP2702I-E-K9	1c:6a:7a:92:40:64	hall 1k	UA	192.168.41.131	0	[0,0,0]
AP211rGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b4:0f	211 room GK	UA	192.168.41.165	5	[0,0,0]
AP340rGK	2	AIR-CAP2702I-E-K9	a4:6c:2a:88:c6:10	340 room GK	UA	192.168.41.141	3	[0,0,0]
AP114r1k	2	AIR-CAP2702I-E-K9	a4:6c:2a:88:d8:44	114 room 1k	UA	192.168.41.166	0	[0,0,0]
AP304rGK	2	AIR-CAP1702I-E-K9	70:df:2f:74:e7:b8	304 room GK	UA	192.168.41.143	2	[0,0,0]
AP105r20k	2	AIR-CAP1702I-E-K9	70:df:2f:4d:09:fc	105 room 5k	UA	192.168.41.121	2	[0,0,0]
AP218r1k	2	AIR-CAP2702I-E-K9	a4:6c:2a:88:c3:58	218 room 1K	UA	192.168.41.125	9	[0,0,0]
AP22rNB	2	AIR-CAP2702I-E-K9	74:a0:2f:92:41:b0	22 room NB	UA	192.168.41.122	9	[0,0,0]
AP210r4K	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b5:fd	210 room 4K	UA	192.168.41.146	3	[0,0,0]
AP141rGK	2	AIR-CAP1702I-E-K9	18:80:90:75:e5:d8	141 room GK	UA	192.168.41.147	1	[0,0,0]
AP211r1k	2	AIR-CAP2702I-E-K9	74:a0:2f:F3:2b:6c	211 room 1k	UA	192.168.41.127	7	[0,0,0]
AP309r11K	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b6:37	309 room 11K	UA	192.168.41.148	2	[0,0,0]
AP215r11k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b4:60	215 room 11k	UA	192.168.41.129	1	[0,0,0]
AP204rGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	80:e0:1d:fe:4a:60	204 room GK	UA	192.168.41.150	4	[0,0,0]
AP226rGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b6:13	226 room GK	UA	192.168.41.151	7	[0,0,0]
AP207rGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b6:42	207 room GK	UA	192.168.41.132	2	[0,0,0]
AP06rkolesy	2	AIR-CAP1602E-E-K9	5c:83:8f:d9:c0:30	06 room kolesy	UA	192.168.41.119	7	[0,0,0]
AP231rGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b5:b1	231 room GK	UA	192.168.41.133	3	[0,0,0]
APhall4K	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b4:a5	Hall 4K	UA	192.168.41.123	0	[0,0,0]
AP315r3k	2	AIR-CAP1702I-E-K9	18:80:90:87:40:b0	315 room 3k	UA	192.168.41.135	0	[0,0,0]
APAZ1r1k	2	AIR-CAP2702I-E-K9	1c:6a:7a:92:32:bc	Aktova Zala room	UA	192.168.41.137	0	[0,0,0]
--More or (q)uit current module or <ctrl-z> to abort								
AP218r11k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	80:e0:1d:fe:4a:be	218 room 11K	UA	192.168.41.136	0	[0,0,0]
APAZrGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	80:e0:1d:fe:4a:e7	Aktova Zala room	UA	192.168.41.138	1	[0,0,0]
AP328rGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b2:12	328 room GK	UA	192.168.41.120	2	[0,0,0]
AP223rGK	2	AIR-CAP1702I-E-K9	70:df:2f:74:ee:40	223 room GK	UA	192.168.41.126	2	[0,0,0]
AP305r11K	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b3:1a	305 room 11K	UA	192.168.41.128	7	[0,0,0]
AP3rkolesy	2	AIR-CAP1602E-E-K9	80:e0:1d:fe:4c:61	3 room kolesy	UA	192.168.41.134	1	[0,0,0]
AP121ar4k	2	AIR-AP1832I-E-K9	70:d3:79:34:00:80	121 room 4k	UA	192.168.41.169	7	[0,0,0]
APhallGK	2	AIR-CAP1602I-E-K9	80:e0:1d:fe:4a:71	Hall GK	UA	192.168.41.139	6	[0,0,0]
AP302r11K	2	AIR-CAP1602E-E-K9	5c:83:8f:d9:c0:35	302-303 room 11K	UA	192.168.41.60	1	[0,0,0]
AP205r11K	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b5:be	205 room 11K	UA	192.168.41.153	2	[0,0,0]
AP101rGK	2	AIR-CAP1702I-E-K9	70:df:2f:74:e0:3c	101 room GK	UA	192.168.41.167	3	[0,0,0]
AP607r5k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b0:c0	607 room 5k	UA	192.168.41.118	1	[0,0,0]
AP505r5k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:af:a7	505 room 5k	UA	192.168.41.140	1	[0,0,0]
AP511r5k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	80:e0:1d:fe:4a:c8	511 room 5k	UA	192.168.41.130	1	[0,0,0]
AP610r5k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b3:f0	610 room 5k	UA	192.168.41.164	0	[0,0,0]
AP809r5k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b1:bf	809 room 5k	UA	192.168.41.124	5	[0,0,0]
AP0462.7326.731a	2	AIR-CAP1602E-E-K9	04:62:73:26:73:1a	default location	UA	192.168.41.170	20	[0,0,0]

a)

84:89:ad:45:c8:a1	AP06rkolesy	0	Associated	6	Yes	802.11n(2.4 GHz)	13	No	No	Local
84:be:52:69:c7:25	APhallGK	0	Associated	1	Yes	802.11n(2.4 GHz)	13	No	No	Local
88:36:5f:d9:df:af	AP301br4K	0	Excluded	1	No	802.11n(2.4 GHz)	13	No	No	Unassociated
88:78:73:94:8a:c7	APconfrkolesy	1	Associated	6	Yes	802.11n(5 GHz)	13	No	No	Local
88:bd:45:a8:1b:70	AP340rGK	1	Associated	1	Yes	802.11ac(5 GHz)	13	No	No	Local
90:61:ae:34:43:7e	AP22rNB	0	Associated	3	Yes	802.11n(2.4 GHz)	13	No	No	Local
94:7b:e7:06:91:81	APconfrkolesy	1	Associated	6	Yes	802.11n(5 GHz)	13	No	No	Local
94:87:e0:4b:25:60	AP109r11K	0	Associated	1	Yes	802.11n(2.4 GHz)	13	No	No	Local
98:0c:a5:b1:82:f7	AP309r11K	0	Associated	1	Yes	802.11n(2.4 GHz)	13	No	No	Local
9c:4e:36:a0:9a:24	AP22rNB	0	Associated	3	Yes	802.11n(2.4 GHz)	13	No	No	Local
a0:28:ed:a2:77:61	AP4rkolesy	1	Associated	6	Yes	802.11n(5 GHz)	13	No	No	Local
a0:a8:cd:20:b9:76	APconfrkolesy	1	Associated	6	Yes	802.11n(5 GHz)	13	No	No	Local
a8:7d:12:55:2c:9c	AP215r11k	0	Associated	1	Yes	802.11n(2.4 GHz)	13	No	No	Local
ac:1f:74:84:85:48	AP218r1K	0	Associated	1	Yes	802.11n(2.4 GHz)	13	No	No	Local
ac:5f:3e:f9:e8:ea	AP2floorSB	1	Associated	1	Yes	802.11ac(5 GHz)	13	No	No	Local

b)

Рис.4.7 Інформація про кількість підключених користувачів до деяких точок доступу централізованої Wi- Fi мережі в межах університету а) та інформація про підключених користувачів до точок доступу з 2.4 ГГц та 5 ГГц діапазоном частот

Відповідно, для зменшення енергоспоживання мережі Wi-Fi у роботі здійснено реалізацію механізму автоматизованого включення та виключення точок доступу на період часу від 20.00 до 7.00 год кожного дня шляхом

написання скрипта, що запускається на контролері Wi-Fi. Таке рішення дало змогу зменшити енергетичне споживання.

```
import pexpect
def wrls(pasw):
    wf = 'config wlan security wpa akm psk set-key ascii ' + (pasw) + ' 2'
    child = pexpect.spawn('ssh 192.168.15.29')
    child.timeout = 40
    child.expect('User:')
    child.sendline('admin')
    child.expect('Password:')
    child.sendline('password')
    child.expect('Cisco Controller')
    child.sendline('config wlan disable 2')
    child.expect('Cisco Controller')
    child.sendline(str(wf))
    child.expect('Cisco Controller')
    child.sendline('config wlan enable 2')
    child.expect('Cisco Controller')
    child.sendline('save config')
    child.expect('Are you sure you want to save')
    child.sendline('y')
    child.expect('Cisco Controller')
    child.sendline('logout')
    child.expect(pexpect.EOF)
```

Рис.4.8 Вікно зчитування скрипт вайла контролером Wi-Fi

## 4.2 Практична реалізація методу адаптивного формування радіоструктури Wi-Fi мережі НУ “Львівська політехніка”

На основі вищезгаданих можливостей управління мережею в дисертаційній роботі реалізовано метод адаптивного формування радіоструктури Wi-Fi мережі НУ “Львівська політехніка” принцип роботи якого описано у 2 розділі. Суть методу полягає у адаптації розміру покриття комірки залежно від локалізації користувачького навантаження в умовах недостатності ресурсів пропускної здатності для користувачів.

З допомогою контролера можна регулювати потужності випромінення WAP. В графічному інтерфейсі для регулювання рівня потужності передавача присвоюється ціле значення замість значення в мВт або дБм. Ціле число відповідає рівню потужності, який варіюється залежно від нормативного домену, в якому розгорнуто точки доступу. Кількість доступних рівнів потужності залежить від моделі точки доступу. Проте, рівень потужності 1 завжди є максимальним допустимим рівнем потужності для кожної WAP, при цьому кожний наступний рівень потужності становить 50% від попереднього рівня потужності. Наприклад,  $P_{s.level} = 1$  – максимальний рівень потужності,  $P_{s.level} = 2$  – 50% потужності,  $P_{s.level} = 3$  – 25% потужності,  $P_{s.level} = 4$  – 12,5%

потужності і так далі (рис.4.9). Графічний інтерфейс на контролері Wi-Fi для зміни рівня потужності випромінювання точки доступу показано на рис.4.10

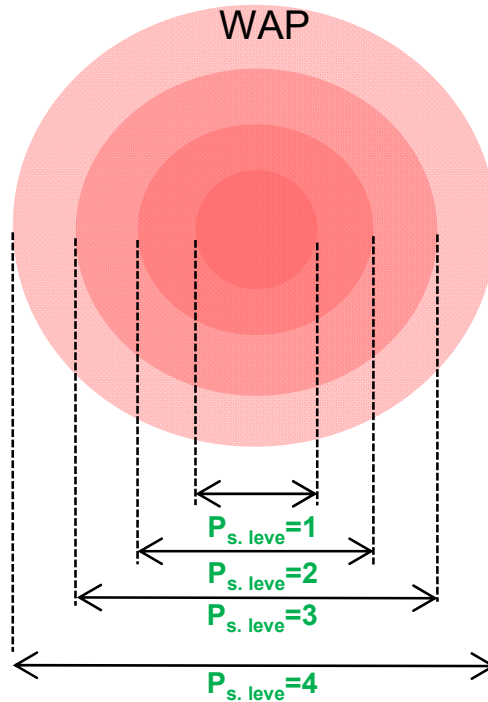


Рис.4.9 Розмірк покриття Wi-Fi комірки в залежності від рівня потужності випромінювання точки доступу

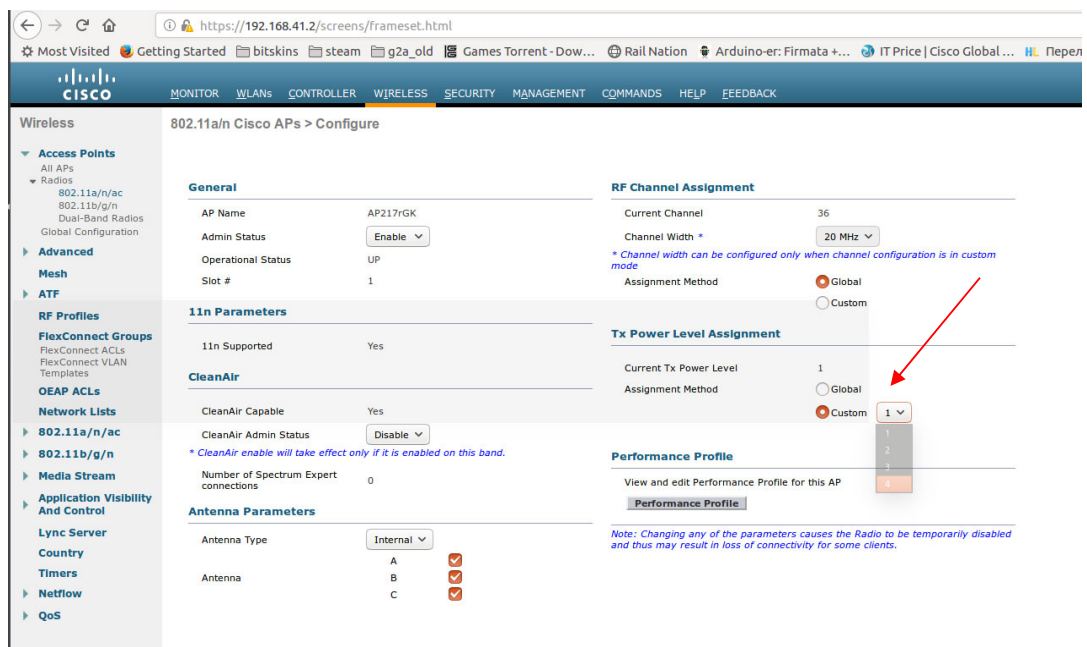


Рис.4.10 Графічний інтерфейс для зміни рівня потужності випромінювання точки доступу



З допомогою контролера Wi-Fi, системи моніторингу та графічного інтерфейсу для централізованого управління мережею проведено балансування навантаження між двома точками доступу WAP-1 та WAP-2. Для автоматизованого балансування навантаження розроблено Script-файл, який реалізує метод адаптивного формування розміру комірки в залежності від локалізації навантаження та ступеня завантаження точки доступу. На рис.4.10 показано мінімальний поріг  $RSSI = -75$  dBm при якому відбувається хендовер між сусідніми точками доступу. Моніторинг рівня сигналу користувача з допомогою контролера Wi-Fi показано на рис.4.11.

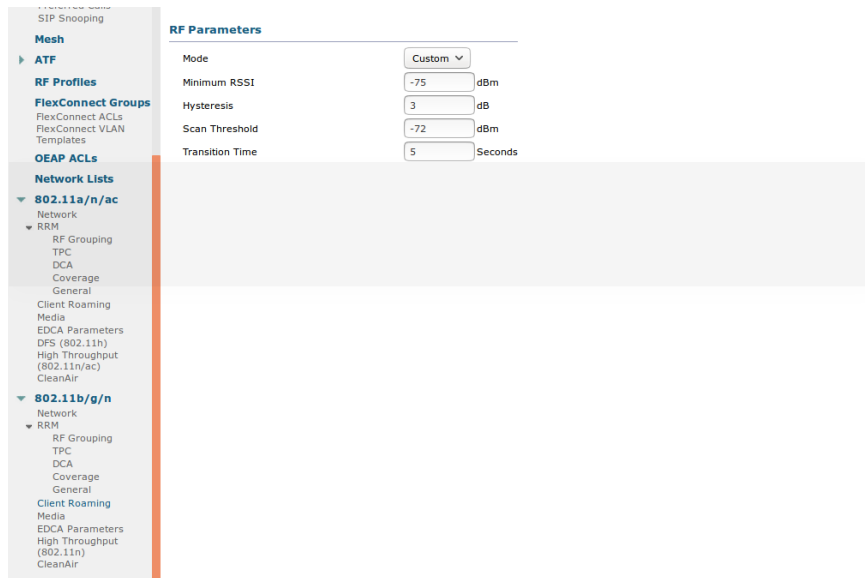


Рис.4.11 Встановлення порогу рівня сигналу при якому відбувається плавний хендовер

Client Statistics	
Bytes Received	6639061
Bytes Sent	129537465
Packets Received	61830
Packets Sent	94191
Policy Errors	0
RSSI	-69
SNR	28
Sample Time	Wed Sep 25 15:55:25 2019
Excessive Retries	0
Retries	0
Success Count	0
Fail Count	0
Tx Filtered	0
Data Retries	40628
Rts Retries	0
Duplicates	787
Decrypt Failed	0
Mic Errors	0
Mic Missing Frames	0
RA Packets Dropped	0
Interim Updates sent	21
This page refreshes every 90 seconds	

Рис.4.12 Моніторинг рівня сигналу користувача з допомогою контролера Wi-Fi

У роботі реалізовано метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі в корпоративній інфраструктурі НУ “Львівська політехніка” залежно від навантаження та локалізації користувачького навантаження. Експеримент проводився в 11 корпусі НУ “Львівська політехніка” між точками доступу WAP-1 AP305r11k та WAP-2 AP302r11k, що знаходяться на 3 поверсі кафедри телекомунікації (рис.4.13). Принцип роботи даного методу показно на рис.4.14.

AP109r11k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b4:47	109	room	11K	LAG	UA	1
AP309r11k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b6:37	309	room	11K	LAG	UA	1
AP215r11k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b4:60	215	room	11k	LAG	UA	1
AP218r11k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	80:e0:1d:fe:4a:be	218	room	11K	LAG	UA	1
AP305r11k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:d9:b3:1a	305	room	11K	LAG	UA	1
AP302r11k	2	AIR-CAP1602E-E-K9	5c:83:8f:d9:c0:35	302-303	room	11K	LAG	UA	1
AP205r11k	2	AIR-CAP1602I-E-K9	5c:83:8f:e3:b5:be	205	room	11K	LAG	UA	1

Рис.4.13 Інформація про кількість підключених користувачів до точок доступу централізованої Wi-Fi мережі в межах інституту ІТРЕ

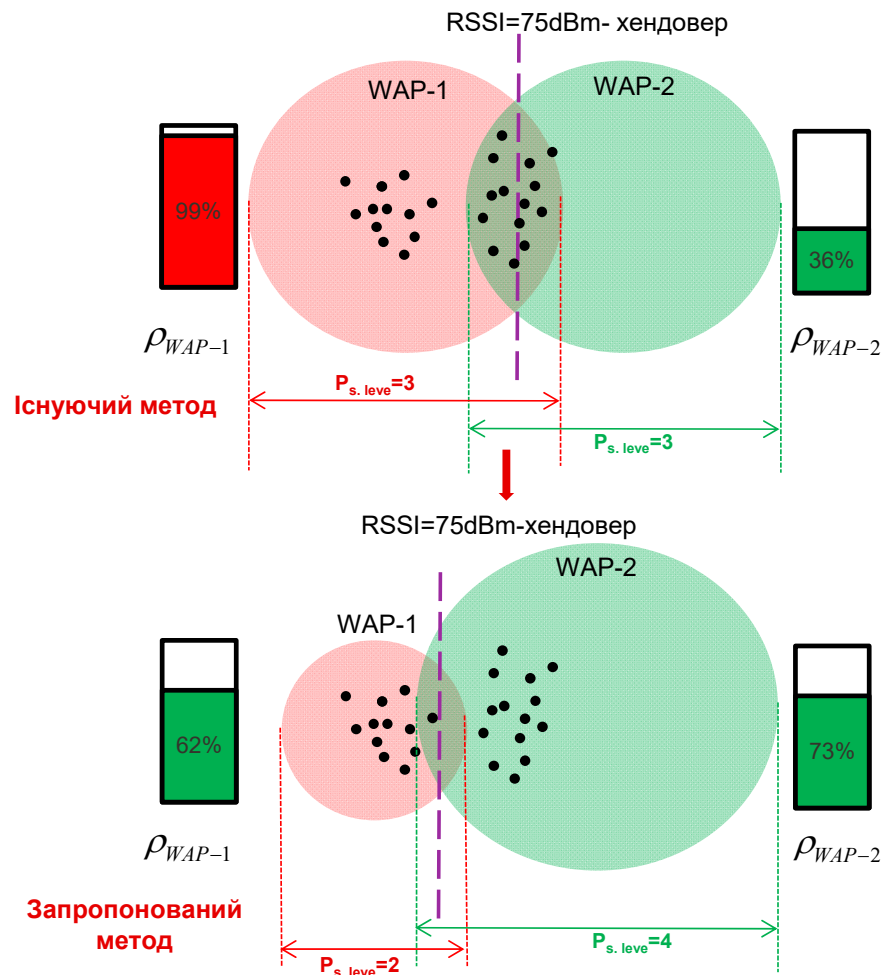


Рис.4.14 Метод адаптивного формування розміру комірки в залежності від навантаження та локалізації користувачького навантаження

Для експерименту було залучено групу із 26 студентів, приблизна локалізації місця знаходження яких показано на рис. Всі студенти перебували на місці без зміни положення. З використанням своїх смартфонів кожен зробив авторизацію та підключення до точок доступу (для усіх користувачів назва Wi-Fi мережі є nulр). Максимальна пропускна здатність кожної із точки доступу становить  $R_{\max_{WAP}} = 10 \text{ Мбіт/с}$ . Кожен із студентів переглядали відео у ютубі якості 360р, що вимагає середньої пропускної здатності каналу 0,52 мбіт/с для однієї сесії. В таблиці 4.1 наведено рекомендовані необхідні пропускні здатності каналу для репрезентації сервісу YouTube зрізним розширенням.

Таблиця 4.1

Рекомендовані необхідні пропускні здатності каналу для репрезентації сервісу  
YouTube

Розширення	Станціонарні пристрої		Мобільні пристрої
	Стандартна частота кадрів	Висока частота кадрів	
2160p (4K)	35–45 Мбіт/с	53–68 Мбіт/с	13.5 Мбит/с
1440p (2K)	16 Мбіт/с	24 Мбіт/с	6 Мбит/с
1080p (Full HD)	8 Мбіт/с	12 Мбіт/с	3 Мбит/с
720p (HD)	5 Мбіт/с	7.5 Мбіт/с	1.5 Мбит/с
480p	2.5 Мбіт/с	4 Мбіт/с	0.7 Мбит/с
360p	1 Мбіт/с	1.5 Мбіт/с	0.5 Мбит/с
240p	-	-	0.25 Мбит/с

Таким чином, необхідна пропускна здатність каналу для користувачів WAP-1 становить

$$R_{\text{заг-}WAP} = \sum_{i=1}^n r_i \quad (4.1)$$

де  $r_i$ - виділена пропускна здатність для  $i$  користувача,  $n$ -кількість активних користувачів у кімнаті Wi-Fi.

Оскільки, у кімнаті WAP-1 кількість активних користувачів згідно рис.4.13 становить  $n=19$ , що переглядають однотипний відеосервіс YouTube з розширенням 360, то загальна використана пропускна здатність каналу

$R_{заг. WAP-1} = \sum_{i=1}^{19} 0,52 = 9,88 \text{ мбіт} / \text{с}$ . Аналогічно для WAP-2, коли  $n = 7$  загальна

використана пропускна здатність каналу  $R_{заг. WAP-2} = \sum_{i=1}^7 0,52 = 3,64 \text{ мбіт} / \text{с}$ .

Навантаження на WAP можна розрахувати як :

$$\rho_{WAP} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{R_{\max WAP}} = \frac{R_{заг. WAP}}{R_{\max WAP}} \quad (4.2)$$

Підставивши значення в формулу 3.1  $\rho_{WAP-1} = \frac{9,88}{10} = 0,988 \approx 0,99$

та  $\rho_{WAP-2} = \frac{3,64}{10} = 0,364 \approx 0,36$ . Отже, без використання запропонованого методу

користувачі WAP-1 не мають змогу перегляду відео у кращій якості, оскільки зайнята уся пропускна здатність каналу. Підключення нових користувачів є також неможливим. У цей самий час ресурсів пропускної здатності каналу використовуються лише на 36%. Проте, базуючись на критерію кращого рівня сигналу необхідного для реалізації хендвера, дана точка доступу не має змоги розвантажити точку доступу WAP-1.

З використанням запропонованого методу контролер автоматично прийме рішення про адаптацію розміру комірки залежно від локалізації користувачького навантаження на основі ідентифікації по MAC-адреса кінцевих пристроїв та їх виміряних RSSI. Після застосування запропонованого методу відбулося балансування навантаження. Відповідно, у комірці WAP-1 кількість активних користувачів згідно рис.4.13 становить  $n = 12$ , що переглядають однотипний відеосервіс YouTube з розширенням 360 . Загальна використана пропускна здатність каналу становить  $R_{заг. WAP-1} = \sum_{i=1}^{12} 0,52 = 6,24 \text{ мбіт} / \text{с}$ .

Аналогічно для WAP-2, кількість користувачів  $n = 14$  загальна використана пропускна здатність каналу становить  $R_{заг. WAP-2} = \sum_{i=1}^{14} 0,52 = 7,28 \text{ мбіт} / \text{с}$ . Відповідно

навантаження на комірці WAP-1 та WAP-2 дорівнює  $\rho_{WAP-1} = \frac{6,24}{10} = 0,624 \approx 0,62$

та  $\rho_{WAP-2} = \frac{7.28}{10} = 0.728 \approx 0.73$ . Використання даного методу дає змогу користувачам точки доступу WAP-1 переглядати відео у кращій якості або підключати додаткових користувачів. Аналогічно для точки доступу WAP-2. Повсюдне використання запропонованого методу в централізованій Wi-Fi мережі в межах кампусу НУ “Львівська політехніка” дасть змогу забезпечити користувачам високошвидкісний доступ до інтернету, отримати сервіси кращої якості та підвищити доступність до мережі Wi-Fi в умовах високого навантаження.

### 4.3 Побудова імітаційної моделі інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” в середовищі Ornet Modeler

За допомогою середовища Ornet Modeler у роботі побудовано імітаційної модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі реальної інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” (рис.4.15).

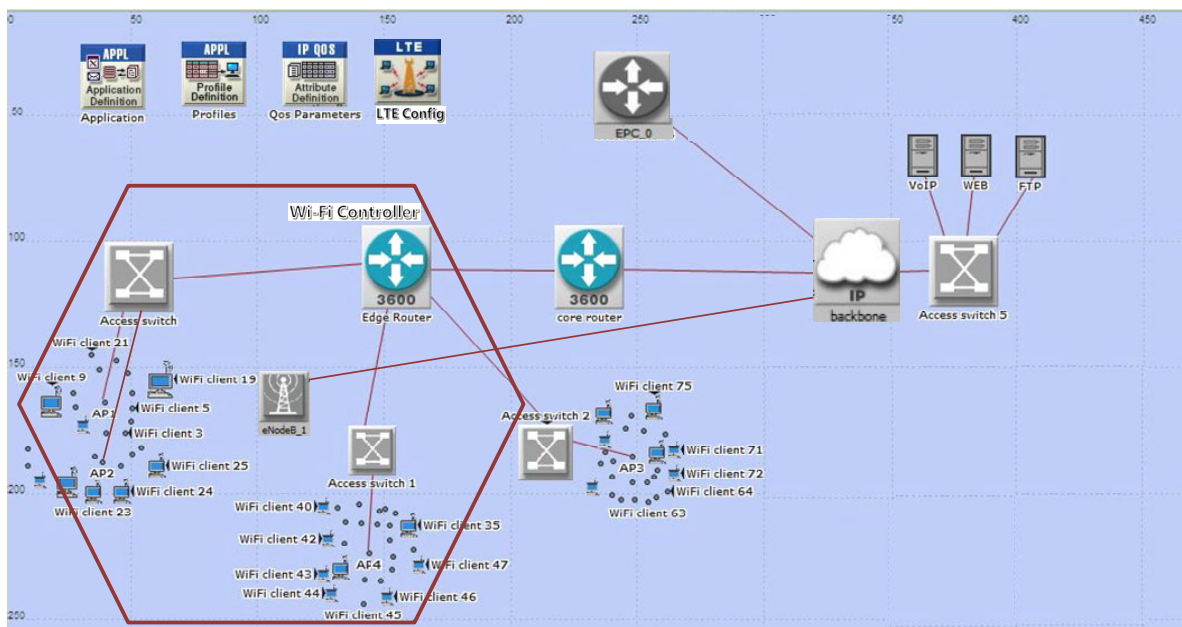


Рис. 4.15 Структура інтегрованої LTE /Wi-Fi мережі, що досліджується на базі інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка”

Для прикладу в імітаційній моделі інтегрована LTE/Wi-Fi мережа реалізується лише для сегменту інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” в межах території головного корпусу, оскільки саме в середині головного корпусу забезпечити хорошим мобільним покриттям LTE є складно за рахунок значних товщин стін та значної кількості перегородок.

Структура імітаційної мережі побудована за трирівневою архітектурою, тобто має приграничний маршрутизатор ядра корпоративної мережі, який може об’єднувати корпоративну мережу із загальною мережею оператора Data Group. Маршрутизатори рівня розподілу, який виконує функції Wi-Fi контролера Cisco 5508 та виконує функції агрегації трафіку від комутаторів доступу.

Точки доступу під’єднуються до комутаторів доступу, забезпечуючи користувачам можливість безпроводного доступу до ресурсів мережі. Базова станція LTE мережі, що покриває територію головного корпусу НУ “ЛП”. А також кінцеві пристрої, а саме планшети, смартфони, ноутбуки, комп’ютери.

У безпроводній Wi-Fi мережі користувачі оператора LTE мають можливість без розриву з’єднання підключатися з одного типу мережі на інший, а саме з LTE на Wi-Fi та з Wi-Fi на LTE в залежності від ступеня отриманого рівня сигналу від двох мереж та їх завантаженості. Оскільки рівень сигналу покриття LTE в середині головного корпусу є набагато гірший ніж внутрішньої централізованої Wi-Fi мережі більшість користувачів підключатимуться саме Wi-Fi з метою підвищення якості обслуговування мобільних абонентів оператора, що орендує корпоративну Wi-Fi мережу НУ “Львівська політехніка”.

Серед послуг, що надаються в корпоративній мережі та доступні для безпроводних користувачів є: VoIP – передання голосу IP, WEB дані, FTP додатки, мультимедіа. Передавання голосу, згідно з рекомендаціями ITU-T відноситься до 1 класу трафіку Interactive Voice та має вимоги до забезпечення якості, такі як: кінцева затримка знікця в кінець між двома користувачами не повинна перевищувати 250 мс, джитер – не більше ніж 50 мс та відсток втрачених пакетів – 0.001. Сервіс FTP додатків відноситься до 4 класу обслуговування – Excellent Effort та має наступні вимоги – кінцева затримка –

1с, відкомірокок втрачених пакетів – 0.001. Сервіс WEB серфінгу може обслуговуватися за останнім класом та не має жодних обмежень щодо якості обслуговування. Для врахування параметрів, що наведені вище, необхідно провести налаштування мережевих пристроїв в імітаційній моделі та встановити необхідні мінімальні вимоги для кожного із сервісів для забезпечення QoS (Quality of Service). Оцінка параметрів QoS проводиться в умовах різного ступеня завантаження.

Вимоги до моделювання:

- моделювання здійснюється від безпроводного користувача до серверу з сервісом, який цей абонент вимагає;
- параметри якості надання послуг мають бути оцінені для безпроводних користувачів;
- має враховуватися трафік в інших канал зв'язку у випадку ГНН;
- У моделі присутній лише трафік сервісів, будь-який сервісний або фоновий трафік не враховується.

Налаштування моделі здійснюється наступним чином:

- створення топології з використанням обладнання та каналів зв'язку;
- створення профілів користувача, які сервіси можна використовувати тому чи іншому користувачу;
- налаштування профілів системи, які сервіси існують в мережі, та які параметри цих сервісів;
- налаштування параметрів забезпечення якості в мережі за допомогою поля ToS та DSCP у IP пакеті.

На сьогодні наявна корпоративна мережа НУ “Львівська політехніка” налаштована за принципом FiFo, оскільки в мережі не спостерігаються високі навантаження та існуючі мережені ресурси є достатніми для забезпечення необхідного рівня QoS. В умовах експлуатації сервісів Voip у години найбільшого навантаження в мережі з'явилися проблеми із затримкою та погіршенням якості зв'язку голосових даних. Для вирішення цього завдання на приграничному маршрутизаторі було сконфігуровано пріоритизацію послуг з допомогою алгоритму PQ. Та надано VoIP послугам найвищий пріоритет в

обслуговуванні в приграничному маршрутизаторі. Таке рішення забезпечило необхідну якість VoIP послугам.

Проте в роботі для реалізації високоякісної інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі, необхідно налаштувати механізми пріоритезації на всіх мережевих пристроях корпоративної мережі, оскільки зростає навантаження від мобільних користувачів.

При моделюванні досліджувались механізми обслуговування черг WFQ Class Based, Priority Queuing, Custom Queuing. Черги формуються на точках доступу, контролері та маршрутизаторі мережі. Результати моделювання наведені на рисунку 4.16. Як бачимо використання черг для корегування роботи в мережі в умовах високого навантаження мають гарний ефект. Так, використання політики WFQ Class Based (класових черг) дозволяє зменшити затримки мультимедіа додатків реального часу майже в 2.5 рази, тепер затримки задовольняють вимоги QoS.

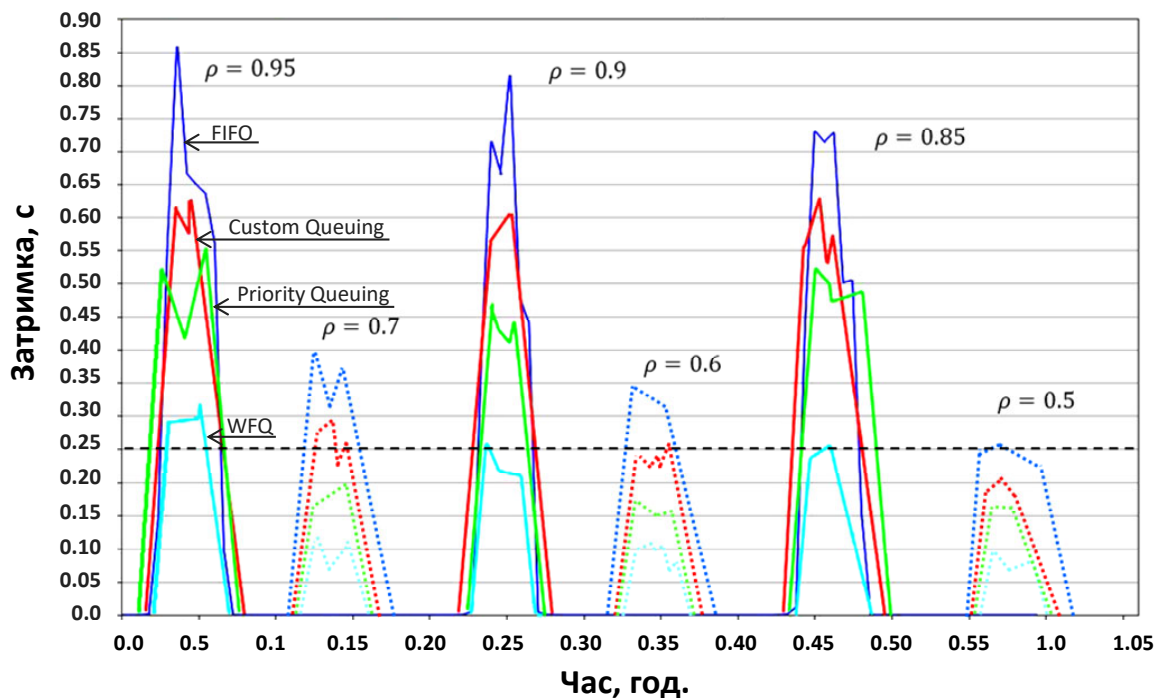


Рис. 4.16 Порівняння затримки обслуговування потоків реального часу в корпоративній мережі при конфігурації різних дисциплін обслуговування черг на мережевих пристроях в умовах різного навантаження



Порівняльна характеристика різних видів формування черг

Механізм	Кінцева затримка, мс	Частка втрачених пакетів
WFQ CB	300	0.0
Priority Queuing	430	0.0015
Custom Queuing	520	0.02
Без черги	900	0.1

Практичний аналіз та дослідження довели, що керування мережею за допомогою формування черг WFQ CB на основі пріоритезації трафіку дають змогу зменшити затримки в мережі в годину найбільшого навантаження до трьох разів, та задовольняють вимоги забезпечення якості QoS в умовах високого навантаження. QoS – це набір технологій мережевого та канального рівнів, застосування яких дозволяють ефективніше використовувати ресурси мережі, особливо під час передавання трафіку реального часу для забезпечення необхідного рівня якості сприйняття послуги [5].

#### 4.4 Дослідження ефективності використання модифікованої дисципліни обслуговування черги на канальному рівні Wi-Fi мережі

Для дослідження ефективності розробленої модифікованої дисципліни обслуговування черги використовується комплекс імітаційного моделювання, який складається з наступних компонентів:

- середовище імітаційного моделювання Opnet Modeler [195];
- інтерактивне середовище для програмування Matlab [196];
- медіаплеєр VLC [42];
- утиліта TcpReplay [43];
- програма-аналізатор трафіку Wireshark [44].

Першим кроком для проведення дослідження є отримання з допомогою медіаплеєра VLC і програми-аналізатора трафіку Wireshark з вихідного відеофайлу, який містить вихідне відеозображення, так званого pcap-файлу, який містить пакети канального рівня вихідного відеопотоку і відносні часові

мітки, коли ці пакети мають бути поставлені в чергу. Для цього медіаплеєр VLC і програма-аналізатор трафіку Wireshark запускаються на одному комп'ютері, медіаплеєр VLC виступає в ролі мультимедійного сервера, який здійснює передачу відеозображення з вихідного відеофайлу по мережі, а аналізатор трафіку Wireshark записує трасувальний pcap-файл з вихідними пакетами. Отриманий pcap-файл являється вхідними даними для середовища імітаційного моделювання Opnet Modeler, всередині якої пакети з pcap-файлу додаються в чергу канального рівня згідно наявних часових міток, і моделюється передача пакетів між станціями по мережі Wi-Fi. Opnet Modeler моделює канальний і фізичний рівні мережі Wi-Fi, в тому числі дисципліну обслуговування черги, затримки при поширенні сигналу, інтерференцію, втрати пакетів і інші ефекти.

Для дослідження модифікованої дисципліни обслуговування черги вона також була реалізована в Opnet Modeler. Вихідними даними Opnet Modeler являється pcap-файл, який містить пакети канального рівня отриманого відеопотоку з часовими мітками, які відповідають моментам отримання цих пакетів. У вихідному pcap-файлі відображені виникаючі при передаванні ефекти, а саме затримки і можливі втрати пакетів. Далі необхідно перетворити пакети канального рівня, які містять відеопотік, у відеозображення. Для цього утиліта Tsreplay і медіаплеєр VLC запускаються на одному комп'ютері, утиліта Tsreplay виступає в ролі сервера, а медіаплеєр VLC виступає в ролі клієнта для перегляду відеозображення з можливістю збереження його у відеофайл. Таким чином, на даному кроці маємо вихідний і кінцевий відео файли, у яких записані вихідне і передане по мережі відеозображення.

При передачі відеоконтенту через мережу відбувається зміна вихідної якості зображення. Забезпечення високих значень параметрів мережі може не означати високу якість сприйняття послуги людиною. Зір людини володіє нелінійною поведінкою та суб'єктивністю. Тому найкращим способом оцінки сприйняття обробленого відео є відгук самого користувача про якість. Найпростішим варіантом оцінки параметра QoE може служити суб'єктивна оцінка якості відео MOS(Mean Opinion Score) і в рекомендації ITU-T BT.500.

Ця оцінка являється усередненим значенням оцінок кількох спостережень отриманих на основі використання методики MCE8T (ITU8T) з використанням п'ятибальної системи:

- 5 — відмінно;
- 4 — добре;
- 3 — задовільно;
- 2 — погано;
- 1 — незадовільно.

Як правило оцінюють наступні параметри:

- час встановлення з'єднання;
- завмирання зображення;
- розбиття зображення;
- синхронізацію зображення та голосу;
- чіткість та розбірливість звуку.

Для незалежної оцінки якості відеозображення існують спеціальні метрики, найбільш реалістичною з яких прийнято вважати суб'єктивну метрику оцінки якості відеозображення MOS (від англ. Mean Opinion Score - середня експертна оцінка) [1-3]. Значення MOS вираховується на основі оцінки якості зображення групою експертів, які переглядають відеозображення один або декілька разів згідно строго регламентованої процедури. Очевидно, що такий спосіб оцінки якості відеозображення хоч і дає змогу отримати оцінку, яка найбільше відповідає дійсності, але є надто ресурсозатратним. Для більш швидкої оцінки якості відеозображення розробляються об'єктивні метрики, значення яких, як правило, вираховуються шляхом здійснення деяких математичних операцій над оригінальним (тобто вихідним/неушкодженим/не стиснутим) і кінцевим (спотвореним/пошкодженим/стиснутим) відеозображеннями. Ціллю кожної об'єктивної метрики є отримання оцінки, якомога ближчої до MOS. Часто для оцінки відеозображення використовують показник MSE (від англ. Mean Squared Error - середньоквадратична похибка) [200], яка для двох кадрів (оригінального X і кінцевого Y розміром M N пікселів кожен) вираховується як:

$$MSE_{XY} = \frac{1}{MN} \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N |\vec{X}(m,n) - \vec{Y}(m,n)|^2, \quad (4.3)$$

де  $\vec{X}(i,j)$  - вектор, який характеризує піксель зображення  $X$  з координатами  $(i,j)$ . Наприклад, для зображення в градаціях сірого  $\vec{X}(i,j)$  складається всього лиш з однієї компоненти, яка характеризує градацію (відтінок) сірого кольору даного пікселя, яка збігається з яскравістю пікселя. Для кольорового зображення компоненти вектора  $\vec{X}(i,j)$  залежать від використовуваної колірної моделі (наприклад, YUV, RGB, CMYK та інші). Однак так як око людини найбільш чутливе до яскравості зображення, то навіть для кольорового зображення замість вектора  $\vec{X}(i,j)$  часто використовується скаляр, який характеризує лише яскравість даного пікселя. У даній дисертаційній роботі при розрахунку MSE будуть порівнюватись саме компоненти яскравості пікселів зображень. Очевидно, що якщо зображення  $X$  та  $Y$  співпадають, то  $MSE_{XY} = 0$ . Для цілого відеофрагмента значення показника MSE зазвичай приймається рівним середньому значенню MSE по всім відеокадрам або їх сумі. Ця метрика широко використовується завдяки низькій обчислювальній складності і простій фізичній інтерпретації. Подання значення показника MSE в логарифмічному вигляді приводить до метрики PSNR (від англ. Peak Signal-to-Noise Ratio – пікове відношення сигналу до шуму):

$$PSNR_{XY} = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX_I^2}{MSE} \right), \quad (4.4)$$

де  $MAX_I$  – максимально можливе значення пікселя зображення, в розглянутому випадку – максимальне значення яскравості пікселя зображення.

Для оцінки якості відеозображення, яке передається по мережі вихідний і кінцевий відеофайли аналізуються всередині інтерактивного середовища програмування Matlab, яка обчислює метрику MSE.

### **Постановка експериментів**

Для дослідження ефективності застосування модифікованої дисципліни обслуговування черги приводиться серія експериментів, у яких точка доступу мережі Wi-Fi в середовищі імітаційного моделювання Opnet Modeler передає

однакові відеопотоки тривалістю 30 секунд двом отримувачам. Для розсинхронізації передавання відеопотоків моменти початку їх передавання зсунуті відносно один одного на 5 секунд. Протягом експерименту ймовірність  $per = 1 - p$  невдалої спроби передавання пакета становить  $per = per_0$ , за винятком проміжку часу, коли для першого отримувача настає короточасна відмова каналу тривалістю  $\tau$ , значення якого варіюється в діапазоні (150, 400) мс з кроком 50 мс. Протягом короточасної відмови каналу ймовірність невдалої спроби передавання пакета отримувачу з відмовою каналу («червоному» отримувачу) стає рівною 1. Обмеження  $D^{QoS}$  на час доставки пакета складає 400 мс [12, 14, 15].

Для визначення значення  $per_0$  проводиться декілька калібрувальних експериментів з використанням стандартної дисципліни обслуговування черги FIFO і значенням максимальної кількості спроб передавання пакета  $RL = 7$ . Проведення калібрувальних експериментів має на увазі відсутність короточасної відмови каналу. У якості значення  $per_0$  вибирається максимальне значення  $per$  ймовірності невдалої спроби передавання пакета, при якому обидва відеопотоки передавались би без будь-яких спотворень в кожному з проведених запусків експерименту. Для отримання статистично надійних результатів для кожного фіксованого значення  $per$  проводиться декілька запусків калібрувального експерименту, протягом яких також записується динаміка розміру черги пакетів, що передаються. Оскільки відеопотік володіє змінною інтенсивністю, протягом експерименту відбуваються сплески кількості пакетів в черзі. На цій же діаграмі позначений момент часу  $t_{start} = 16,8$  с початку короточасної відмови каналу тривалістю  $\tau$ , який при проведенні всіх експериментів спеціально вибирається перед початком росту кількості пакетів у черзі, що дозволяє продемонструвати ефективність застосування базової модифікованої дисципліни обслуговування черги в достатньо жорстких умовах.

### **Чисельні результати**

Моделювання передавання відеопотоків проводиться при використанні двох дисциплін обслуговування черги: дисципліни FIFO, яка використовується по замовчуванню в мережах Wi-Fi, і запропонованої модифікованої дисципліни

обслуговування черги. При цьому для дисципліни FIFO розглядається випадок  $RL = 7$  і  $RL = \infty$ , а для модифікованої дисципліни обслуговування черги при  $RL = 7$  варіюється значення параметра  $P$ .

На рис. 4.17 показані залежності метрики MSE прийнятого відеозображення, обрахованої як сума значень MSE всіх його відеокадрів, від тривалості відмови каналу для «незадоволеного якістю» і «задоволеного якістю» отримувачів. Для кожної експериментальної точки проводилось по 50 запусків експерименту для отримання статистично достовірних даних.

При тривалості відмови каналу, рівної 150 мс, використання дисципліни FIFO при значенні  $RL = 7$  призводить до того, що використавши 7 спроб передавання, пакети для «незадоволеного якістю» отримувача відкидаються і відеозображення на «червоному» отримувачі спотворюється. Модифікована дисципліна та використання нескінченного значення параметра  $RL$  в даній ситуації дозволяють уникнути зниження якості зображення для двох отримувачів. При відмовах каналу більшої тривалості використання дисципліни FIFO призводить до того, що через численні невдалі спроби передавання пакетів для «незадоволеного якістю» отримувача черга починає збільшуватись, що надалі призводить до видалення з черги пакетів як для «незадоволеного якістю», так і для «задоволеного якістю» отримувачів через перевищення обмеження на час доставки пакета. Криві, які відповідають нескінченному значенню параметра  $RL$ , практично у всіх точках лежать вище кривих, які відповідають  $RL = 7$ , оскільки у випадку нескінченного значення  $RL$  протягом майже всього інтервалу відмови каналу точка доступу буде пробувати передати один з пакетів для «незадоволеного якістю» отримувача, заморожуючи при цьому обслуговування всіх інших пакетів. Це призводить до ще більш швидкого збільшення черги і подальшого видалення з черги пакетів для обох отримувачів через перевищення обмеження на час доставки пакета.

Для дослідження ефективності пропонованого алгоритму обслуговування черг проводиться серія експериментів, у яких точка доступу передає відеопотоки реального часу декільком отримувачам і в одного з них відбувається відмова каналу. Також розглядається адаптивний циклічний

планувальник, який був запропонований в [35] як вирішення проблеми блокування черги при короткочасних відмовах каналу в безпроводній мережі.

Таким чином, у експериментах проводиться порівняння ефективності використання наступних дисциплін обслуговування черги: FIFO, ARR, PR.A- 1 – пропонується модифікований алгоритм FIFO; PR.A-2 – пропонується алгоритм обслуговування черг із врахуванням допустимого часу очікування.

### Експеримент 1. Передача двох однакових відеопотоків

У даному експерименті точка доступу Wi-Fi передає однакові відеопотоки двом різним отримувачам з невеликим зсувом початку передавання. На рис. 4.17 і 4.18 показані отримані значення MSE для «незадоволеного якістю» і «задоволеного якістю» отримувачів, відповідно. При використанні дисципліни FIFO після досягнення максимальної кількості невдалих спроб передавання пакет відкидається з черги. При цьому точка доступу витрачає на здійснення повторних спроб передавання багато каналних ресурсів, тому деякі пакети для «задоволеного якістю» отримувача відкидаються з черги. Отже, протягом експерименту втрачаються пакети обох відеопотоків, що веде до значного росту значень MSE для обох отримувачів. Дисципліна ARR, запропонована в [35], також не може запобігти погіршенню якості відеопотоків для обох отримувачів.

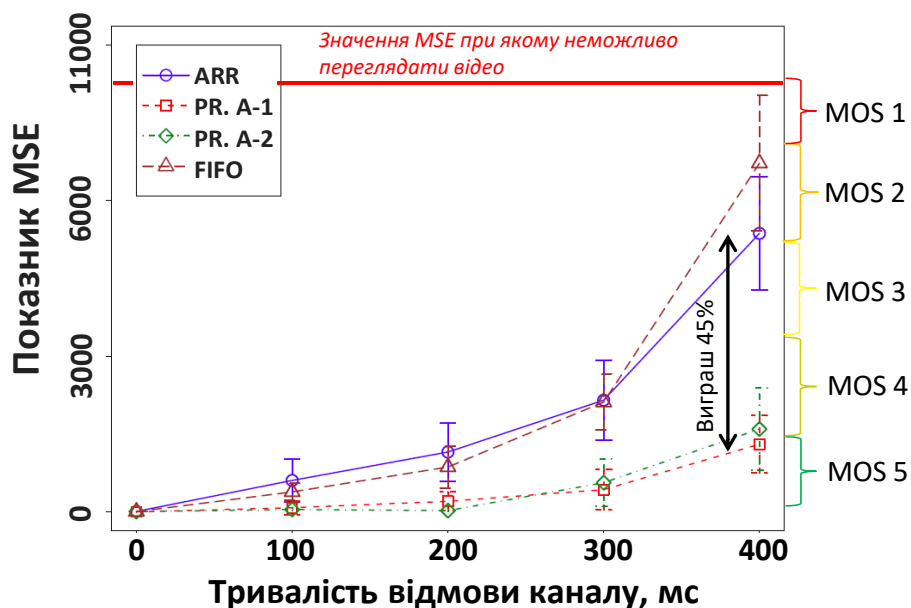


Рис. 4.17 Значення метрики MSE для «незадоволеного якістю» отримувача в експерименті 1

При використанні базової дисципліни Р – В ненульові значення MSE для обох отримувачів спостерігаються починаючи з 200 мс. Це відбувається через те, що дисципліна Р – В починає обслуговувати чергу згідно принципу FIFO зразу після детектування закінчення погіршення якості з'єднання. Точка доступу витрачає всі каналні ресурси на обслуговування скупчених на початку черги пакетів «незадоволеного якістю» отримувача, при цьому пакети для обох отримувачів починають відкидатись з черги через перевищення обмеження на час доставки пакета, викликаючи цим погіршення якості відеозображення, що приймається, і ріст значень MSE для обох отримувачів.

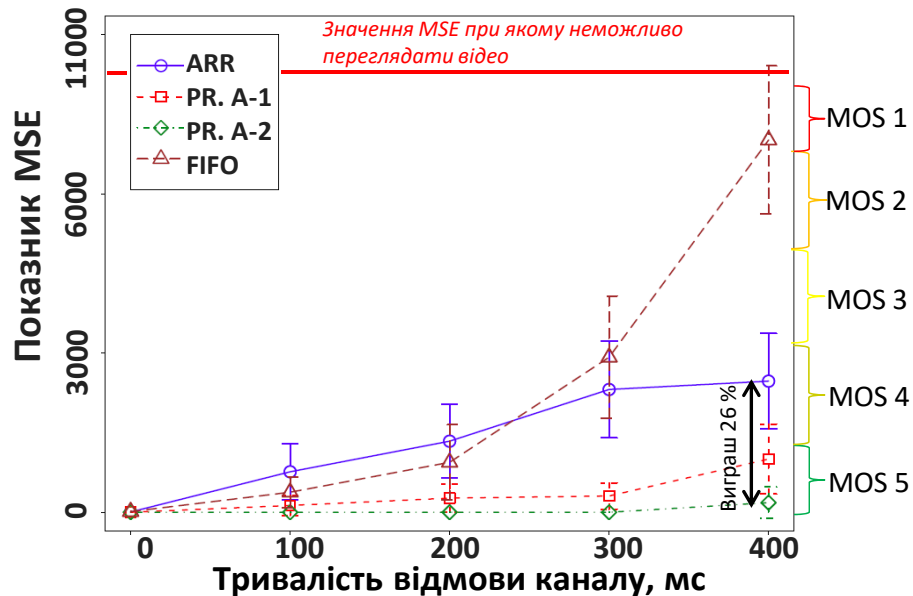


Рис. 4.18 Значення метрики MSE для «задоволеного якістю» отримувача в експерименті 1

Другий етап покращеної дисципліни Р – У запобігає відкиданню пакетів для «задоволеного якістю» отримувача, що підтверджується нульовими значеннями MSE, при цьому якість потоку для «незадоволеного якістю» отримувача майже така ж, як і при використанні дисципліни Р-В, що підтверджує високу ефективність дисципліни Р – У при передаванні однакових відеопотоків.



#### 4.5 Висновки до розділу 4

У даному розділі реалізовано метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі Wi-Fi в корпоративній інфраструктурі НУ “Львівська політехніка”, що дало змогу забезпечити користувачам високошвидкісний доступ до Інтернету та підвищити доступність до мережі Wi-Fi в умовах пікових навантажень на окремі групи комірок шляхом ефективного управління ресурсами мережі залежно від фактичного сценарію функціонування та вимог окремих користувачів.

Оцінено ефективність запропонованих рішень та досягнуто підвищення якості обслуговування. Розроблено імітаційну модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” в середовищі Opnet Modeler, яка дає змогу спрогнозувати затримки обслуговування потоків реального часу в корпоративній мережі при конфігурацій різних дисциплін обслуговування черг на мережевих пристроях в умовах різного навантаження та вибрати оптимальні рішення для забезпечення необхідного QoS.

Розглянуто процес передавання відеопотоків реального часу по мережі Wi-Fi з використанням методу випадкового доступу декільком отримувачам в умовах короткочасних відмов каналу для деяких з них. Використання стандартної дисципліни обслуговування черги FIFO в умовах короткочасних відмов каналу призводить до виникнення проблеми блокування черги головним пакетом, у результаті чого якість передавання відеопотоків зменшується як для отримувачів з погіршеною якістю з'єднань, так і для отримувачів, якість з'єднань з якими залишалась незмінною. Для вирішення цього в роботі удосконалено алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу.

Застосування даної дисципліни дає змогу уникнути зниження якості передавання відеопотоків отримувачам, для яких якість з'єднань не погіршувалась, а також зменшити зниження якості передавання відеопотоків отримувачам, для яких відбулась відмова каналу. Продемонстровано ефективність модифікованого алгоритму обслуговування черги при

передавання відеопотоків реального часу. Результати числових експериментів показали те, що у порівнянні із існуючим адаптивним циклічним планувальником ARR запропонований алгоритм забезпечує кращу якість передавання відеопотоків від 5% до 45% оціненої за критерієм MSE

## ВИСНОВКИ

Сукупність наукових положень, сформульованих та обґрунтованих в дисертаційній роботі, становить розв'язок науково-технічного завдання підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi шляхом розроблення методів адаптивного управління доступом до неліцензійного частотного діапазону, планування радіоресурсів та формування структури рівня радіодоступу, а також удосконалення алгоритму обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу в умовах передавання відеопотоків реального часу.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. Встановлено, що невирішеними досі залишаються завдання адаптивного формування структури радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі в умовах наявності великої кількості абонентських пристроїв та координованого використання неліцензійного діапазону Wi-Fi операторами мобільного зв'язку для підвищення спектральної ефективності. Проаналізовано причини виникнення короткочасних відмов каналу при передаванні відеопотоків реального часу в мережах Wi-Fi. Проведений огляд існуючих рішень показав, що на сьогоднішній день не існує ефективного рішення, яке могло б успішно застосовуватись в реальному обладнанні на сучасних мережах.

2. Запропоновано концептуальну модель інтегрованої мобільної мережі наступного покоління на основі використання технологій LTE-U та Wi-Fi, яка базується на централізованому SDN контролері для реалізації адаптивного управління ресурсами мережі. Запропоновано метод адаптивного використання неліцензійного діапазону частот мережами Wi-Fi та LTE-U для забезпечення необхідної якості послуг. Даний метод на основі вимог QoS користувачів централізовано приймає обґрунтовані рішення щодо частки використання неліцензійного радіоресурсу оператором мобільного зв'язку LTE-U, що дало змогу підвищити спектральну ефективність в інтегрованих мережах LTE з уникненням міжсистемної інтерференції.

3. Досліджено процес передавання відеопотоків реального часу по мережі Wi-Fi з використанням методу випадкового доступу в умовах короткочасних відмов каналу для деяких із користувачів. Використання стандартної дисципліни обслуговування черги FIFO в умовах короткочасних відмов каналу призводить до виникнення проблеми блокування черги головним пакетом, в результаті чого погіршується якість надання відео послуг. Для вирішення цього у роботі удосконалено алгоритм обслуговування черги канального рівня в мережі Wi-Fi передавання даних, із забезпеченням необхідної якості, у каналах з короткочасними втратами зв'язку. Застосування даної дисципліни дає змогу уникнути зниження якості передавання відеопотоків отримувачам, для яких якість з'єднань не погіршувалась, а також зменшити зниження якості передавання відеопотоків отримувачам, для яких відбулась відмова каналу. Проведено оцінку ефективності модифікованого алгоритму обслуговування черги в умовах передавання відеопотоків реального часу. Результати експериментів показали те, що у порівнянні із існуючим адаптивним циклічним планувальником ARR запропонований алгоритм забезпечує кращу якість надання відео послуг реального часу від 5% до 45% оціненої за критерієм MSE.

4. У роботі запропоновано модель гетерогенної мережі з трьома рівнями базових станцій, які розміщуються згідно принципів детермінованої та стохастичної геометрії, що дає змогу відобразити реальну поведінку мережі радіодоступу в процесі впровадження малих комірок. Запропоновано метод адаптивного формування структури рівня радіодоступу, що здійснює управління малими комірками відповідно до поточного абонентського навантаження. Використання такого методу дає змогу збільшити пропускну здатність мережі і як наслідок якість обслуговування абонентів за рахунок більш рівномірного завантаження базових станцій. Для уникнення міжкоміркової інтерференції запропонований метод динамічно розподіляє загальну смугу частот між центральною та граничною зоною комірки LTE в залежності від локалізації абонентського навантаження та дає змогу підвищити ефективність використання ресурсів.

5. Розроблено алгоритм аналізу стану радіодоступу інтегрованої LTE/Wi-Fi мережі для підвищення енергоефективності мережі. Для цього у роботі формалізовано критерії обслуговування абонентів базовими станціями кожного з рівнів залежно від поточних параметрів мобільності, пропускної здатності, послуги абонента для можливості переведення в енергозберігаючий режим роботи мережі. В умовах звичайного функціонування однієї базової станції енергоспоживання становить 14.7 Вт, а в енергозберігаючому режимі – 7 Вт, економія електроенергії становить 55%. Порівнюючи результати дослідження отримані в процесі конфігурації рівня радіодоступу інтегрованої мережі таким чином, що активні усі малі комірки, або коли працює метод адаптивного формування структури рівня радіо доступу, варто відзначити, що в другому випадку при зменшенні пропускної здатності на 1-4 % спостерігається вигреш в економії електроенергії на 30-42%.

6. Для оцінки ефективності запропонованих рішень побудовано імітаційну модель з набором інтегрованих між собою технологій радіодоступу LTE/Wi-Fi. Модель розроблено з використанням мови програмування C++ та LTE-A Downlink System Level Simulator. В результаті моделювання, встановлено, що якщо мережа складається лише з рівня макрокомірок, то в середньому один абонент може отримувати пропускну здатність від 20 до 25 Мбіт/с, при обслуговуванні макрокоміркою та пікокоміркою 45-50 мбіт/с, а при обслуговуванні абонента в гетерогенній мережі з трьома рівнями базових станцій включаючи LTE-U – використання неліцензійного діапазону Wi-Fi, середнє значення пропускної здатності становить 67 - 71 Мбіт/с, відповідно коли включені усі малі комірки середня пропускну здатність становить – 70-75 Мбіт/с.

7. Реалізовано метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі Wi-Fi в корпоративній інфраструктурі НУ “Львівська політехніка”, що дало змогу забезпечити користувачам високошвидкісний доступ до Інтернету та підвищити доступність до мережі Wi-Fi в умовах пікових навантажень на окремі групи комірок шляхом ефективного управління ресурсами мережі в залежності від фактичного сценарію функціонування та

вимог окремих користувачів. Оцінено ефективність запропонованих рішень та досягнуто підвищення якості обслуговування за критерієм пропускної здатності точки доступу на 36%. Розроблено імітаційну модель інтегрованої мережі LTE/Wi-Fi на базі інформаційної мережі НУ “Львівська політехніка” в середовищі Opnet Modeler, яка дає змогу спрогнозувати затримки обслуговування потоків реального часу в корпоративній мережі в умовах різного навантаження та вибрати оптимальні рішення мережевої конфігурації для забезпечення необхідного QoS.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. M. Beshley, M. Klymash, B. Stryhaluk, O. Shpur, B. Bugil and I. Kagalo, "SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets," *International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE)*, vol. 4, Issue 1, pp. 10–21. January 2015.
2. B. M. Strykhalyuk, I. O. Kahalo, M. V. Brych, M. I. Beshley, and M. O. Seliuchenko, "Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems", *Системи озброєння і військова техніка*, № 4, с. 125–132, 2014.
3. I. O. Кагало, М. І. Бешлей, М. М. Климаш, О. М. Панченко, Г. В. Бешлей, "Адаптивне формування багаторівневої радіоструктури інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi," *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), с.24–38, 2019.
4. А. Р. Масюк, І. Б. Стрихалюк, М. В. Брич, І. О. Кагало, Г. В. Бешлей, "Алгоритм інтелектуального вертикального хендверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 874, с. 110–121, 2017.
5. М. М. Климаш, М. І. Кирик, Н. М. Плєсканка, і І. О. Кагало, "Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації*, №. 796, с. 182–194, 2014.
6. М. М. Климаш, О. А. Лаврів, І. О. Кагало, Б. В. Коваль, Т. А. Максимюк, "Покращення параметрів радіоінтерфейсу LTE/HSOPA," *Комп'ютерні технології друкарства*, №. 26, с. 130–137, 2011.
7. V. Romanchuk, T. Andrukhiv and I. Kahalo, "The main causes of failures SQL Server," *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv-Slavske, 2012, pp. 376-376.
8. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and

controller," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 282-286.

9. P. Huskov, T. Maksymyuk, I. Kahalo and M. Klymash, "Smart backhauling subsystem for 5G heterogeneous network," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, 2015, pp. 481-483.

10. H. Beshley, M. Klymash, M. Beshley and I. Kahalo. "Improving the Efficiency of LTE Spectral Resources Use by Introducing the new of M2M/IoT Multi-Service Gateway," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, 2019, pp. 481-483.

11. I. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, 2019, pp. 1167-1170.

12. I. Kahalo, H. Beshley, A. Masiuk and V. Pashkevych, "The method of transmitting real-time video streams for Wi-Fi networks with short-term channel failures," *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT'2019)*, Lviv, 2019, pp. 356-359.

13. М. М. Климаш, М.І. Бешлей, І.О Кагало, Л.М. Готра, "Вдосконалення методів та алгоритмів управління інформаційними потоками в конвергентних телекомунікаційних мережах," *матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 25-річчю заснування кафедри "Радіотехніки та інформаційні безпеки" Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича*", м. Чернівці, 2014, с.106-107.

14. Б.А. Бугиль, І.О.Кагало, "Підвищення ефективності маршрутизації інформаційних потоків на основі оптимального розподілу мережевих ресурсів," *матеріали V міжнародної наукової конференції молодих вчених "Комп'ютерна наука та інженерія*, Львів, 2011 , с. 304-305.

15. O. Lavriv, I. Kahalo, and R.Kolodiy , " Application of NoSQL approach in data-centered network architectures: big data case," *2015 1st International*



*Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015)*, Lviv, Ukraine, pp. 103–105.

16. [Электронный ресурс]. Доступно: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2370-2015-PDF-E.pdf). Дата звернення: Грудень. 19, 2019.

17. [Электронный ресурс]. Доступно: [https://www.metis2020.com/wp-content/deliverables/METIS\\_.pdf](https://www.metis2020.com/wp-content/deliverables/METIS_.pdf). Дата звернення: Грудень. 19, 2019.

18. 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 International Conference on Information and Telecommunication Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Odessa, 2017, pp. 1-5.

19. M. Agiwal, A. Roy and N. Saxena, "Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, thirdquarter 2016.

20. 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)*, Slavske, 2018, pp. 1127-1130.

21. B. Bangerter, S. Talwar, R. Arefi, K. Stewart, "Intel networks and devices for the 5G era", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 90-96, Feb. 2014.

22. 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 (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 182-186.

23. Y. Ni, J. Liang, X. Shi and D. Ban, "Research on Key Technology in 5G Mobile Communication Network," *2019 International Conference on Intelligent Transportation, Big Data & Smart City (ICITBS)*, Changsha, China, 2019, pp. 199-201.

24. Zhang Jianmin, Xie Weiliang et al., "Analysis of 5G cellular network architecture[J]", *Telecommunications Science*, vol. 31, no. 5, pp. 46-56, 2015.
25. W. Y. Li, M. C. Huang, T. H. Kao, W. Chung, "Novel LIM (laser induced metallization) technologies of ITRI applied to WWAN/LTE 2-port antenna array for smart handset applications", *Inter. Sim. on Antennas and Propagation (ISAP)*, 2014..
26. M. Tayyab, X. Gelabert and R. Jäntti, "A Simulation Study on Handover in LTE Ultra-Small Cell Deployment: A 5G Challenge," *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, Dresden, Germany, 2019, pp. 388-392.
27. M. De Ree, G. Mantas, A. Radwan, S. Mumtaz, J. Rodriguez and I. E. Otung, "Key Management for Beyond 5G Mobile Small Cells: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 59200-59236, 2019.
28. S. Z. Rashid, A. Gafur, A. Rahaman, Y. Solaiman and E. H. Bahadur, "Traffic Load Based Efficient Energy Management Technique for 5G Small Cell Network," *2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT)*, Dhaka, Bangladesh, 2019, pp. 1-5.
29. Jinbo Liu and Shaohui Sun, "Energy efficiency analysis of dense small cell networks with caching at base stations," *2016 2nd IEEE International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, Chengdu, 2016, pp. 2944-2948.
30. C. Yang, H. Liu and L. Liu, "Interference Modeling and Analysis in Heterogeneous Small-Cell Networks," *2016 17th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT)*, Guangzhou, 2016, pp. 294-298.
31. 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, 2018, pp. 1147-1151.

32. H. Lee, Y. Park and D. Hong, "Resource Split Full Duplex to Mitigate Inter-Cell Interference in Ultra-Dense Small Cell Networks," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 37653-37664, 2018.
33. H. Beshley, M. Kyryk, M. Beshley and O. Panchenko, "Method of Information Flows Engineering and Resource Distribution in 4G/5G Heterogeneous Network for M2M Service Provisioning," *2018 IEEE 4th International Symposium on Wireless Systems within the International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Lviv, 2018, pp. 229-233.
34. T. Akhtar, I. Politis, C. Tselios and S. Kotsopoulos, "Cooperative Game Radio Resource Management Scheme for Small Cell Network," *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, Dresden, Germany, 2019, pp. 69-73.
35. Li Bin Jiang and Soung Chang Liew, "An adaptive round robin scheduler for head-of-line-blocking problem in wireless LANs," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, 2005*, New Orleans, LA, 2005, pp. 1219-1224 Vol. 2, doi: 10.1109/WCNC.2005.1424683.
36. G. Bianchi, "Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 18, no. 3, pp. 535-547, March 2000.
37. M. Klymash, M. Seliuchenko, M. Beshley, M. Brych, "Mobility Management and Vertical Handover Decision in an Always Best Connected Heterogeneous Network", *IEEE Proceedings of XIIIth international conference "The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics" CADSM'2015 (24-27 February, Lviv-Poljana, Ukraine )*, 2015. – P.103-105.
38. N. Slamnik, A. Okic and J. Musovic, "Conceptual radio resource management approach in LTE heterogeneous networks using small cells number variation," *2016 XI International Symposium on Telecommunications (BIHTEL)*, Sarajevo, 2016, pp. 1-5.
39. T. Matsumura, K. Ibuka, K. Ishizu, H. Murakami and F. Kojima, "A Prototype of Multi-RAN eNB with Dynamic Baseband Resource Allocation for Heterogeneous Private LTE Networks," *2018 21st International Symposium on*

*Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, Chiang Rai, Thailand, 2018, pp. 46-51.

40. Jing Huang, Zihao You and I-tai Lu, "Maximizing throughput using 2D-Markov models for LTE and WiFi heterogeneous network," *2017 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference (LISAT)*, Farmingdale, NY, 2017, pp. 1-5.

41. A. Masiuk, M. Beshley, O. Lavriv and Y. Deschynskiy, "Common radio resource management model for heterogeneous cellular networks," *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Lviv, 2016, pp. 661-663.

42. M. Klymash, R. Savchuk, P. Pozdnyakov M. Beshley, "The researching and modeling of structures of mobile networks for providing of multiservice radio access", *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012* (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012. - P. 281-282.

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

44. S. Udhayakumar, R. Raja Kumar and P. Indumathi, "Network Selection in Wireless Heterogeneous Network," *2018 International Conference on Recent Trends in Electrical, Control and Communication (RTECC)*, Malaysia, Malaysia, 2018, pp. 57-60.

45. D. Castro-Hernandez and R. Paranjape, "A distributed load balancing algorithm for LTE/LTE-A heterogeneous networks," *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, New Orleans, LA, 2015, pp. 380-385.

46. R. Hwang and K. Cheng, "Novel QoS guaranteed cell selection schemes in LTE-A heterogeneous networks," *2017 10th International Conference on Ubi-media Computing and Workshops (Ubi-Media)*, Pattaya, 2017, pp. 1-5.

47. Б. М. Стрихалюк, М. І. Бешлей, Г. В. Холявка, and М. В. Брич, ‘Моделювання та тестування системи управління гетерогенної мережі доступу’, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 1, с. 22–31, 2015.
48. М. М. Клиماش, М. І. Бешлей, Б. М. Стрихалюк, and О. А. Лаврів, “Підвищення якості обслуговування в конвергентних мобільних системах на основі платформи UMA-A,” *Проблеми телекомунікацій*, № 1(13), с. 3–19, 2014.
49. J. Sangiamwong, Y. Saito, N. Miki, T. Abe, S. Nagata, Y. Okumura, "Investigation on Cell Selection Methods Associated with Inter-cell Interference Coordination in Heterogeneous Networks for LTE-Advanced Downlink", *11th European Wireless Conference 2011 - Sustainable Wireless Technologies (European Wireless)*, pp. 1-6, Apr. 2011.
50. М. І. Бешлей, В. П. Ткачук, Б. А. Бугиль, and О. А. Лаврів, “Модель системи динамічного управління пропускною здатністю каналу інтегрованої WIFI/GSM мережі,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації,” №796, с. 83–96, 2014.
51. B. Chen, N. Pappas, Z. Chen, D. Yuan and J. Zhang, "LTE-WLAN Aggregation with Bursty Data Traffic and Randomized Flow Splitting," *ICC 2019 - 2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Shanghai, China, 2019, pp. 1-6.
52. B. Chen et al., "Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz with Corresponding Deployment Scenarios: A Survey", *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 19, no. 1, pp. 7-32, Jan. 2017.
53. N. M. Sadek, H. H. Halawa, R. M. Daoud, H. H. Amer and N. A. Ali, "Heterogeneous LTE/Wi-Fi architecture for ITS traffic control and infotainment," *2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS)*, Aachen, 2015, pp. 1-6.
54. T. V. P. Santhappan, H. Gutpa, S. Patro, B. R. Tamma and A. Franklin, "LTE–Wi-Fi Radio Level Integration at RLC Layer: A Demo of LWIR," *2019 11th International Conference on Communication Systems & Networks (COMSNETS)*, Bengaluru, India, 2019, pp. 553-555.

55. M. Picone, G. Spigoni, S. Busanelli, N. Iotti and G. Ferrari, "Experimental analysis of VHO-enabled mobile application for data offloading in heterogeneous wireless networks," *2013 9th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, Sardinia, 2013, pp. 867-872.
56. A. Maheswari, A. Prithviraj and K. Krishnamoorthy, "Markov based VHO to improve the Handover performance among heterogeneous wireless networks in PMIPv6 domain," *2016 International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, Nagercoil, 2016, pp. 1-6.
57. A. B. Zineb, M. Ayadi and S. Tabbane, "QoE-Fuzzy VHO Approach for Heterogeneous Wireless Networks (HWNs)," *2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, Crans-Montana, 2016, pp. 949-956.
58. A. B. Zineb, M. Ayadi and S. Tabbane, "QoE-Fuzzy VHO Approach for Heterogeneous Wireless Networks (HWNs)," *2016 IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications (AINA)*, Crans-Montana, 2016, pp. 949-956.
59. М. М. Климаш, М. І. Бешлей, and А. Р. Масюк, "Модель адаптивного управління радіоресурсами в безпроводних гетерогенних мережах", Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції «Перспективи телекомунікацій», с.1-3, 2015.
60. S. T. V. Pasca, S. Patro, B. R. Tamma and A. A. Franklin, "A real-time performance evaluation of tightly coupled LTE Wi-Fi radio access networks," *2017 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, Bhubaneswar, 2017, pp. 1-6.
61. 3GPP. (2016) *LTE-WLAN Aggregation and RAN Controlled LTE-WLAN Interworking (LWA)*., [online] Available: <http://www.3gpp.org/DynaReport/36300.htm>.
62. J. Tomici, M. Starsinic, A. S. I. Mohamed and Q. Li, "Integrated small cell and Wi-Fi networks," *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, New Orleans, LA, 2015, pp. 1261-1266.

63. I. Elgendi, K. S. Munasinghe and A. Jamalipour, "Traffic offloading for 5G: L-LTE or Wi-Fi," *2017 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, Atlanta, GA, 2017, pp. 748-753.
64. I. Elgendi, K. S. Munasinghe, A. Jamalipour, "Traffic offloading techniques for 5G cellular: a three-tiered SDN architecture", *Ann. Telecommu. Springer Journal*, pp. 1-11, September 2016.
65. S. Singh, H. S. Dhillon, J. G. Andrews, "Offloading in heterogeneous networks: Modeling analysis design insights", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 5, pp. 2484-2497, May 2013.
66. L. Hu *et al.*, "Modeling of Wi-Fi IEEE 802.11ac Offloading Performance for 1000x Capacity Expansion of LTE-Advanced," *2013 IEEE 78th Vehicular Technology Conference (VTC Fall)*, Las Vegas, NV, 2013, pp. 1-6.
67. 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.
68. Z. Zhou, S. Mumtaz, K. M. S. Huq, A. Al-Dulaimi, K. Chandra and J. Rodriguez, "Cloud Miracles: Heterogeneous Cloud RAN for Fair Coexistence of LTE-U and Wi-Fi in Ultra Dense 5G Networks," *in IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 6, pp. 64-71, June 2018.
69. R. M. Borges and S. A. Cerqueira, "Convergent and reconfigurable optical-wireless network for LTE and Wi-Fi offloading applications," *2014 IEEE Latin-America Conference on Communications (LATINCOM)*, Cartagena de Indias, 2014, pp. 1-4.
70. E. Pateromichelakis, A. Maeder, A. De Domenico, R. Fritzsche, P. de Kerret and J. Bartelt, "Joint RAN/backhaul optimization in centralized 5G RAN," *2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)*, Paris, 2015, pp. 386-390.
71. G. I. Naik, "LTE WLAN interworking for Wi-Fi hotspots," *2010 Second International Conference on COMMunication Systems and NETWORKS (COMSNETS 2010)*, Bangalore, 2010, pp. 1-2.

72. S. T. V. Pasca, S. Patro, B. R. Tamma and A. A. Franklin, "Tightly coupled LTE Wi-Fi radio access networks: A demo of LWIP," *2017 9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS)*, Bangalore, 2017, pp. 419-420.
73. H. Hu, Y. Gao, J. Zhang, X. Chu and J. Zhang, "On the Performance and Fairness of LTE-U and WiFi Networks Sharing Multiple Unlicensed Channels," *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1-6.
74. R. Bandeira, I. Sousa, M. P. Queluz and A. Rodrigues, "Coexistence of SRD CSMA-based systems with DC-based systems and LTE," *2017 11th International Conference on Signal Processing and Communication Systems (ICSPCS)*, Gold Coast, QLD, 2017, pp. 1-6.
75. Т. А. Максимюк, С. С. Думич, М. В. Брич, and О. М. Яремко, 'Метод адаптивного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мереж LTE', *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія : Технічні науки*, Т. 29(68), № 2, pp. 58–63, 2018.
76. Т. Maksymyuk, М. Brych, М. Klymash and М. Jo, "Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network," *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, 2017, pp. 197-200.
77. A. M. Baswade, M. R. S. Kiran, B. R. Tamma and A. A. Franklin, "On placement and efficient resource allocation of LAA/LTE-U base stations in HetNet," *2017 IEEE International Conference on Advanced Networks and Telecommunications Systems (ANTS)*, Bhubaneswar, 2017, pp. 1-6.
78. P. Campos, A. Hernández-Solana and A. Valdovinos-Bardají, "Dealing with the Hidden Node Problem in Multioperator LAA-LTE Scenarios," *2018 IFIP/IEEE International Conference on Performance Evaluation and Modeling in Wired and Wireless Networks (PEMWN)*, Toulouse, 2018, pp. 1-7.



79. B. Jia, "An adaptive p-persistent CSMA scheme for LTE in unlicensed bands," *2015 International Conference on Wireless Communications & Signal Processing (WCSP)*, Nanjing, 2015, pp. 1-5.
80. Y. Jian, C. Shih, B. Krishnaswamy and R. Sivakumar, "Coexistence of Wi-Fi and LAA-LTE: Experimental evaluation, analysis and insights," *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, pp. 2325-2331.
81. V. Loginov, A. Lyakhov and V. Zhdanovskiy, "Performance Analysis of LBT with Limited Reservation Signal Duration for Fair LTE-LAA/Wi-Fi Coexistence," *2019 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, Sochi, Russia, 2019, pp. 1-5.
82. R. Al-Khansa and H. Artail, "A semi-distributed LTE-WiFi system design for future LTE-unlicensed: Deployments in small-cell environments," *2015 IEEE 11th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*, Abu Dhabi, 2015, pp. 43-50.
83. M. Haider and M. Erol-Kantarci, "Enhanced LBT Mechanism for LTE-Unlicensed Using Reinforcement Learning," *2018 IEEE Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering (CCECE)*, Quebec City, QC, 2018, pp. 1-4.
84. J. Ling, D. Lopez-Perez, M. R. Khawer, "Practical LTE and WiFi Coexistence Techniques Beyond LBT", *IEEE Communications Magazine*, pp. 1-3, 2017.
85. A. Galanopoulos, F. Foukalas, T.A. Tsiftsis, "Efficient Coexistence of LTE with WiFi in the Licensed and Unlicensed Spectrum Aggregation", *IEEE Trans. on Cognitive Comm. and Netw.*, pp. 2-4, 2016.
86. Y. Liu, S. Yoo, "Dynamic Resource Allocation Using Reinforcement Learning for LTE-U and WiFi in the Unlicensed Spectrum", *ICUFN*, pp. 1-2, 2017.
87. Y. Li, T. Zhou, Y. Yang, H. Hu, M. Hamalainen, "Fair Downlink Traffic Management for Hybrid LAA-LTE/Wi-Fi Networks", *IEEE GLOBECOM*, 2016
88. N. Rupasinghe, I. Guvenc, "Reinforcement Learning for Licensed-Assisted Access of LTE in the Unlicensed Spectrum", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference* pp, pp. 3-4, 2015.

89. H. Kwon, J. Jeon, A. Bhorkar, Q. Ye, H. Harada et al., "Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum in LTE Release 13", *IEEE Communications Magazine on LTE Evolution*, April 2016.
90. M. Maule, D. Moltchanov, P. Kustarev, M. Komarov, S. Andreev, Y. Koucheryavy, "Delivering Fairness and QoS Guarantees for LTE/Wi-Fi Coexistence under LAA Operation", *Early Access IEEE Access*, 2018.
91. V. Sathya, M. Mehrnoush, M. Ghosh and S. Roy, "Analysis of CSAT Performance in Wi-Fi and LTE-U Coexistence," *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, Kansas City, MO, 2018, pp. 1-6.
92. V. Sathya, M. Mehrnoush, M. Ghosh and S. Roy, "Auto-Correlation Based Sensing of Multiple Wi-Fi BSSs for LTE-U CSAT," *2019 IEEE 90th Vehicular Technology Conference (VTC2019-Fall)*, Honolulu, USA, 2019, pp. 1-7.
93. V. Sathya, M. Merhnoush, M. Ghosh and S. Roy, "Energy Detection Based Sensing of Multiple Wi-Fi BSSs for LTE-U CSAT," *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-7.
94. T. Maksymyuk, M. Brych, Y. Klymash, M. Kyryk and M. Klymash, "Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks," *2017 4th International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, Kharkov, 2017, pp. 515-518.
95. T. Maksymyuk, M. Kyryk and M. Jo, "Comprehensive Spectrum Management for Heterogeneous Networks in LTE-U," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 8-15, December 2016.
96. J. Gazda, E. ŠĽapak, G. Bugár, D. Horváth, T. Maksymyuk and M. Jo, "Unsupervised Learning Algorithm for Intelligent Coverage Planning and Performance Optimization of Multitier Heterogeneous Network," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 39807-39819, 2018.

97. H. Zhang, Y. Dong, J. Cheng, M. J. Hossain and V. C. M. Leung, "Fronthauling for 5G LTE-U Ultra Dense Cloud Small Cell Networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 48-53, December 2016.
98. Z. Zhou, S. Mumtaz, K. M. S. Huq, A. Al-Dulaimi, K. Chandra and J. Rodriguez, "Cloud Miracles: Heterogeneous Cloud RAN for Fair Coexistence of LTE-U and Wi-Fi in Ultra Dense 5G Networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 6, pp. 64-71, June 2018.
99. 'U-LTE. Huawei показал агрегацию частот 3GPP LTE и нелицензируемых частот 5 ГГц @ MWC2014 - Сообщество 4G — ЖЖ'. [Online]. Available: <https://ru-4g.livejournal.com/1143855.html>. [Accessed: 14-Feb-2019].
100. [Электронный ресурс]. Доступно: <https://hsc.com/Solutions/Hotspot-20>. Дата звернення: Грудень. 19, 2019.
101. V. Gupta and M. K. Rohil, "Modeling user preferences for vertical handover in 3G-WLAN interworking environment on top of IEEE 802.11u," *2013 3rd IEEE International Advance Computing Conference (IACC)*, Ghaziabad, 2013, pp. 164-169.
102. Р. С. Одарченко, О. П. Ткаліч, and Ю. І. Стецюра, 'Розвантаження радіоінтерфейсу мережі LTE шляхом застосування концепції HotSpot 2.0', *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*, №. 11, с. 66–77, 2015.
103. Р. С. Одарченко, О. П. Ткаліч, and Ю. І. Стецюра, 'Розвантаження радіоінтерфейсу мережі LTE шляхом застосування концепції HotSpot 2.0', *Проблеми створення, випробування, застосування та експлуатації складних інформаційних систем*, №. 11, с. 66–77, 2015.
104. M. Klymash, M. Beshley, "Perspective directions of development and research in the field of information and communication technologies," *Wissen im Markt.*, Iss. 3, pp. 31–37. 2019.
105. Overview of the Intelligent Wireless Access Gateway [Electronic resource] Mode of access :<http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/routers/asr1000/con>

figuration/guide/chassis/IWAG\_Confi g\_Guide\_BookMap/IWAG\_Config\_Guide\_BookMap\_chapter\_01.html.

106. ‘Как LTE справляется с межсотовой интерференцией / Хабр’. [Online]. Available: <https://habr.com/ru/post/177097/>. [Accessed: 14-Dec.-2019].

107. J. Černý and J. Masopust, "Interference optimization and mitigation for LTE networks," *2017 International Conference on Applied Electronics (AE)*, Pilsen, 2017, pp. 1-5.

108. L. Chamorro, A. F. Reyes and M. C. Paredes-Paredes, "Interference Evaluation in LTE Heterogeneous Networks," *2018 IEEE Third Ecuador Technical Chapters Meeting (ETCM)*, Cuenca, 2018, pp. 1-6.

109. A. Afifi, K.M.F. Elsayed, A. Khattab, "Interference-aware radio resource management framework for the 3GPP LTE uplink with QoS constraints", *Proc. IEEE Symp. Computers and Communications*, 2013.

110. О. А. Лаврів, М. І. Бешлей, М. М. Гнатчук, А. В. Поліщук, “Модель системи управління ресурсами мультисервісних мереж в умовах самоподібності трафіку,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*, серія “Радіоелектроніка та телекомунікації”, №. 738, с. 165–172, 2012.

111. M. Eguizábal and Á. Hernández, "SFR-based vs. FFR-based inter-cell interference coordination for inband relay LTE-A networks," *2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, St. Petersburg, 2014, pp. 41-47.

112. E. S. Attia, S. A. El-Dolil and M. Abd-Elnaby, "Performance enhancement based resource allocation scheme using soft frequency reuse for LTE femtocell networks," *2017 34th National Radio Science Conference (NRSC)*, Alexandria, 2017, pp. 246-255.

113. M. Qian, W. Hardjawana, Y. Li, B. Vucetic, J. Shi and X. Yang, "Inter-cell interference coordination through adaptive soft frequency reuse in LTE networks," *2012 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Shanghai, 2012, pp. 1618-1623.

114. L. Chen and D. Yuan, "Soft Frequency Reuse in Large Networks with Irregular Cell Pattern: How Much Gains To Expect?," in *Proceedings of IEEE PIMRC '09*, pp. 1467-1471, 2009.
115. H. Y. Lee, J. B. Park and K. S. Kim, "UL e-ICIC Scheme Using SLP-ABS for Self-Organized Heterogeneous Cellular Networks," in *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 1, pp. 86-89, Jan. 2015.
116. M. Rahman, H. Yanikomeroğlu and W. Wong, "Interference Avoidance with Dynamic Inter-Cell Coordination for Downlink LTE System," *2009 IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, Budapest, 2009, pp. 1-6.
117. W. Liu, C. Hu, D. Wei, M. Peng, W. Wang, "An Overload Indicator and High Interference Indicator Hybrid Scheme For Inter-Cell Interference Coordination In LTE System", *Proc. IEEE 3rd International Conf. on Broadband Network and Multimedia Technology (IC-BNMT)*, pp. 514-518, 2010.
118. Guangrong Zhang, Chao Zhang, Jun Zhang, Guo Wei, "A Novel Uplink Interference Coordination Scheme Using High Interference Indicator", *Proc. IEEE 72nd Vehicular Technology Conf. Fall*, pp. 1-5, 2010.
119. S. Deb, P. Monogioudis, J. Miernik and J. P. Seymour, "Algorithms for Enhanced Inter-Cell Interference Coordination (eICIC) in LTE HetNets," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 22, no. 1, pp. 137-150, Feb. 2014.
120. Kazi Mohammed Saidul Huq; Jonathan Rodriguez, "Dynamic Enhanced Inter-cell Interference Coordination Strategy with Quality of Service Guarantees for Heterogeneous Networks," in *Backhauling / Fronthauling for Future Wireless Systems*, , Wiley, 2016, pp.119-142.
121. T. A. Darweesh and K. M. F. Elsayed, "LTE Uplink Interference-Aware Scheduling Using High Interference and Overload Indicators," *2015 8th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)*, Munich, 2015, pp. 96-103.
122. J. Huang, J. Li, Z. Chen and H. Pan, "HICIC: Hybrid Inter-Cell Interference Coordination for Two-Tier Heterogeneous Networks With Non-Uniform Topologies," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 34707-34723, 2018.

123. SeungJune Yi; SungDuck Chun; YoungDae Lee; SungJun Park; SungHoon Jung, "Enhanced Inter-Cell Interference Coordination (eICIC)," in *Radio Protocols for LTE and LTE-Advanced*, Wiley, 2013, pp.293-304
124. Yu Chen, Xuming Fang and Bo Huang, "Joint ABS power and resource allocations for eICIC in heterogeneous networks," *The Sixth International Workshop on Signal Design and Its Applications in Communications*, Tokyo, 2013, pp. 92-95.
125. C. H. Kai and S. C. Liew, 'Temporal Starvation in CSMA Wireless Networks', arXiv:1009.3415 [cs], Sep. 2010.
126. M. Garetto, T. Salonidis and E. W. Knightly, "Modeling Per-Flow Throughput and Capturing Starvation in CSMA Multi-Hop Wireless Networks," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 16, no. 4, pp. 864-877, Aug. 2008.
127. M. Durvy, O. Dousse and P. Thiran, "On the fairness of large CSMA networks," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 27, no. 7, pp. 1093-1104, September 2009.
128. Tanenbaum Andrew. Computer Networks. 4th edition. Prentice Hall Professional Technical Reference, 2002.
129. B. B. Haile, E. Mutafungwa and J. Hämäläinen, "LTE-Advanced enhancements for self-backhauled LTE-U small cells: An Addis Ababa case study," *AFRICON 2015*, Addis Ababa, 2015, pp. 1-5.
130. R. Yin, Y. Zhang and G. Y. Li, "Fundamental EE Tradeoff in LTE-U Based Small Cell Systems," *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 2018, pp. 1-6.
131. J. Li, X. Wang, D. Feng, M. Sheng, T. Quek, "Share in the commons: coexistence between LTE unlicensed and Wi-Fi", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 23, no. 6, pp. 16-23, Dec. 2016.
132. R. Yin, G. Yu, A. Maaref, G. Li, "LBT-based adaptive channel access for LTE-U systems", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 10, pp. 6585-6597, Oct. 2016.
133. Q. Chen, G. Yu, R. Yin, A. Maaref, G. Y. Li, A. Huang, "Energy efficiency optimization in licensed-assisted access", *IEEE j. on Selected Areas in Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 723-734, April 2016.

134. R. Holloway and R. Beyah, "Covert DCF: A DCF-Based Covert Timing Channel in 802.11 Networks," *2011 IEEE Eighth International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems*, Valencia, 2011, pp. 570-579.
135. Ha Cheol Lee, "Impact of Bit Errors on the DCF Throughput in Wireless LAN over Ricean Fading Channels," *International Conference on Digital Telecommunications (ICDT'06)*, Cote d'Azur, 2006, pp. 37-37.
136. S. Jun *et al.*, 'A Cost-Efficient Software Based Router and Traffic Generator for Simulation and Testing of IP Network', *Electronics*, vol. 9, no. 1, p. 40, Jan. 2020.
137. J. Roy, M. A. Siddik, S. S. Moni and M. S. Alam, "An efficient cooperative MAC protocol for enhancing QoS of IEEE 802.11e EDCA in saturated conditions," *2016 9th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, Dhaka, 2016, pp. 578-581.
138. C. Mario, H. Pablo and G. Carla, "Analysis of QoS for the EDCA and HCCA mechanisms by simulation in a WLAN for voice, video, and data," *2017 IEEE XXIV International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON)*, Cusco, 2017, pp. 1-4.
139. S. Hantrakoon and A. Phonphoem, "Priority Based HCCA for IEEE 802.11e," *2010 International Conference on Communications and Mobile Computing*, Shenzhen, 2010, pp. 485-489.
140. T. Tao, F. Han and Y. Liu, "Enhanced LBT algorithm for LTE-LAA in unlicensed band," *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Hong Kong, 2015, pp. 1907-1911.
141. S. Hwang, K. Yoon and S. Choi, "Channel switching operation of LTE-LAA in unlicensed spectrum," *2017 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*, Jeju, 2017, pp. 120-122.
142. J. Yi, W. Sun, S. Park and S. Choi, "Performance Analysis of LTE-LAA Network," in *IEEE Communications Letters*, vol. 22, no. 6, pp. 1236-1239, June 2018.

143. L. H. Vu and J. Yun, "Multi-Carrier Listen Before Talk With Power Leakage Awareness for LTE-LAA in Unlicensed Spectrum," in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 678-689, Sept. 2019.
144. P. Kutsevol, V. Loginov, E. Khorov and A. Lyakhov, "New Collision Detection Method for Fair LTE-LAA and Wi-Fi Coexistence," *2019 IEEE 30th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, Istanbul, Turkey, 2019, pp. 1-6.
145. B. C. Chung and D. Cho, "Mobile Data Offloading With Almost Blank Subframe in LTE-LAA and Wi-Fi Coexisting Networks Based on Coalition Game," in *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 3, pp. 608-611, March 2017.
146. Lorenza Giupponi, Biljana Bojovic, "Simulating LTE and Wi-Fi Coexistence in Unlicensed Spectrum with ns-3 ," — 2016.
147. C. Chen, R. Ratasuk and A. Ghosh, "Downlink Performance Analysis of LTE and WiFi Coexistence in Unlicensed Bands with a Simple Listen-Before-Talk Scheme," *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Glasgow, 2015, pp. 1-5.
148. Y. Jian, C. Shih, B. Krishnaswamy and R. Sivakumar, "Coexistence of Wi-Fi and LAA-LTE: Experimental evaluation, analysis and insights," *2015 IEEE International Conference on Communication Workshop (ICCW)*, London, 2015, pp. 2325-2331.
149. A. V. Kini, L. Canonne-Velasquez, M. Hosseinian, M. Rudolf and J. Stern-Berkowitz, "Wi-Fi-LAA coexistence: Design and evaluation of Listen Before Talk for LAA," *2016 Annual Conference on Information Science and Systems (CISS)*, Princeton, NJ, 2016, pp. 157-162.
150. C. K. Kim, C. S. Yang and C. G. Kang, "Adaptive Listen-Before-Talk (LBT) scheme for LTE and Wi-Fi systems coexisting in unlicensed band," *2016 13th IEEE Annual Consumer Communications & Networking Conference (CCNC)*, Las Vegas, NV, 2016, pp. 589-594.



151. M. Cierny *et al.*, "Fairness vs. Performance in Rel-13 LTE Licensed Assisted Access," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 12, pp. 133-139, Dec. 2017.
152. "Broadband Radio Access Networks (BRAN); 5GHz high performance RLAN", Jan. 2015.
153. "Preliminary Findings Based on Coexistence Evaluation Results for DL-only LAA coexisting with DL-only Wi-Fi in Indoor Scenarios", Mar. 2015.
154. Chan S. Yang, Chung K. Kim, Chung G. Kang, "Performance Analysis of LTE in Unlicensed Bands", *Proceedings of Joint Conference on Communication & Information (JCCI 2015)*, Apr. 2015.
155. Minyao Xing, Yuexing Peng, Teng Xia, Hang Long, Kan Zheng, "Adaptive Spectrum Sharing of LTE Co-existing with WLAN in Unlicensed Frequency Bands", *arXiv:503.07948v1 [cs:NI]*, Mar. 2015.
156. "Results of evaluation for LAA Wi-Fi co-existence", Feb. 2015.
157. Klymash, M. Beshley, V. Koval, "The model of prioritization of service for efficient usage of resource multiservice network" *Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012 (Lviv – Slavske, February 21–24), 2012.* - P. 320-321.
158. V. Lavrukhin, O. Simonina and E. Volodin, "An experimental study of the key QoS parameters in public Wi-Fi networks," *2014 6th International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems and Workshops (ICUMT)*, St. Petersburg, 2014, pp. 198-203.
159. A. Ivanov, E. Khorov, A. Lyakhov and E. Kuznetsov, "Mathematical study of QoS-aware multicast streaming in Wi-Fi networks," *2018 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Barcelona, 2018, pp. 1-6.
160. 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 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 1118-1122.

161. 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.

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

163. M. Beshley, V. Romanchuk, M. Seliuchenko, A. Masiuk, "Investigation the modified priority queuing method based on virtualized network test bed", *IEEE Proceedings of XIIIth international conference "The experience of designing and application of CAD Systems in microelectronics" CADSM'2015* (24-27 February, Lviv-Poljana, Ukraine ), 2015. - P. 1-4.

164. D. da Hora, K. van Doorselaer, K. van Oost and R. Teixeira, "Predicting the effect of home Wi-Fi quality on QoE," *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications*, Honolulu, HI, 2018, pp. 944-952.

165. M.Klymash, M. Beshey , B. Stryhaluk, M. Seliuchenko, "System for Increasing Quality of Service of Multimedia Data in Convergent Networks", *First IEEE International Scientific-Practical Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology"(PICS&T'2014)*. Conference proceedings. (13-15 October, Kharkiv, Ukraine), 2014. - Kh:KHNURE, - P.63-66.

166. O. Aldhaibani, F. Bouhafs, M. Makay and A. Raschellá, "An SDN-Based Architecture for Smart Handover to Improve QoE in IEEE 802.11 WLANs," *2018 32nd International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*, Krakow, 2018, pp. 287-292.

167. Hyun Soon Kim, Eugene Kim and Hwangnam Kim, "QoE-driven Wi-Fi selection mechanism for next generation smartphones," *2012 The First IEEE Workshop on Enabling Technologies for Smartphone and Internet of Things (ETSIoT)*, Seoul, 2012, pp. 13-18.

168. M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Beshley, T. Maksymyuk, "Research and Development the Methods of Quality of Service Provision in Mobile Cloud Systems", *IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking - 2014*, Odessa, Moldova, May 27-30, 2014, P. 165-169.

169. M. Klymash, M. Seliuchenko, M. Beshley, S. Redchuk, "Increasing wavelengths utilization efficiency in OTNoDWDM network based on local resource distribution method", *Second IEEE International Scientific-Practical Conference "Problems of Infocommunications. Science and Technology" (PICS&T'2015). Conference proceedings.* (13-15 October, Kharkiv, Ukraine), 2015. - Kh:KHNURE, - P.157-160.

170. E. Ibarrola, M. Davis, C. Voisin, C. Close and L. Cristobo, "QoE Enhancement in Next Generation Wireless Ecosystems: A Machine Learning Approach," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 3, no. 3, pp. 63-70, September 2019.

171. V. Chervenets, V. Romanchuk, H. Beshley and A. Khudyy, "QoS/QoE correlation modified model for QoE evaluation on video service," *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Lviv, 2016, pp. 664-666.

172. Hyun Jong Kim and Seong Gon Choi, "A study on a QoS/QoE correlation model for QoE evaluation on IPTV service," *2010 The 12th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT)*, Phoenix Park, 2010, pp. 1377-1382.

173. M. Seliuchenko, M. Kyryk, M. Beshley, M. Zhovtonoh, "Automated Recovery of Server Applications for SDN-Based Internet of Things," *2019 IEEE 3rd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, 2019, pp. 25-29.

174. D. J. Botia and N. Gaviria, "Strategies for Improving the QoE Assessment over iTV Platforms Based on QoS Metrics," *2012 IEEE International Symposium on Multimedia*, Irvine, CA, 2012, pp. 483-484.

175. M. Seliuchenko, M. Beshley, O. Panchenko and M. Klymash, "Development of monitoring system for end-to-end packet delay measurement in

software-defined networks," *2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Lviv, 2016, pp. 667-670.

176. H. GU, Y. DONG and T. CAO, "Data Driven QoE-QoS Association Modeling of Conversational Video," *2019 IEEE Global Conference on Signal and Information Processing (GlobalSIP)*, Ottawa, ON, Canada, 2019, pp. 1-4.

177. M. U. Memon, L. X. Zhang and B. Shaikh, "Packet loss ratio evaluation of the impact of interference on zigbee network caused by Wi-Fi (IEEE 802.11b/g) in e-health environment," *2012 IEEE 14th International Conference on e-Health Networking, Applications and Services (Healthcom)*, Beijing, 2012, pp. 462-465.

178. A. S. Shafigh, P. Mertikopoulos and S. Glisic, "A novel dynamic network architecture model based on stochastic geometry and game theory," *2016 IEEE International Conference on Communications*, Kuala Lumpur, 2016, pp. 1-7.

179. M. Emara, H. ElSawy, S. Sorour, S. Al-Ghadhban, M. Alouini and T. Y. Al-Naffouri, "Stochastic geometry model for multi-channel fog radio access networks," *2017 15th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, Paris, 2017, pp. 1-6.

180. T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok, "Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks," *Smart Computing Review*, vol. 5, №2, c. 89-101.

181. D. Sabella, M. Caretti and R. Fantini, "Energy saving schemes for self-backhauled Small Cells in LTE-Advanced networks," *2014 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, Istanbul, 2014, pp. 23-28.

182. R. Trestian et al, "Exploring energy consumption issues for multimedia streaming in LTE HetNet Small Cells," *2015 IEEE 40th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Clearwater Beach, FL, 2015, pp. 498-501.

183. R. Trestian, Q. Vien, P. Shah and G. Mapp, "Exploring energy consumption issues for multimedia streaming in LTE HetNet Small Cells," *2015 IEEE 40th Conference on Local Computer Networks (LCN)*, Clearwater Beach, FL, 2015, pp. 498-501.

184. H. Çelebi, N. Maxemchuk, Y. Li and İ. Güvenç, "Energy reduction in small cell networks by a random on/off strategy," *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, Atlanta, GA, 2013, pp. 176-181.
185. П. О. Гуськов, Т. А. Максимюк, and М. М. Климаш, "Метод динамічного формування структури рівня радіодоступу для мереж 5G", *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Радіоелектроніка та телекомунікації*, №818, с. 220–230, 2015.
186. T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo, "Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands," *Smart Computing Review*, vol. 5., №4, pp. 346-355, 2015.
187. T. Maksymyuk, M. Brych, M. Klymash and M. Jo, "Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network," *2017 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, Lviv, 2017, pp. 197-200.
188. М. І. Бешлей, М. О. Селюченко, О. А. Лаврів, А. Р. Масюк, Г.В. Холявка, "Оцінка адекватності функціонування програмного маршрутизатора у процесі обслуговування мультимедійного трафіку," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, серія "Радіоелектроніка та телекомунікації," №. 818, с. 162–173, 2015.
189. Б. А. Бугиль, О. А. Лаврів, М. І. Бешлей, В. В. Червенець, "Методи оптимізації фізичної та логічної структур телекомунікаційних мереж," *Вісник Національного університету "Львівська політехніка"*, серія "Радіоелектроніка та телекомунікації," №. 766, с. 76–81, 2013.
190. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Lavriv, V. Chervenets, H. Kholiavka, M. Klymash, "Increasing the efficiency of real-time content delivery by improving the technology of priority assignment and processing of IP traffic," *Smart Comput. Rev.*, vol. 5, no. 2, pp. 1–13, 2015.
191. W. Kim and Y. Suh, "Enhanced adaptive periodic mobility load balancing algorithm for LTE femtocell networks," *2013 Fourth International Conference on the Network of the Future (NoF)*, Pohang, 2013, pp. 1-5.

192. S. Oh, H. Kim and Y. Kim, "User mobility impacts to mobility load balancing for self-organizing network over LTE system," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Slavske, 2018, pp. 1082-1086.
193. I. Demydov, N. A. Baydoun, M. Beshley, M. Klymash, and O. Panchenko, "Development of basic concept of ict platforms deployment strategy for social media marketing considering tectonic theory", *EUREKA: Physics and Engineering*, vol. 0, no. 1, pp. 18–33, Jan. 2020,
194. D. Castro-Hernandez and R. Paranjape, "A distributed load balancing algorithm for LTE/LTE-A heterogeneous networks," *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*, New Orleans, LA, 2015, pp. 380-385.
195. "Opnet Modeler Simulator - Performance, Editor, Modeling", Opnet Projects. [Online]. Available: <http://opnetprojects.com/opnet-modeler/>. [Accessed: 14-Feb-2019].
196. "MATLAB - MathWorks - MATLAB & Simulink". [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>. [Accessed: 14-Feb-2019].
197. "The cross-platform streaming solution – VideoLAN". [Online]. Available: <https://www.videolan.org/vlc/streaming.html>. [Accessed: 14-Feb-2019].
198. "Tcpreplay - Pcap editing and replaying utilities". [Online]. Available: <https://tcpreplay.appneta.com/>. [Accessed: 14-Feb-2019].
199. C. Hoffman, "How to Use Wireshark to Capture, Filter and Inspect Packets", How-To Geek. [Online]. Available: <https://www.howtogeek.com/104278/how-to-use-wireshark-to-capture-filter-and-inspect-packets/>. [Accessed: 14-Feb-2019].
200. W. Loh, K. H. B. Voo and D. B. L. Bong, "Video quality assessment based on a modified mean squared error," *2015 IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*, Kuala Lumpur, 2015, pp. 500-504.

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

Графічний результат виконання програмного коду

%% Ініціалізація змінних

clear; % очистка робочого простору

tic; % фіксація часу проведення експерименту

Troch=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку IPTV

Ttruv=[]; %масив який буде записувати тривалості трансляції сервісу IPTV

Tkin=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку IPTV

Troch2=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку VoIP

Ttruv2=[]; %масив який будезаписувати тривалості трансляції сервісу VoIP

Tkin2=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку VoIP

Troch3=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку VoD

Ttruv3=[]; %масив який будезаписувати тривалості трансляції сервісу VoD

Tkin3=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку VoD

Troch4=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку WEB

Ttruv4=[]; %масив який будезаписувати тривалості трансляції сервісу WEB

Tkin4=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку WEB

Troch5=[]; %масив, у який буде записуватися початки викликів абонентів трафіку VIDEOCONFERENCE

Ttruv5=[]; %масив який будезаписувати тривалості трансляції сервісу VIDEOCONFERENCE

Tkin5=[]; %масив який буде записувати час закінчення викликів абонентів трафіку VIDEOCONFERENCE

IPTV=[]; IPTVA=0; % масив значення пропускних здатностей IPTV трафіку

VoD=[]; VoDA=0; %масив значення пропускних здатностей VoD(відео за запитом) трафіку

```

Vidconf=[];VidconfA=0; %масив значення пропускних здатностей трафіку
відеоконференцій
WEB=[];WEBA=0; %масив значення пропускних здатностей WEB трафіку
Signaling=[];SignalingA=0; %масив значення пропускних здатностей трафіку
сигналізації
Voip=[];VoipA=0; %масив значення пропускних здатностей VoIP(голосу)
трафіку
% IPTV=[]; IPTVA=0;% масив значення пропускних здатностей IPTV трафіку
% VoD=[];VoDA=0; %масив значення пропускних здатностей VoD(відео за
запитом) трафіку
% Vidconf=[];VidconfA=0; %масив значення пропускних здатностей трафіку
відеоконференцій
% WEB=[];WEBA=0; %масив значення пропускних здатностей WEB трафіку
% Signaling=[];SignalingA=0; %масив значення пропускних здатностей трафіку
сигналізації
% Voip=[];VoipA=0; %масив значення пропускних здатностей VoIP(голосу)
трафіку
%% Генерація кількості абонентів, які користуються певними
інфокомунікаційними послугами
% Генерація моментів поступлення та закінчення викликів
%%IPTV
Tmod=21600;%тривалість моделювання сервісу IPTV
Tрoch=[];
r = 2400;
Tрoch=[5:r:Tmod]';
N=Tmod/r;%кількість трансляцій сервісу протягом часу моделювання
for i=1:1:N
    Ttr=unifrnd(1,2000,1);%тривалість викликів згенерованих за Нормальним
розподілом
Ttruv=[Ttruv;Ttr];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку IPTV у
масив
end
i=1:1:N;
Tрoch(i,2)=10;
Tkin(i,1)=Tрoch(i,1)+Ttruv(i,1); %запис моментів завершення викликів у масив
Tkin(i,2)=10;

```



```

Tрoch=sort(Tрoch);% сортування масиву початків викликів
Tkin=sort(Tkin);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tрoch (i,1),10,'redo-',Tkin(i,1),10,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for i=1:1:N
plot(Tрoch(i,1):Tkin(i,1),10,'-k.','LineWidth',1),grid;
end
%%VoIP
% hold on
Tmod2=18000;%тривалість моделювання сервісу VoIP
Tрoch2=[];
r2 = 2000;
Tрoch2=[40:r2:Tmod2]';
N2=Tmod2/r2;%кількість трансляції сервісу протягом моделювання
for t=1:1:N2
    Ttr2=unifrnd(1,600,1);%%тривалість викликів згенерованих за Нормальним
розподілом
Ttruv2=[Ttruv2;Ttr2];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку VoIP
у масив
end
t=1:1:N2;
Tрoch2(t,2)=0.128;
Tkin2(t,1)=Tрoch2(t,1)+Ttruv2(t,1); %запис моментів завершення викликів у
масив
Tkin2(t,2)=0.128;
Tрoch2=sort(Tрoch2);% сортування масиву початків викликів
Tkin2=sort(Tkin2);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tрoch2(t,1),0.128,'redo-',Tkin2(t,1),0.128,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for t=1:1:N2
plot(Tрoch2(t,1):Tkin2(t),0.128,'-green.','LineWidth',2),grid;
end
%%VoD
% hold on
Tmod3=22500;%тривалість моделювання сервісу VoD
Tрoch3=[];

```

```

r3 = 2500;
Tрoch3=[20:r3:Tmod3]';
N3=Tmod3/r3;%кількість трансляції сервісу протягом моделювання
for t3=1:1:N3
    Ttr3=unifrnd(1,2300,1);%%тривалість викликів згенерованих за Нормальним
розподілом
Ttruv3=[Ttruv3;Ttr3];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку VoD у
масив
end
t3=1:1:N3;
Tрoch3(t3,2)=4;
Tkin3(t3,1)=Tрoch3(t3,1)+Ttruv3(t3,1); %запис моментів завершення викликів у
масив
Tkin3(t3,2)=4;
Tрoch3=sort(Tрoch3);% сортування масиву початків викликів
Tkin3=sort(Tkin3);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tрoch3(t3,1),4,'redo-',Tkin3(t3,1),4,'-blue','LineWidth',2),grid;
hold on
for t3=1:1:N3
plot(Tрoch3(t3,1):Tkin3(t3),4,'-m.','LineWidth',2),grid;
end
%%WEB
% hold on
Tmod4=9000;%тривалість моделювання сервісу WEB
Tрoch4=[];
r4 = 1000;
Tрoch4=[1000:r4:Tmod4]';
N4=Tmod4/r4;%кількість трансляції сервісу протягом моделювання
for t4=1:1:N4
    Ttr4=unifrnd(1,500,1);%%тривалість викликів згенерованих за Нормальним
розподілом
Ttruv4=[Ttruv4;Ttr4];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку WEB
у масив
end
t4=1:1:N4;
Tрoch4(t4,2)=0.512;

```

```

Tkin4(t4,1)=Tpoch4(t4,1)+Ttruv4(t4,1); %запис моментів завершення викликів у
масив
Tkin4(t4,2)=0.512;
Tpoch4=sort(Tpoch4);% сортування масиву початків викликів
Tkin4=sort(Tkin4);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tpoch4(t4,1),0.512,'redo-',Tkin4(t4,1),0.512,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for t4=1:1:N4
plot(Tpoch4(t4,1):Tkin4(t4),0.512,'-y.','LineWidth',2),grid;
end
%%VIDEOCONFERENCE
% hold on
Tmod6=13950;%тривалість моделювання сервісу VIDEOCONFERENCE
Tpoch6=[];
r6 = 1550;
Tpoch6=[100:r6:Tmod6]';
N6=Tmod6/r6;%кількість трансляції сервісу протягом моделювання
for t6=1:1:N6
    Ttr6=unifrnd(1,400,1);%%тривалість викликів згенерованих за Нормальним
розподілом
Ttruv6=[Ttruv6;Ttr6];%запис згенерованих тривалостей трансляції потоку
VIDEOCONFERENCEу масив
end
t6=1:1:N6;
Tpoch6(t6,2)=2;
Tkin6(t6,1)=Tpoch6(t6,1)+Ttruv6(t6,1); %запис моментів завершення викликів у
масив
Tkin6(t6,2)=2;
Tpoch6=sort(Tpoch6);% сортування масиву початків викликів
Tkin6=sort(Tkin6);% сортування масиву закінчення викликів
plot(Tpoch6(t6,1),2,'redo-',Tkin6(t6,1),2,'-blueo','LineWidth',2),grid;
hold on
for t6=1:1:N6
plot(Tpoch6(t6,1):Tkin6(t6),2,'-b.','LineWidth',2),grid;
end
title('Сумарне навантаження на Wi-Fi точку інфокомунікаційними послугами ');

```

```

xlabel('Тривалість моделювання сервісу [с]');
ylabel('Необхідна пропускна здатність сервісу [Мбіт/с]')
legend('5 - VideoConf ','4 - WEB','3 - VoD','2 - VoIP','1 - IPTV ');
NZ=N+N2+N3+N4+N5+N6;
ZagTрoch=[];
ZagTрoch=[Tрoch;Tрoch2;Tрoch3;Tрoch4;Tрoch5;Tрoch6];
n=NZ;
R = sortrows(ZagTрoch);
T = R;
for i = 1:n
    T(i,1) = R(n+1-i,1);
    T(i,2) = R(n+1-i,2);
end
ZaTkin=[];
ZaTkin=[Tkin;Tkin2;Tkin3;Tkin4;Tkin5;Tkin6];
R1 = sortrows(ZaTkin);
T1 = R1;
for i = 1:n
    T1(i,1) = R1(n+1-i,1);
    T1(i,2) = R1(n+1-i,2);
end
krok=1; % крок перевірки присутності сеансу сервісу
y=1;
z=1;
summ=[];
mAbon=[];
Mas=[];
NEXT=[];
SUMM=[];
mAbon=0;
summ=0;
% Генерація завантаженості Wi-Fi каналу при інтеграції Wi-fi/GSM технології
інфокомунікаційними послугами
for next=0:krok:max(Tрoch3)
while (1)
if R(y,1)<=next

```

```

if R(y,2)==10
    IPTVA=IPTVA+1;
    summ=summ+10;
end
if R(y,2)==0.128
    VoipA= VoipA+1;
    summ=summ+0.128;
end
if R(y,2)==4
    VoDA=VoDA+1;
    summ=summ+4;
end
if R(y,2)==0.512
    WEBA=WEBA+1;
    summ=summ+0.512;
end
if R(y,2)==2
    VidconfA=VidconfA+1;
    summ=summ+2;
end
if y<NZ mAbon=mAbon+1;
end
    if y<NZ y=y+1;
    else break;end
else break;
end
end

if R1(z,1)<=next
    if R(z,2)==10
        IPTVA=IPTVA-1;
        summ=summ-10;
    end
    if R1(z,2)==0.128
        VoipA= VoipA-1;
        summ=summ-0.128;
    end
end

```

```

end
if R1(z,2)==4
    VoDA=VoDA-1;
    summ=summ-4;
end
if R1(z,2)==0.512
    WEBA=WEBA-1;
    summ=summ-0.512;
end
if R1(z,2)==2
    VidconfA=VidconfA-1;
    summ=summ-2;
end
if z<NZ mAbon=mAbon-1;
end
if z<NZ z=z+1;
else break;end
else break;
end
end
IPTV=[IPTV;IPTVA];
VoD=[VoD;VoDA];
Vidconf=[Vidconf;VidconfA];
WEB=[WEB;WEBA];
Voip=[Voip;VoipA];
Mas=[Mas;mAbon];
NEXT=[NEXT;next];
SUMM=[SUMM;summ];
end
Vukl=[];
Vukl=[IPTV+VoD+Vidconf+WEB+Voip];

```

## ДОДАТОК 2. Акти впровадження результатів дисертаційної роботи

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор

ТзОВ ВТФ«Контех»

Смолянський Є.С.

" 28 " 11 2019 р.

### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи

Кагала Ігоря Олександровича

### " Підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/WI-FI "

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВТФ «Контех» для підвищення якості функціонування корпоративної мережі використані результати дисертаційної роботи Кагала І. О. "Підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/WI-FI", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- алгоритм обслуговування черги каналного рівня в мережі Wi-Fi для боротьби з короткочасними відмовами каналу в умовах передавання відеопотоків реального часу і, впровадження якого дало змогу:

- уникнути зниження якості передавання відеопотоків отримувачам, для яких якість з'єднань не погіршувалась, а також зменшити зниження якості передавання відеопотоків отримувачам, для яких відбулась відмова каналу через появу в мережі інтерференційних завад та низького рівня сигналу;

- покращити якість сприйняття відео послуг користувачами мережі Wi-Fi від 5% до 45%.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ ВТФ«Контех», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 2%.

Начальник відділу  
Адміністрування мереж



Смолянський О.Є.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"  
Директор  
ТзОВ «Телекомунікаційна компанія»

Пентак І.М.  
" 6 " \_\_\_\_\_ 2019 р.

**АКТ**

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи

Кагала Ігоря Олександровича

**" Підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/WI-FI "**

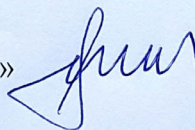
Даний акт складений про те, що у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» для підвищення енергоефективності та якості обслуговування телекомунікаційних мереж використані результати дисертаційної роботи Кагала І. О. "Підвищення енергоефективності та якості обслуговування інтегрованих мереж LTE/WI-FI ", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- метод адаптивного формування розміру комірки безпроводної мережі, дав змогу підвищити якість обслуговування за критерієм пропускної здатності точки доступу на 36% в умовах пікових навантажень на окремі групи комірок шляхом ефективного управління ресурсами мережі в залежності від фактичного сценарію функціонування та вимог окремих користувачів;
- алгоритм моніторингу та аналізу стану радіодоступу мережі, дав змогу підвищити енергоефективність мережі на 30-42% при зменшенні середньої пропускної здатності мережі на 1% - 4%.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ «Телекомунікаційна компанія», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 3%.

Головний інженер

ТзОВ «Телекомунікаційна компанія»



Рубаха І.М.



### ДОДАТОК 3. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. M. Beshley, M. Klymash, B.Stryhaluk, O. Shpur, B. Bugil and I. Kagalo, “SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets,” *International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE)*, vol. 4, Issue 1, pp. 10–21. January 2015.

2. B. M. Strykhalyuk, I. O. Kahalo, M. V. Brych, M. I. Beshley, and M. O. Seliuchenko, “Implementation of wireless heterogeneous network based on LTE core virtualization for military communication systems”, *Системи озброєння і військова техніка*, № 4, с. 125–132, 2014.

3. I. O. Kagalo, M. I. Beshley, M. M. Klimash, O. M. Panchenko, G. V. Beshley, “Адаптивне формування багаторівневої радіоструктури інтегрованих мереж LTE/Wi-Fi,” *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), с.24–38, 2019.

4. A. P. Masjuk, I. B. Strichaluk, M. V. Brych, I. O. Kagalo, G. V. Beshley, “Алгоритм інтелектуального вертикального хендоверу в гетерогенній мобільній мережі на основі хмарних обчислень,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. *Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 874, с. 110–121, 2017.

5. M. M. Klimash, M. I. Kyryk, N. M. Pleskanka, і I. O. Kagalo, “Багаторівнева модель буферизації даних у вузлах обслуговування мультисервісного трафіку,” *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. *Радіoeлектроніка та телекомунікації*, №. 796, с. 182–194, 2014.

6. M. M. Klimash, O. A. Lavriv, I. O. Kagalo, B. V. Koval, T. A. Maksimjuk, “Покращення параметрів радіоінтерфейсу LTE/HSOPA,” *Комп’ютерні технології друкарства*, №. 26, с. 130–137, 2011.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

7. V. Romanchuk, T. Andrukhiv and I. Kahalo, "The main causes of failures SQL Server," *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, Lviv-Slavske, 2012, pp. 376-376. (Очна участь здобувача із доповіддю).

8. M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Panchenko, O. Zyuzko and I. Kahalo, "Experimental performance analysis of software-defined network switch and controller," *2018 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, 2018, pp. 282-286. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

9. P. Huskov, T. Maksymyuk, I. Kahalo and M. Klymash, "Smart backhauling subsystem for 5G heterogeneous network," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, 2015, pp. 481-483. (Очна участь здобувача, співдоповідач).

10. H. Beshley, M. Klymash, M. Beshley and I. Kahalo. "Improving the Efficiency of LTE Spectral Resources Use by Introducing the new of M2M/IoT Multi-Service Gateway," *The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics*, Lviv, 2019, pp. 114-117. (Очна участь здобувача із доповіддю).

11. I. Kahalo, H. Beshley, A. Masiuk and V. Pashkevych, "The method of transmitting real-time video streams for Wi-Fi networks with short-term channel failures," *2019 3rd International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT'2019)*, Lviv, 2019, pp. 356-359. (Очна участь здобувача із доповіддю).

12. I. Kahalo, H. Beshley, M. Beshley and O. Panchenko "Enhancing QoS and Energy Efficiency of LTE/LTE-U/Wi-Fi Integrated Network Based on Adaptive Technique for Radio Structure Formation," *2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON)*, Lviv, 2019, pp. 1167-1170. (Очна участь здобувача із доповіддю).

13. М. Климаш, М. Бешлей, І. Кагало, Л. Готра, "Вдосконалення методів та алгоритмів управління інформаційними потоками в конвергентних

телекомунікаційних мережах,” *матеріали 4-ї Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 25-річчю заснування кафедри “Радіотехніки та інформаційні безпеки” Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича*”, м. Чернівці, 2014, с.106-107. (Очна участь здобувача із доповіддю).

14. Б. Бугиль, І. Кагало, “Підвищення ефективності маршрутизації інформаційних потоків на основі оптимального розподілу мережевих ресурсів,” *матеріали V міжнародної наукової конференції молодих вчених "Комп'ютерні науки та інженерія*, Львів, 2011 , с. 304-305. (Очна участь здобувача із доповіддю).

15. O. Lavriv, I. Kahalo, and R. Kolodiy , “ Application of NoSQL approach in data-centered network architectures: big data case,” *2015 1st International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2015 (AICT'2015)*, Lviv, Ukraine, pp. 103–105. (Очна участь здобувача із доповіддю).