

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Максимюк Тарас Андрійович**

УДК 621.396

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими  
системами мобільного зв'язку**

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



Максимюк Т.А

Подається на здобуття наукового ступеня  
доктора технічних наук

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

*Ідентичність всіх примірників дисертації*

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*В. о. вченого секретаря спеціалізованої  
вченої ради*

**/Р. Л. Голяка/**

Львів – 2021

## АНОТАЦІЯ

*Максимюк Т.А.* Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2021.

В дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему розроблення методів, моделей та засобів інтелектуального управління децентралізованою мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку, з метою підвищення її техніко-економічної ефективності для операторів та абонентів, в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури. Запропоновано системний підхід до структурно-функціонального синтезу децентралізованих мереж мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням, який полягає у розробленні множини методів інтелектуального управління мережною інфраструктурою, засобів автоматизації мережі для забезпечення її універсальності до будь-яких стандартів безпроводного зв'язку та типів мобільних пристроїв, а також моделей децентралізації радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури із адаптивним мультиоператорним обслуговуванням абонентів.

У роботі розв'язується протиріччя між потребою у централізованій моделі управління інфраструктурою та радіочастотними ресурсами в мережі мобільного зв'язку на основі штучного інтелекту, для забезпечення її ефективності за множиною технічних показників та потребою у децентралізованій моделі гнучкого розгортання мереж мобільного зв'язку в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури, для забезпечення її ефективності за множиною економічних показників.

Для цього, запропоновано нову концепцію децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка інтегрує найсучасніші засоби штучного інтелекту та технології розподілених реєстрів (блокчейн), з метою поєднання переваг як

централізованої, так і децентралізованої бізнес-моделі функціонування мереж мобільного зв'язку, усуваючи при цьому характерні їм недоліки та обмеження.

У *першому* розділі систематизовано основні аспекти функціонування та показники ефективності мереж мобільного зв'язку з технічної та економічної точки зору. На основі проведеного аналізу сформовано ряд завдань дисертаційного дослідження, розв'язання яких у комплексі дає змогу досягти синергетичного ефекту підвищення техніко-економічної ефективності мультиоператорної мережі мобільного зв'язку шляхом децентралізованого інтелектуального управління інфраструктурою. У подальших розділах представлено основні наукові та практичні результати дисертаційної роботи.

У *другому* розділі представлено основну структурно-функціональну модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку, в рамках якої реалізуються усі наступні наукові та практичні результати дисертаційної роботи. Запропонована модель базується на відокремленні площини абонентів, площини мережної інфраструктури, площини операторів, площини децентралізації та площини інтелектуального управління. Такий підхід дає змогу операторам автоматизовано координувати процес спільного використання мережної інфраструктури, на основі смарт-контрактів, токенизації активів та методів штучного інтелекту. Для повноцінної децентралізації, представлена модель доповнюється розробленим методом адаптивного вибору оператора в режимі реального часу на основі аналізу функції корисності абонента, яка аналітично виведена для інтегрального оцінювання параметрів якості та вартості сервісу, з урахуванням індивідуального компромісу між ними для кожного абонента. Для підтримки процесу функціонування та інтелектуального управління мережі в цілому, розроблено систему децентралізованого краудсорсингового моніторингу, яка забезпечує гнучкий асинхронний процес збору інформації для операторів, із статистичною повнотою для аналітичних засобів машинного навчання.

У *третьому* розділі розглядається проблематика децентралізованого синтезу мережної інфраструктури з використанням засобів штучного інтелекту.

Дана проблема у роботі вирішується з використанням розвинутого методу проектування покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена. Новизна розробленого методу полягає у двох основних відмінностях від класичної реалізації. Перша полягає у введенні метрики співвідношення сигнал/шум, замість метрики Евклідової відстані, що дає змогу враховувати просторові характеристики поширення сигналу в процесі самооптимізації топологічної структури та підвищує її технічну ефективність. Друга відмінність полягає у використанні фіксованих вагових коефіцієнтів нейронів, що дає змогу врахувати наявність існуючих базових станцій інших операторів для оптимального розширення покриття та підвищує економічну ефективність загальної інфраструктури радіодоступу. Запропонований метод доповнюється розробленим алгоритмом моделювання мобільності абонентів, на основі генеративно-змагальних нейронних мереж, який дає змогу необмежено генерувати реалістичні траєкторії переміщення абонентів для забезпечення процесу інтелектуального планування покриття при відсутності реальної мережної статистики.

*Четвертий* розділ присвячений аспектам децентралізованого інтелектуального управління радіочастотним ресурсом ліцензійного та неліцензійного діапазонів. Зокрема, запропоновано техніко-економічну модель спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку на основі теорії ігор, яка дає змогу досягти еволюційно-стабільної рівноваги між цінovими політиками операторів в процесі конкурентного обслуговування абонентів, що дає змогу підвищити технічні показники ефективності мережі для абонентів, забезпечуючи при цьому додатну рентабельність операторів. Розроблено модель спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу операторами мобільного зв'язку, яка використовує смарт-контракти на основі кооперативної теорії ігор. Результати моделювання показують, що запропонована модель забезпечує рівномірний розподіл доступу операторів до неліцензійного радіочастотного ресурсу, досягаючи при цьому рівноваги Неша



незалежно від кількості конкуруючих операторів. Для доповнення запропонованих моделей управління радіочастотним ресурсом, розвинуто метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом, шляхом прогнозування часових характеристик трафіку окремих типів сервісу з використанням глибоких рекурентних нейронних мереж, що дає змогу операторам збалансувати свої економічні стратегії резервування радіочастотного ресурсу для обслуговування трафіку абонентів.

У *п'ятому* розділі вирішується проблема наскрізного управління інформаційними потоками децентралізованих мереж мобільного зв'язку. Для цього розвинуто метод інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу, шляхом врахування взаємозв'язку між ними, що дає змогу знизити обсяг надлишкового трафіку в сусідніх сегментах мережі мобільного зв'язку при здійсненні хендоверу між ними. Крім того, розвинуто метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі, для забезпечення узгодженого диференціювання інформаційних потоків з різними вимогами до якості сервісу на основі штучного інтелекту, що у поєднанні з інтелектуальним мультиплексуванням у мережі доступу забезпечує наскрізне управління інформаційними потоками в децентралізованих системах мобільного зв'язку національного масштабу.

*Шостий* розділ присвячений методологічним та практичним аспектам реалізації децентралізованих мереж мобільного зв'язку. Зокрема, розглянуто стратегії розгортання приватних децентралізованих мереж мобільного зв'язку, розглянуто основні принципи правового регулювання ринку мобільного зв'язку та технології блокчейн, а також розроблено прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку з використанням програмно-конфігурованих радіомодулів, блокчейн-інфраструктури та хмарної системи інтелектуального управління.

**Ключові слова:** децентралізована система мобільного зв'язку, автоматизоване управління, радіочастотний ресурс, блокчейн, смарт-контракт, методи штучного інтелекту, 5G/6G.

### **Монографії:**

1. М. М. Климаш, Т. А. Максимюк, М. І. Бешлей. Методи та моделі побудови гетерогенних мереж мобільного зв'язку 4G/5G — Львів: Видавництво «Львівської політехніки», 2020 – 388 с.

### **Патенти:**

2. Патент України на корисну модель UA 127803 U, H04J 13/00, Спосіб просторово-часового блочного кодування багатоантенних систем /М.М. Климаш, В.О. Пелішок, Т.А Максимюк – № u201801658; заявл. 19.02.2018; опубл. 27.08.2018. – Бюл. № 16/2018.

### **Статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:**

3. D. Araújo, T. Maksymyuk, A. Almeida, T. Maciel, J. Mota, M. Jo, “Massive MIMO: survey and future research topics,” *IET Communications*, vol. 10, no. 15, pp. 1938-1946, 2016.
4. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Jo, “Clustering hypervisors to minimize failures in mobile cloud computing,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 18, pp. 3455-3465, 2016.
5. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, “Comprehensive spectrum management for heterogeneous networks in LTE-U,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 8-15, 2016.
6. J. Gazda, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, T. Maksymyuk, M. Jo, “Unsupervised learning algorithm for intelligent coverage planning and performance optimization of multitier heterogeneous network,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 39807-39819, 2018.
7. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, “Probabilistic recovery of incomplete sensed data in IoT,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 2282-2292, 2018.
8. L.Han, T. Maksymyuk, X. Bao, J. Zhao, Y. Liu, “Deep learning based loss recovery mechanism for video streaming over mobile information-centric

- network,” *KSII Transactions on Internet & Information Systems*, vol. 13, no.9, 2019.
9. T. Maksymyuk, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, J. Gazda, “Intelligent framework for radio access network design,” *Wireless Networks*, vol.26, pp. 759–774, Nov. 2019.
  10. D. Horváth, J. Gazda, E. Šlapak, T. Maksymyuk, “Modeling and analysis of self-organizing UAV-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment,” *Entropy*, vol. 21, no. 11, article 1077, pp. 1-26, 2019.
  11. G. Bugár, M. Vološin, T. Maksymyuk, J. Zausinová, V. Gazda, D. Horváth, J. Gazda, “Techno-economic framework for dynamic operator selection in a multi-tier heterogeneous network,” *Ad Hoc Networks*, vol. 97, pp. 102007, Feb. 2020.
  12. Y. Liu, W. Hu, L. Han, T. Maksymyuk, Z. Chen. “A fast filling algorithm for image restoration based on contour parity,” *CMC-Computers, Materials & Continua*, vol. 63, no. 1, pp. 509–519, 2020.
  13. M. Khan, M. Jamali, T. Maksymyuk, J. Gazda, “A blockchain token-based trading model for secondary spectrum markets in future generation mobile networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, article 7975393, 2020.
  14. T. Maksymyuk, J. Gazda, M. Volosin, G. Bugar, D. Horvath, M. Klymash, M. Dohler, “Blockchain-empowered framework for decentralized network management in 6G,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 9, pp. 86-92, Sep. 2020.

**Статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до інших міжнародних наукометричних баз:**

15. T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, “Study and development of next-generation optical networks,” *Smart Computing Review*, vol. 4, no. 6, pp. 470-480, 2014.
16. T. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy, “Designing the new backhaul for 5G heterogeneous network based on converged optical

infrastructure,” *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 4, pp. 9-13, 2017.

17.Т. Maksymyuk, V. Andrushchak, S. Dumych, B. Shubyn, G. Bugar, J. Gazda, “Blockchain-based network functions virtualization for 5G network slicing,” *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 20, no. 4, pp. 54-59, 2020.

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

18.О.І. Сиротинський, І.С. Беляєв, Т.А. Максимюк, М.І. Олексін, “Захист інформаційних систем від мережевих DDOS атак на основі Марківської моделі поведінки ботнету”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №738, С. 192-197, 2012.

19.Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, В.З. Пашкевич, “Модель акустооптичного комутатора для повністю оптичних телекомунікаційних систем”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №766, С. 90-95, 2013.

20.М.М. Климаш, О.В. Красько, Т.А. Максимюк, “Метод спектрально-часового мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу”, *Вісник ДонНТУ*, №2(27), С. 71-79, 2014.

21.М.В. Кайдан, С.С. Думич, Т.А. Максимюк, Р.А. Бурачок, Л.М. Готра, “Розрахунок параметрів якості обслуговування у фотонних транспортних мережах”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №796, С. 147-156, 2014.

22.С.С. Думич, Д.С. Жуковська, Т.А. Максимюк, “Дослідження процесу агрегації трафіку в оптичних транспортних мережах з комутацією блоків”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №818, С. 130-136, 2015.

23.А.П. Бондарев, І.П. Максимів, Т.А. Максимюк, “Метод підвищення енергетичної ефективності HQPSK сигналів”, *Вісник Національного*

- університету «Львівська політехніка». Серія «Радіoeлектроніка та телекомунікації», №849, С. 18-22, 2016.
- 24.М.В. Кайдан, М.І. Бешлей, Т.А. Максимюк, Б.М. Стрихалюк, “Теорія кернера та фазові переходи для потоків у телекомунікаційних мережах”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіoeлектроніка та телекомунікації»*, № 909, С. 29–34, 2018.
- 25.Т.А. Максимюк, С.С. Думич, М.В. Брич, О.М. Яремко, “Метод адаптивного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мереж LTE”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, том 29(68), № 2, С. 58-63, 2018.
- 26.Т.А. Максимюк, О.В. Красько, С.С. Думич, О.М. Яремко, А.М. Варенко, “Метод мультиплексування інформаційних потоків у пасивній оптичній мережі з інтеграцією фіксованого та мобільного доступу”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, том 29(68), № 3, С. 59-65, 2018.
- 27.В.С. Андрущак, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, С.С. Думич, Ю.В. Пиріг, “Інтелектуальне управління інформаційними потоками в оптичних транспортних мережах”, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), С. 4-16, 2019.
- 28.Т.А. Максимюк, Б.П. Шубин, Д.О. Мисаковець, В.С. Андрущак, С.С. Думич, “Метод адаптивного логічного розділення мережі 5G на основі глибокого навчання”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, том 31(70), № 5, С. 36-42, 2020.
- 29.Т.А. Максимюк, Б.П. Шубин, В.С. Андрущак, С.С. Думич, М.М. Климаш, “Метод інтелектуального управління контентом у мережах мобільного зв’язку”, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(68), С. 15-26, 2020.

**Статті у інших періодичних виданнях:**

30. Максимюк Т. А., Шубин Б. П., Андрущак В. С., Бешлей Г. В., Думич С. С., Климаш М. М., «Практична реалізація програмно-конфігурованої мережі 5G на основі технологій Cloud-RAN та SDR», *Вісник Університету «Україна»*, №1 (24), С. 23-34, 2020.

**Публікації у матеріалах конференцій, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:**

31. S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko and P. Guskov, "The virtual channel parameters calculation in all-optical network," *IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, p. 88.
32. O. Yaremko and T. Maksymyuk, "Power control method in multiuser cellular networks," *IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, pp. 386-387.
33. S. Dumych, P. Guskov, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Simulation of characteristics of optical burst switched networks," *IEEE International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo)*, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 492-493.
34. T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Increasing of energy efficiency of a cognitive radio network," *IEEE International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo)*, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 277-278.
35. T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko and M. Jo, "Software defined optical switching for cloud computing transport systems," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2015, Bali, Indonesia, article #46.
36. B. Fekade, T. Maksymyuk and M. Jo, "A virtual server qos enhancement method in cloud computing," *ACM International Conference on Ubiquitous Information*

- Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2016, Da Nang, Vietnam, article #81.
- 37.T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 953-956.
- 38.A. Bondarev, I. Maksymiv and T. Maksymyuk, "Method of improving the power efficiency of QPSK signals," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 253-255.
- 39.M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," *IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 1-6.
- 40.T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash and M. Jo, "Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed and unlicensed spectrum for multi-operator 5G hetnet," *IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 315-318.
- 41.T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria and M. Jo, "An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, Jan. 2017, Beppu, Japan, article #105.
- 42.T. Maksymyuk, M. Brych, M. Klymash and M. Jo, "Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 197-200.
- 43.M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and T. Maksymyuk, "Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 209-212

- 44.T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash, M. Jo, R. Romaniuk, A. Kotyra, A. Zhanpeisova, A. Kozbekova, "Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed spectrum for multi-operator 5G hetnet," *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, vol.10445, Wilga, Poland, Aug. 2017, article #5T.
- 45.T. Maksymyuk, M. Brych, Yu. Klymash, M. Kyryk and M. Klymash, "Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks," *IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2017, Kharkiv, Ukraine, pp. 515-518.
- 46.J. Gazda, M. Volosin, E. Slapak, P. Drotar and T. Maksymyuk, "Frequency spectrum distribution dynamics: Evidence from an agent-based experimental economy mode," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1123-1126.
- 47.T. Maksymyuk, M. Beshley, O. Petrenko, M. Klymash and Yu. Matsevityi, "Eavesdropping-resilient wireless communication system based on modified OFDM/QAM air interface," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1127-1130.
- 48.H. Beshley, T. Maksymyuk, M. Beshley and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1147-1151.
- 49.V. Andrushchak, S. Dumych, T. Maksymyuk, M. Kaidan and O. Urikova, "Intelligent data flows management for performance improvement of optical label switched network," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1143-1146.



- 50.V. Andrushchak, T. Maksymyuk, D. Ageyev and M. Klymash, "Development of the ibeacon's positioning algorithm for indoor scenarios," *IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2018, Kharkiv, Ukraine, pp. 741-744.
- 51.T. Maksymyuk, J. Gazda, A. Luntovskyy and M. Klymash, "Artificial intelligence based 5G coverage design and optimization using deep generative adversarial neural networks," *IEEE International Conference on Information and Communications Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Sep. 2018, Odessa, Ukraine, pp.1-4.
- 52.J. Zausinová, J. Gazda and T. Maksymyuk, "Real-time spectrum secondary markets: Agent-based model of investment activities of heterogeneous operators," *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, Prague, April, 2018, pp. 1-6.
- 53.M. Klymash, T. Maksymyuk, S. Dumych and O. Yaremko, "Designing the industrial and environmental monitoring system based on the Internet of Things architecture," *IEEE International Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 187-190
- 54.T. Maksymyuk, J. Gazda, O. Yaremko and D. Nevinskiy, "Deep learning based massive MIMO beamforming for 5G mobile network," *IEEE International Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 241-244
- 55.E. Šlapak, J. Gazda, D. Horváth, G. Bugár, M. Vološin and T. Maksymyuk, "HetNet spatial topology design using mini-batch K-means clustering," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779242
- 56.T. Maksymyuk, L. Han, S. Larionov, B. Shubyn, A. Luntovskyy and M. Klymash, "Intelligent spectrum management in 5G mobile networks based on

- recurrent neural networks," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779301
- 57.T. Maksymyuk, J. Gazda, L. Han and M. Jo, "Blockchain-based intelligent network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 36-39.
- 58.B. Shubyn, T. Maksymyuk, "Intelligent handover management in 5G mobile networks based on recurrent neural networks," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 348-351.
- 59.V. Andrushchak, M. Kaidan, S. Dumych, Y. Pyrih and T. Maksymyuk, "Research on the scalability of all-optical switches in the OLS networks," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779310
- 60.T. Rosa, M. Kaidan, J. Gazda, P. Bykovyy, G. Sapozhnyk and T. Maksymyuk, "Scalable QAM modulation for physical layer security of wireless networks," *IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Sep. 2019, Metz, France, pp. 1095-1098.
- 61.E. Šlapak, J. Gazda, G. Bugár and T. Maksymyuk, "Review of cellular radio network cell placement design, from traditional to artificial intelligence based approaches," *IEEE International Symposium ELMAR*, Sep. 2019, Zadar, Croatia, pp. 93-96.
- 62.V. Andrushchak, M. Kaidan, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Smart payload management in edge nodes of optical label switching networks," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Dec. 2019, Kyiv, Ukraine, pp. 175-178.

63. M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "Realistic user mobility simulator for 5G communication networks," *IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, May, 2019 Timisoara, Romania, pp. 263-268.
64. T. Maksymyuk, J. Gazda, M. Ružička, E. Slapak, G. Bugar and L. Han, "Deep learning based mobile network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2020, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 890-893.
65. M. Ružička, M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "The extension of existing end-user mobility dataset based on generative adversarial networks," *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, April, 2020, Bratislava, Slovakia.
66. I. V. Yatskiv, S. Kulyna, P. Bykovyy, T. Maksymyuk and A. Sachenko, "Method of reliable data storage based on redundant residue number system," *IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2020, Dortmund.

## ABSTRACT

**T. Maksymyuk. Intelligent automated management of decentralized mobile communication systems.** – As a manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the D.Sc. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication networks and systems. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry for education and science of Ukraine, Lviv, 2021.

The thesis solves a scientific problem of the development of methods, models and means for the intelligent decentralized multi-operator infrastructure management in mobile networks, to increase its technical and economic efficiency for operators and users in the scenario of open spectrum and infrastructure markets. This work aims to resolve an uncertainty between the need of centralized management to enhance the technical efficiency of the mobile network by leveraging the advanced capabilities of artificial intelligence, and the demand for decentralized open spectrum market with flexible business models for infrastructure deployment and sharing by operators to increase the economic efficiency of the entire mobile ecosystem.

In the *first* chapter 1, we have developed a concept of a decentralized mobile network that integrates the means of artificial intelligence and the blockchain technology to leverage the advantages of both centralized and decentralized business models in the mobile network, while eliminating their corresponding drawbacks and constraints. Such a solution allows to disrupt the mobile network market by enabling a trustable spectrum and infrastructure sharing among operators, underpinned by economic and legislative mechanisms. This in turn, raises a challenge of the effective operation of the multi-operator mobile network in terms of technical and economic factors, while assuming the conditions of the decentralized infrastructure deployment, the open spectrum market and the ubiquitous connectivity of end users regardless of the serving operator. Thus, the key scientific contributions of the thesis are summarized as following.

In the *second* chapter, a new structural and functional model of decentralized mobile network is proposed to decouple the user plane, the infrastructure plane, the operator plane, the decentralization plane and the intelligent control plane to enable

an automated coordination of the spectrum and infrastructure sharing among operators based on the smart contracts, assets tokenization and artificial intelligence. To provide a data supply chain for the artificial intelligence we have developed a decentralized monitoring system that can cope with an exogenous dynamic of the mobile network and allows operators to react in advance. To enable the trading of spectrum and infrastructure among operators within the decentralized blockchain ecosystem, we propose a tokenization model of spectrum and infrastructure based on the Non-Fungible tokens, utility tokens and central bank digital currencies. Considering the demand for the ubiquitous connectivity and the upcoming paradigm of the micro-operators in 6G, we propose a new model of adaptive operator selection based on technical and economic criteria to enable seamless user connectivity across multiple operators with flexible service level agreement smart contracts, negotiated and executed in quasi real time.

In the *third* chapter, a particular attention is given to the problem of decentralized coverage planning to allow operators extending the network coverage by placing new base stations in the most optimal way, taking into account the existing network infrastructure that has been built before. This challenge is solved by a modified version of the self-organizing maps with a combination of immutable and mutable neurons to exhibit the positions of existing and potential network infrastructure during the coverage optimization. An additional enhancement of the model has been done by replacing the conventional metric of Euclidean distance to the metric of SINR that allows optimizing the network coverage in a spatial domain, considering the impact of buildings in the urban environment on the coverage quality.

In the *fourth* chapter, the problem of spectrum management in a current semi-centralized scenario is resolved by the developed game theoretical model that allows big operators, with a nationwide spectrum license, to share the spectrum with micro-operators in a local scale based on the smart-contracts. Such a solution allows both improving the connectivity and experience of the end users as well as increasing profits of operators by sharing the spectrum based on evolutionary stable equilibrium strategies. In addition, the challenge of unlicensed spectrum sharing with interference

mitigation is resolved by the cooperative game model based on the trading of utility tokens among the operators in a blockchain. The proposed model converges to the Nash equilibrium within few iterations that ensures the fair utilization of unlicensed spectrum regardless of the number of operators. To further enhance the efficiency of spectrum sharing among operators considering their time-varying demands, we have developed the intelligent spectrum management model for mobile networks based on the recurrent neural networks, which allows to predict a traffic demand of the particular network service and allocate enough spectrum in advance.

In the *fifth* chapter, a challenge of intelligent data flows management in an optical transport network infrastructure is resolved by the two proposed solutions. First is the intelligent data flows multiplexing and aggregation across wireless and optical access domain to support effective resource utilization in an exogenous environment of decentralized mobile networks. Such an approach allows to differentiate network slices with different quality of service demands in the optical access network. Second solution, which supplements the first one, is in the intelligent data flows management across optical transport network infrastructure with transparent switching in a fully optical domain. Combination of both solutions provides an adaptive end-to-end quality of service provision for different network slices in the large scale decentralized mobile network ecosystem.

In the *sixth* chapter, a practical recommendations and several deployment strategies for the private decentralized mobile networks are discussed. In addition, a testbed of the decentralized mobile network is developed by using software defined radio peripheral NI USRP 2900, blockchain test infrastructure and the cloud based intelligent control plane. Finally, a methodology for the nationwide deployment of the decentralized mobile network with intelligent automated management is presented based on the developed solutions.

**Keywords:** decentralized mobile communication system, automated management, radio resource, blockchain, smart contract, methods of artificial intelligence, 5G/6G.

**Books:**

1. M. Klymash, T. Maksymyuk, M Beshley. Methods and models of the 4G/5G heterogeneous networks desing — Lviv: Publishing house of Lviv Polytechnic National University, 2020 – 388 p.

**Patents:**

2. Patent of Ukraine for the utility model UA 127803 U, H04J 13/00, An approach of the space-time block coding for multi-antenna systems/ M. Klymash, V. Pelishok, T. Maksymyuk – № u201801658; applied 19.02.2018; published 27.08.2018. – Bulletin no. 16/2018.

**Papers in the foreign periodical journals indexed by Scopus/Web of Science:**

3. D. Araújo, T. Maksymyuk, A. Almeida, T. Maciel, J. Mota, M. Jo, “Massive MIMO: survey and future research topics,” *IET Communications*, vol. 10, no. 15, pp. 1938-1946, 2016.
4. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Jo, “Clustering hypervisors to minimize failures in mobile cloud computing,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 18, pp. 3455-3465, 2016.
5. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, “Comprehensive spectrum management for heterogeneous networks in LTE-U,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 8-15, 2016.
6. J. Gazda, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, T. Maksymyuk, M. Jo, “Unsupervised learning algorithm for intelligent coverage planning and performance optimization of multitier heterogeneous network,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 39807-39819, 2018.
7. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, “Probabilistic recovery of incomplete sensed data in IoT,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 2282-2292, 2018.
8. L.Han, T. Maksymyuk, X. Bao, J. Zhao, Y. Liu, “Deep learning based loss recovery mechanism for video streaming over mobile information-centric

- network,” *KSII Transactions on Internet & Information Systems*, vol. 13, no.9, 2019.
9. T. Maksymyuk, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, J. Gazda, “Intelligent framework for radio access network design,” *Wireless Networks*, vol.26, pp. 759–774, Nov. 2019.
  - 10.D. Horváth, J. Gazda, E. Šlapak, T. Maksymyuk, “Modeling and analysis of self-organizing UAV-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment,” *Entropy*, vol. 21, no. 11, article 1077, pp. 1-26, 2019.
  - 11.G. Bugár, M. Vološin, T. Maksymyuk, J. Zausinová, V. Gazda, D. Horváth, J. Gazda, “Techno-economic framework for dynamic operator selection in a multi-tier heterogeneous network,” *Ad Hoc Networks*, vol. 97, pp. 102007, Feb. 2020.
  - 12.Y. Liu, W. Hu, L. Han, T. Maksymyuk, Z. Chen. “A fast filling algorithm for image restoration based on contour parity,” *CMC-Computers, Materials & Continua*, vol. 63, no. 1, pp. 509–519, 2020.
  - 13.M. Khan, M. Jamali, T. Maksymyuk, J. Gazda, “A blockchain token-based trading model for secondary spectrum markets in future generation mobile networks,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, article 7975393, 2020.
  - 14.T. Maksymyuk J. Gazda, M. Volosin, G. Bugar, D. Horvath, M. Klymash, M. Dohler, "Blockchain-empowered framework for decentralized network management in 6G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 9, pp. 86-92, Sep. 2020.

**Papers in the foreign periodical journals indexed by other scientific databases:**

- 15.T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, “Study and development of next-generation optical networks,” *Smart Computing Review*, vol. 4, no. 6, pp. 470-480, 2014.
- 16.T. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy, “Designing the new backhaul for 5G heterogeneous network based on converged optical



infrastructure,” *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 4, pp. 9-13, 2017.

17.T. Maksymyuk, V. Andrushchak, S. Dumych, B. Shubyn, G. Bugar, J. Gazda, “Blockchain-based network functions virtualization for 5G network slicing,” *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 20, no. 4, pp. 54-59, 2020.

**Papers in the Ukrainian periodical journals recognized by the Ministry of Education and Science of Ukraine:**

18. O. Syrotynskyy, I. Beliaiev, T. Maksymyuk, M. Oleksin, “Information system protection against DDOS attacks based on the Markov model of the btnet behavior,” *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series “Radio Electronics and Telecommunications”*, №738, P. 192-197, 2012.

19.B. Strykhalyuk, M. Kaidan, T. Maksymyuk, V. Pashkevych, “Model of acoustooptical switch for all-optical telecommunication systems,” *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series “Radio Electronics and Telecommunications”*, №766, P. 90-95, 2013.

20.M. Klymash, O.Krasko, T. Maksymyuk, “Method of spectral-time data flows multiplexing in the optical access networks,” *Bulletin of DonNTU*, №2(27), P. 71-79, 2014.

21.M. Kaidan, S. Dumych, T. Maksymyuk, R. Burachok, L. Hotra, “Calculation of quality of service parameters in the photonic transport networks,” *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series “Radio Electronics and Telecommunications”*, №796, P. 147-156, 2014.

22.S. Dumych, D. Zhukovska, T. Maksymyuk, “Research on the traffic aggregation in the optical burst switching networks,” *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series “Radio Electronics and Telecommunications”*, №818, P. 130-136, 2015.

23.A. Bondariev, I. Maksymiv, T. Maksymyuk, “Method for the energy efficiency increasing of HQPSK signals,” *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series “Radio Electronics and Telecommunications”*, №849, P. 18-22, 2016.

- 24.M. Kaidan, M. Beshley, T. Maksymyuk, B. Strykhaliuk, “The Kerner's theory and the phase transitions in telecommunication systems,” *Bulletin of Lviv Polytechnic National University. Series “Radio Electronics and Telecommunications”*, № 909, P. 29–34, 2018.
- 25.T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, O. Yaremko, “Method for adaptive unlicensed spectrum utilization by LTE operators,” *Scientific notes of the V.I. Vernadskyy Taurida National University. Series “Technical Sciences,”* vol. 29(68), № 2, P. 58-63, 2018.
- 26.T. Maksymyuk, O. Krasko, S. Dumych, O. Yaremko, A. Varenko, “Method of data flows multiplexing in the optical network with fixed and wireless access integration,” *Scientific notes of the V.I. Vernadskyy Taurida National University, Series “Technical Sciences,”* vol. 29(68), № 3, C. 59-65,2018.
- 27.V. Andrushchak, M. Kaidan, T. Maksymyuk, S. Dumych, Yu. Pyrih, “Intelligent data flows management in the optical transport networks,” *Telecommunication and information technologies*, № 3(64), P. 4-16, 2019.
- 28.T. Maksymyuk, B. Shubyn, D. Mysakovets, V. Andrushchak, S. Dumych, “Method of adaptive logical 5G network slicing based on deep learning,” *Scientific notes of the V.I. Vernadskyy Taurida National University, Series “Technical Sciences,”* vol. 31(70), № 5, P. 36-42, 2020.
- 29.T. Maksymyuk, B. Shubyn, V. Andrushchak, S. Dumych, M. Klymash, “Method of intelligent content management in the mobile networks,” *Telecommunication and information technologies*, № 3(68), P. 15-26, 2020.

**Papers in other periodical journals :**

- 30.T. Maksymyuk, B. Shubyn, V. Andrushchak, H. Beshlei, S. Dumych, M. Klymash, «Practical implementation of the software-defined 5G network based on the Cloud-RAN and SDR technologies», *Bulletin of the Ukraine University*, №1 (24), P. 23-34, 2020.

**Papers in conference proceedings indexed by Scopus/Web of Science:**

- 31.S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko and P. Guskov, "The virtual channel parameters calculation in all-optical network," *IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, p. 88.
- 32.O. Yaremko and T. Maksymyuk, "Power control method in multiuser cellular networks," *IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, pp. 386-387.
- 33.S. Dumych, P. Guskov, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Simulation of characteristics of optical burst switched networks," *IEEE International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo)*, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 492-493.
- 34.T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Increasing of energy efficiency of a cognitive radio network," *IEEE International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo)*, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 277-278.
- 35.T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko and M. Jo, "Software defined optical switching for cloud computing transport systems," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2015, Bali, Indonesia, article #46.
- 36.B. Fekade, T. Maksymyuk and M. Jo, "A virtual server qos enhancement method in cloud computing," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2016, Da Nang, Vietnam, article #81.
- 37.T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 953-956.

- 38.A. Bondarev, I. Maksymiv and T. Maksymyuk, "Method of improving the power efficiency of QPSK signals," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 253-255.
- 39.M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," *IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 1-6.
- 40.T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash and M. Jo, "Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed and unlicensed spectrum for multi-operator 5G hetnet," *IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 315-318.
- 41.T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria and M. Jo, "An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, Jan. 2017, Beppu, Japan, article #105.
- 42.T. Maksymyuk, M. Brych, M. Klymash and M. Jo, "Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 197-200.
- 43.M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and T. Maksymyuk, "Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 209-212
- 44.T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash, M. Jo, R. Romaniuk, A. Kotyra, A. Zhanpeisova, A. Kozbekova, "Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed spectrum for multi-operator 5G hetnet," *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, vol.10445, Wilga, Poland, Aug. 2017, article #5T.

45. T. Maksymyuk, M. Brych, Yu. Klymash, M. Kyryk and M. Klymash, "Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks," *IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2017, Kharkiv, Ukraine, pp. 515-518.
46. J. Gazda, M. Volosin, E. Slapak, P. Drotar and T. Maksymyuk, "Frequency spectrum distribution dynamics: Evidence from an agent-based experimental economy mode," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1123-1126.
47. T. Maksymyuk, M. Beshley, O. Petrenko, M. Klymash and Yu. Matsevityi, "Eavesdropping-resilient wireless communication system based on modified OFDM/QAM air interface," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1127-1130.
48. H. Beshley, T. Maksymyuk, M. Beshley and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1147-1151.
49. V. Andrushchak, S. Dumych, T. Maksymyuk, M. Kaidan and O. Urikova, "Intelligent data flows management for performance improvement of optical label switched network," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1143-1146.
50. V. Andrushchak, T. Maksymyuk, D. Ageyev and M. Klymash, "Development of the ibeacon's positioning algorithm for indoor scenarios," *IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2018, Kharkiv, Ukraine, pp. 741-744.

- 51.T. Maksymyuk, J. Gazda, A. Luntovskyy and M. Klymash, "Artificial intelligence based 5G coverage design and optimization using deep generative adversarial neural networks," *IEEE International Conference on Information and Communications Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Sep. 2018, Odessa, Ukraine, pp.1-4.
- 52.J. Zausinová, J. Gazda and T. Maksymyuk, "Real-time spectrum secondary markets: Agent-based model of investment activities of heterogeneous operators," *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, Prague, April, 2018, pp. 1-6.
- 53.M. Klymash, T. Maksymyuk, S. Dumych and O. Yaremko, "Designing the industrial and environmental monitoring system based on the Internet of Things architecture," *IEEE International Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 187-190
- 54.T. Maksymyuk, J. Gazda, O. Yaremko and D. Nevinskiy, "Deep learning based massive MIMO beamforming for 5G mobile network," *IEEE International Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 241-244
- 55.E. Šlapak, J. Gazda, D. Horváth, G. Bugár, M. Vološin and T. Maksymyuk, "HetNet spatial topology design using mini-batch K-means clustering," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779242
- 56.T. Maksymyuk, L. Han, S. Larionov, B. Shubyn, A. Luntovskyy and M. Klymash, "Intelligent spectrum management in 5G mobile networks based on recurrent neural networks," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779301

- 57.T. Maksymyuk, J. Gazda, L. Han and M. Jo, "Blockchain-based intelligent network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 36-39.
- 58.B. Shubyn, T. Maksymyuk, "Intelligent handover management in 5G mobile networks based on recurrent neural networks," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 348-351.
- 59.V. Andrushchak, M. Kaidan, S. Dumych, Y. Pyrih and T. Maksymyuk, "Research on the scalability of all-optical switches in the OLS networks," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779310
- 60.T. Rosa, M. Kaidan, J. Gazda, P. Bykovyy, G. Sapozhnyk and T. Maksymyuk, "Scalable QAM modulation for physical layer security of wireless networks," *IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Sep. 2019, Metz, France, pp. 1095-1098.
- 61.E. Šlapak, J. Gazda, G. Bugár and T. Maksymyuk, "Review of cellular radio network cell placement design, from traditional to artificial intelligence based approaches," *IEEE International Symposium ELMAR*, Sep. 2019, Zadar, Croatia, pp. 93-96.
- 62.V. Andrushchak, M. Kaidan, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Smart payload management in edge nodes of optical label switching networks," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Dec. 2019, Kyiv, Ukraine, pp. 175-178.
- 63.M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "Realistic user mobility simulator for 5G communication networks," *IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, May, 2019 Timisoara, Romania, pp. 263-268.

- 64.T. Maksymyuk, J. Gazda, M. Ružička, E. Slapak, G. Bugar and L. Han, "Deep learning based mobile network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2020, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 890-893.
- 65.M. Ružička, M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "The extension of existing end-user mobility dataset based on generative adversarial networks," *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, April, 2020, Bratislava, Slovakia, DOI: 10.1109/RADIOELEKTRONIKA49387.2020.9092404.
- 66.I. V. Yatskiv, S. Kulyna, P. Bykovyy, T. Maksymyuk and A. Sachenko, "Method of reliable data storage based on redundant residue number system," *IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2020, Dortmund, DOI: 10.1109/IDAACS-SWS50031.2020.9297052.



## ЗМІСТ

ВСТУП .....	37
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ТА МОДЕЛЕЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИМИ МЕРЕЖАМИ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....	50
1.1. Сучасні тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку 5G .....	50
1.2. Трансформація мережної інфраструктури 5G для автоматизації процесів управління .....	54
1.2.1. Віртуалізація мережних функцій ядра 5G.....	54
1.2.2. Удосконалення функцій автоматизованого управління в мережах 5G... ..	59
1.2.3. Методи логічного розділення радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури 5G .....	62
1.3. Методи інтелектуального автоматизованого управління інфраструктурою та процесом функціонування мереж мобільного зв'язку.....	65
1.3.1. Методи аналізу великих обсягів даних в мережах мобільного зв'язку .. ..	65
1.3.2. Особливості аналізу даних на мережному рівні.....	67
1.3.3. Використання елементів штучного інтелекту для аналізу даних на рівні прикладних застосувань .....	70
1.3.4. Методи прогнозування переміщення абонентів у мережах мобільного зв'язку з використанням штучного інтелекту .....	71
1.3.5. Методи просторового позиціонування кінцевих пристроїв на основі інтелектуального аналізу сигналів .....	73
1.3.6. Технології управління мережною інфраструктурою на основі елементів штучного інтелекту .....	74
1.4. Методи інтеграції технології блокчейн у мережну інфраструктуру для децентралізації процесу її функціонування.....	77
1.4.1. Основні принципи функціонування технології блокчейн .....	77
1.4.2. Методи інтеграції технології блокчейн у системи хмарних обчислень.. ..	81

1.4.3. Методи інтеграція технології блокчейн в інфраструктуру граничних обчислень .....	84
1.4.4. Децентралізація процесу управління мережною інфраструктурою з використання технології програмно-конфігурованих мереж.....	86
1.4.5. Моделі децентралізованого управління віртуалізованими мережними функціями з використанням технології блокчейн .....	87
1.4.6. Методи децентралізованого управління ресурсами між віртуалізованими слайсами у мережах 5G .....	90
1.5. Систематизація основних нерозв'язаних завдань для синтезу децентралізованої інфраструктури мереж мобільного зв'язку 5G/6G .....	92
1.6. Висновки до 1-го розділу. ....	98
<b>РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ПОВУДОВИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ АВТОМАТИЗОВАНИМ УПРАВЛІННЯМ.....</b>	
<b>99</b>	
2.1. Структурно-функціональна модель мультиоператорної мережі мобільного зв'язку з автоматизованим децентралізованим управлінням .....	99
2.1.1. Соціально-технологічні аспекти формування інформаційних сервісів та відповідних їм вимог в площині абонентів.....	101
2.1.2. Принципи побудови та функціонування децентралізованої програмованої мережі мобільного зв'язку в площині інфраструктури.....	109
2.1.3. Нові бізнес-моделі побудови мереж мобільного зв'язку у площині операторів.....	115
2.2. Розроблення моделей та засобів децентралізованого управління мережами мобільного зв'язку .....	120
2.2.1. Інтеграція засобів технології блокчейн в системи управління децентралізованими мережами мобільного зв'язку .....	120
2.2.2. Розроблення техніко-економічної моделі децентралізованої мультиоператорної мережі мобільного зв'язку .....	123
2.2.3. Розроблення моделі токенизації радіочастотних та інфраструктурних ресурсів мережі.....	128

2.3. Методи автоматизованого управління децентралізованою мережною інфраструктурою мережі мобільного зв'язку з використанням смарт-контрактів .....	132
2.3.1. Розроблення платформи для управління смарт-контрактами в мережах мобільного зв'язку .....	132
2.3.2. Розроблення спеціалізованих смарт-контрактів для реалізації функцій децентралізованого управління в мережах мобільного зв'язку .....	137
2.4. Розроблення методу адаптивного вибору оператора в режимі реального часу в децентралізованих мережах мобільного зв'язку .....	143
2.5. Моделі функціонування децентралізованої мережі мобільного зв'язку в площині інтелектуального управління .....	150
2.5.1. Модель системи інтелектуального управління мережею мобільного зв'язку .....	150
2.5.2. Система децентралізованого краудсорсингового моніторингу параметрів мережі мобільного зв'язку.....	154
2.6. Удосконалений алгоритм аналізу просторових характеристик мережі мобільного зв'язку .....	159
2.6.1. Алгоритм декомпозиції зон моніторингу мережі мобільного зв'язку для підвищення ефективності просторового аналізу даних .....	159
2.6.2. Алгоритм відновлення даних із розріджених масивів результатів моніторингу.....	161
2.6.3. Імітаційне моделювання процесу відновлення даних моніторингу..	167
2.7. Висновки до 2-го розділу .....	169
<b>РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ СИНТЕЗУ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ФІЗИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ .....</b>	<b>171</b>
3.1. Проблема структурно-функціонального синтезу площини рівня радіодоступу .....	171
3.2. Розроблення алгоритму моделювання мобільності абонентів з використанням генеративно-змагальних нейронних мереж .....	172

3.3. Метод інтелектуального децентралізованого синтезу покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена .....	186
3.3.1. Проблема синтезу коміркових структур з урахуванням територіальних та інфраструктурних обмежень .....	186
3.3.2. Алгоритм синтезу коміркової структури на основі самоорганізованих карт .....	188
3.3.3. Алгоритм синтезу коміркової структури на основі кластеризації К-середніх .....	193
3.3.4. Формалізація показників ефективності функціонування фізичної топологічної структури мережі мобільного зв'язку .....	196
3.4. Розроблення просторової імітаційної реальної фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку .....	198
3.4.1. Побудова віртуальної моделі середовища з міською забудовою та багатопроблемним поширенням хвиль .....	198
3.4.2. Дослідження впливу конфігурації антен на процес синтезу мережної інфраструктури .....	202
3.4.3. Аналіз результатів моделювання алгоритмів синтезу топологічної структури.....	207
3.5. Висновки до 3-го розділу .....	209
<b>РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РАДІОЧАСТОТНИМИ РЕСУРСАМИ В МУЛЬТИОПЕРАТОРНИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....</b>	<b>211</b>
4.1. Проблематика спільного використання радіочастотного ресурсу в децентралізованих мережах мобільного зв'язку.....	211
4.2. Розроблення моделі спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в децентралізованих мережах мобільного зв'язку .....	212
4.2.1. Обґрунтування техніко-економічної моделі функціонування мультиоператорної мережі мобільного зв'язку .....	212
4.2.2. Розроблення технічної моделі децентралізованої мультиоператорної мережі мобільного зв'язку .....	214

4.2.3. Розроблення економічної моделі децентралізованої мультиоператорної мережі мобільного зв'язку .....	219
4.3. Дослідження техніко-економічної ефективності децентралізованої мережі мобільного зв'язку при спільному використанні ліцензійного радіочастотного ресурсу .....	224
4.3.1. Параметри та характеристики процесу моделювання .....	224
4.3.2. Експериментальні дослідження та аналіз техніко-економічної ефективності децентралізованих мереж мобільного зв'язку.....	229
4.4. Моделі та алгоритми спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку	237
4.4.1. Проблематика використання радіочастотного ресурсу неліцензійного діапазону для мереж мобільного зв'язку .....	237
4.4.2. Розроблення алгоритму координованого прослуховування частотних каналів у неліцензійному діапазоні.....	239
4.4.3. Розроблення моделі спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу в децентралізованих мережах мобільного зв'язку ...	249
4.5. Розроблення модифікованого методу інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в децентралізованих мережах мобільного зв'язку..	255
4.5.1. Формалізація проблеми управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку.....	255
4.5.2. Удосконалений метод інтелектуального прогнозування інформаційних потоків у децентралізованих мережах мобільного зв'язку.....	257
4.5.3. Удосконалений метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом у децентралізованих мережах мобільного зв'язку.....	260
4.6. Висновки до 4-го розділу .....	269
<b>РОЗДІЛ 5. МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ НАСКРІЗНОГО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПОТОКАМИ В РОЗПОДІЛЕНІЙ ТРАНСПОРТНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ.....</b>	<b>271</b>
5.1. Проблема наскрiзного управління інформаційними потоками в національному масштабі .....	271

5.2. Розроблення методу інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу .....	275
5.2.1. Модель інтеграції децентралізованих систем мобільного зв'язку в рамках інфраструктури розподілених оптичних мереж доступу.....	275
5.2.2. Методи та моделі мультиплексування потоків мереж мобільного зв'язку в розподілених оптичних мережах доступу.....	277
5.2.3. Удосконалений метод інтелектуального прогнозування потоків в розподіленій оптичній інфраструктурі децентралізованих систем мобільного зв'язку .....	283
5.2.4. Метод інтелектуального розподілу ресурсів в оптичних мережах доступу .....	287
5.2.5. Алгоритм мультиплексування інформаційних потоків в оптичній мережі доступу при здійсненні хендоверу .....	293
5.3. Алгоритм персоналізованого кешування контенту з використанням обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв.....	297
5.4. Розроблення методу інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі .....	300
5.4.1. Класифікація параметрів якості сервісу для наскрізного управління інформаційними потоками.....	300
5.4.2. Архітектура та принцип функціонування оптичної транспортної інфраструктури з комутацією блоків.....	303
5.4.3. Метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі.....	305
5.5. Висновки до 5-го розділу .....	311
<b>РОЗДІЛ 6. МЕТОДОЛОГІЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ СИНТЕЗУ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ .....</b>	<b>312</b>
6.1. Перспективні моделі розгортання децентралізованих мереж мобільного зв'язку приватними організаціями та мікро-операторами.....	312
6.2. Розроблення прототипу децентралізованої мережі мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням.....	319

6.2.1. Загальна архітектура розробленого прототипу мережі мобільного зв'язку .....	319
6.2.2. Практична реалізація системи інтелектуального управління децентралізованою інфраструктурою мережі мобільного зв'язку .....	320
6.2.3. Розроблення системи автоматизованого управління віртуалізованою мережною інфраструктурою на основі архітектури SDN.....	323
6.2.4. Практична реалізація смарт-контрактів на основі інфраструктури блокчейн.....	326
6.3. Правові аспекти використання смарт-контрактів та технології блокчейн в системах децентралізованого управління мережною інфраструктурою.....	329
6.4. Методологія синтезу та інтеграції децентралізованих систем мобільного зв'язку в рамках національної інформаційно-комунікаційної інфраструктури	332
6.5. Висновки до 6-го розділу .....	335
ВИСНОВКИ.....	336
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	341
ДОДАТОК А. ОПИС ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОТОТИПУ СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ УПРАВЛІННЯМ .....	381
А.1. Розроблення фізичної моделі децентралізованої мережі мобільного зв'язку .....	381
А.2. Розроблення системи інтелектуального автоматизованого управління децентралізованою мережею мобільного зв'язку.....	390
ДОДАТОК Б. ОПИС ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СМАРТ-КОНТРАКТІВ У БЛОКЧЕЙНІ ETHEREUM .....	401
ДОДАТОК В. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ.....	414
ДОДАТОК Г. СПИСОК ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА .....	423

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

- ERC** (Ethereum Request for Comments) – *стандарт токенизації у блокчейні Ethereum;*
- LTE** (Long-Term Evolution) – *стандарт мобільного зв'язку 4G;*
- USRP** (Universal Software Radio Peripheral) – *програмований радіомодуль;*
- D2D** (Device-to-Device) – *зв'язок між абонентськими пристроями;*
- SLA** (Service Level Agreement) – *угода про рівень якості обслуговування;*
- HTTP** (Hyper Text Transfer Protocol) – *протокол прикладного рівня;*
- MQTT** (Message Queue Telemetry Transfer) – *протокол телеметрії;*
- НКРЗІ** – *Національна комісія, що здійснює державне регулювання в сфері зв'язку та інформатизації;*
- LRRT** (Licensed Radio Resource Token) – *токен ліцензійного радіочастотного ресурсу;*
- URRT** (Unlicensed Radio Resource Token) – *токен неліцензійного радіочастотного ресурсу;*
- IRT** (Infrastructure Resource Token) – *токен інфраструктурного ресурсу;*
- CBDC** (Central Bank Digital Currency) – *національна криптовалюта;*
- 3GPP** (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) – *консорціум стандартизації мереж мобільного зв'язку;*
- RSRP** (Reference Signal Received Power) – *потужність прийнятого сигналу;*
- gNB/eNB** – *базові станції мереж 5G/4G;*
- 5QI** (5G Quality Identifier) – *ідентифікатор якості сервісу в мережах 5G;*
- API** (Application Programming Interface) – *прикладний програмний інтерфейс;*
- UI** (User Interface) – *інтерфейс користувача;*
- GAN** (Generative Adversarial Networks) – *генеративно-змагальна мережа;*
- LSTM** (Long-Short Term Memory) – *рекурентна нейронна мережа;*
- CNN** (Convolutional Neural Network) – *згорткова нейронна мережа;*
- SOM** (Self-Organizing Maps) – *самоорганізовані карти Кохонена;*
- SINR** (Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio) – *співвідношення сигнал/шум;*
- 5GC** (5G Core)/**vEPC** (Virtual Evolved Packet Core) – *ядро мережі 5G/LTE;*
- DSCP** (DiffServ Code Point) – *ідентифікатор класу сервісу в мережах IP.*



## ВСТУП

### Актуальність теми

Розвиток мереж 5G започаткував нову еру інформатизації суспільства, з широким впровадженням інформаційних сервісів в різні сфери життєдіяльності та повсюдним їх використанням на основі розподіленої гетерогенної мережної інфраструктури. Подальший розвиток мереж мобільного зв'язку в напрямку стандартів 6G характеризуватиметься ще вищим ступенем гетерогенності телекомунікаційної інфраструктури та більш широким прикладним застосуванням. Зокрема, повсюдне використання технологій штучного інтелекту, сервісів змішаної реальності та тактильного Інтернету, стане масовим та звичним сценарієм активності абонентів, що спричинить стрімке зростання обсягів даних, які необхідно миттєво передавати між різноманітними кінцевими пристроями. Це неодмінно призведе до розширення мережної інфраструктури та появи невідомих раніше технологій та засобів мобільного зв'язку, що суттєво підвищить складність управління мережною інфраструктурою для операторів в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу. Існуючі нормативні обмеження фрагментації та ліцензування радіочастотного ресурсу в Україні та світі передбачають централізований продаж ліцензій в національному масштабі, що потребує значних фінансових інвестицій з боку операторів на побудову мережної інфраструктури по всій території держави. Враховуючи порівняно низький середній прибуток з одного абонента в Україні, при аналогічній вартості інфраструктури, оператори не в змозі підтримувати високі темпи модернізації мережі.

Тому, в короткостроковій перспективі, поточна централізована модель побудови та експлуатації мережної інфраструктури неминуче зміниться на більш гнучку децентралізовану модель із відкритим ринком радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури. Децентралізована модель стимулюватиме появу великої кількості мікро-операторів, які будуть вузько-орієнтованими на вирішення певних потреб економіки та суспільства. Проте, така модель потребує механізмів довіреного децентралізованого управління, які б дали

змогу незалежно координувати використання радіочастотного ресурсу для територіально рознесених зон покриття. Зокрема, на сьогоднішній час, немає методів ліцензування радіочастотних ресурсів з поділом на окремі територіальні зони, які б дали змогу операторам розгортати регіональні мережі мобільного зв'язку в окремих містах, районах чи областях із значно меншими капітальними та експлуатаційними витратами.

З іншого боку, децентралізована модель ускладнює процес управління мережною інфраструктурою та радіочастотним ресурсом, оскільки виникає необхідність узгодження конфігурацій між великою кількістю операторів. Децентралізація систем мобільного зв'язку створює ряд викликів, які не характерні для існуючих централізованих мереж. Зокрема, існує невизначеність з точки зору мобільності абонентів між мережами мікро-операторів, враховуючи їх обмежені зони обслуговування. Динамічна зміна мережі оператора ускладнює процедуру тарифікації та забезпечення якості обслуговування для абонента. Крім того, в централізованій моделі, оператори незалежно здійснюють синтез власної коміркової інфраструктури в рознесених частотних діапазонах. При децентралізованій моделі, усі оператори повинні координовано синтезувати фізичну коміркову інфраструктуру як одне ціле, що потребує удосконалення існуючих підходів. Також постає питання узгодження даних моніторингу мережної інфраструктури між операторами з точки зору основних показників ефективності функціонування мережі для забезпечення ефективного навчання алгоритмів управління на основі штучного інтелекту. Крім того, на сьогоднішній час немає механізмів наскрізного управління інформаційними потоками із забезпеченням вимог до якості обслуговування при передаванні трафіку різних операторів у межах єдиної транспортної мережної інфраструктури.

Таким чином, в сучасних умовах розвитку мереж мобільного зв'язку виникає **протиріччя** між потребою у *централізованій моделі* управління інфраструктурою та радіочастотними ресурсами в мережі мобільного зв'язку на основі штучного інтелекту, для забезпечення її ефективності за множиною

*технічних* показників та потребою у *децентралізованій моделі* гнучкого розгортання мереж мобільного зв'язку в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури, для забезпечення її ефективності за множиною *економічних* показників.

Розв'язок даного протиріччя потребує створення нової концепції побудови децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка інтегрує методи та засоби штучного інтелекту із інфраструктурою блокчейн, що дасть змогу поєднати переваги централізованої та децентралізованої моделей побудови мережної інфраструктури, усуваючи при цьому їх характерні недоліки та обмеження.

Проблематика побудови децентралізованих гетерогенних мереж фіксованого та мобільного зв'язку широко досліджувалася у роботах провідних українських та зарубіжних вчених як М.М. Климаш, Л.Н. Беркман, С.В. Толюпа, С.І. Отрох, Р.Л. Політанський, С.В. Гаркуша, Р.С. Одарченко, І.П. Лісовий, В.М. Безрук, О.В. Лемешко, Л.С. Глоба, А.І. Семенко, В.О. Пелішок, M. Dohler, J. Gazda, L. Hanzo, M. Bennis, M. Matinmikko-Blue, P. Ahokangas, M. Jo, X. Ge, A. Luntovskyy, R. Tafazolli, T. Taleb, A. de Almeida, W. Chien, S. Kiyomoto, K. Letaief, Y. Dai, Y. Zhang, V. Sharma, D. Niyato та багатьма іншими.

Аналіз напрацювань вітчизняних та зарубіжних учених підтверджує актуальність тематики досліджень та вказує, що проблема інтелектуального автоматизованого управління децентралізованими системами мобільного зв'язку 5G/6G є актуальною в Україні та за її межами, і може бути вирішена шляхом розроблення сукупності методів управління автоматизованою мережною інфраструктурою на основі штучного інтелекту у поєднанні із смарт-контрактами на основі технології блокчейн, що в комплексі дасть змогу підвищити техніко-економічну ефективність децентралізованих систем мобільного зв'язку в національному масштабі.

Сукупність вищенаведених аспектів можна узагальнити в цілісну **науково-прикладну проблему** розроблення методів, моделей та засобів інтелектуального управління децентралізованою мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку, з метою підвищення її техніко-

економічної ефективності для операторів та абонентів, в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами**

Дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт «Методи побудови та моделі інформаційно – телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN – технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN), (2015-2016), № держреєстрації 0115U000444; «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U004449; «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (2017–2019 рр.), № держреєстрації 0117U007177; «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» (ДБ/Блокчейн), (2020–2022 рр.), № держреєстрації 0120U100674; «Розроблення та інтеграція інформаційних і комунікаційних технологій для побудови системи моніторингу та управління міською інфраструктурою» (ДБ/Smart City), (2020–2022 рр.), № держреєстрації 0120U102193; науково-дослідних робіт Національного дослідницького фонду Республіки Корея «High Energy Efficient D2D Assisted 5G Cellular Network», (2016-2017), № реєстрації 2016K1A3A1A20006024; «Dual Subframe/SDN-based MAC Protocols for LTE-U and Resource Sharing Modelling in Coexistence with Small Cells», (2016-2017), № реєстрації 2016R1D1A1B03932149; «IoT System for Improvement of Living Conditions based on Sensitive and Psychological Analytics», (2016-2017), № реєстрації 2016M3C1B6929221; а також науково-дослідних робіт Словацького агентства досліджень та розвитку № реєстрації APVV-18-0214 та APVV-18-0368.

### **Мета і завдання дослідження**

Метою представленої дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування мультиоператорних мереж мобільного зв'язку за множиною

технічних та економічних критеріїв, в умовах децентралізованого розгортання інфраструктури, відкритого ринку радіочастотного ресурсу та адаптивного обслуговування абонентів без прив'язки до оператора.

В межах дисертаційних досліджень були сформульовані та розв'язані наступні завдання:

1. Аналіз існуючих методів та моделей управління гетерогенною мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку з використанням елементів штучного інтелекту.
2. Розроблення структурно-функціональної моделі децентралізованої мережі мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням на основі технології блокчейн та штучного інтелекту.
3. Розроблення системи децентралізованого моніторингу мережі мобільного зв'язку для навчання алгоритмів штучного інтелекту в умовах екзогенних та ендогенних змін в мережі.
4. Розроблення моделі токенизації активів радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури в цифровому представленні для децентралізованого обміну у мережі блокчейн.
5. Розроблення методу адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу за техніко-економічними критеріями.
6. Розроблення алгоритму моделювання мобільності абонентів з урахуванням інфраструктури середовища та індивідуальних атрибутів абонентів.
7. Розроблення методу децентралізованого інтелектуального синтезу топологічної структури мультиоператорної мережі мобільного зв'язку.
8. Розроблення моделі спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу операторами за правилами відкритого ринку.
9. Розроблення моделі спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу операторами з автоматизованим уникненням інтерференційних завад.
10. Розроблення методу інтелектуального управління ресурсами в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку.

11. Розроблення методів інтелектуального управління інформаційними потоками в транспортній мережній інфраструктурі для наскрізного забезпечення якості надання сервісів.
12. Розроблення прототипу децентралізованої мережі мобільного зв'язку з автоматизованим управлінням на основі штучного інтелекту та технології блокчейн.

**Об'єктом дослідження** в дисертації є процес інтелектуального управління децентралізованими мультиоператорними системами мобільного зв'язку.

**Предметом дослідження** є методи, моделі та алгоритми децентралізованого управління мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку.

**Методи дослідження.** В процесі досліджень використано методи теорії ймовірності та математичної статистики, методи та засоби штучного інтелекту, методи оптимізації, фундаментальні основи систем безпроводного зв'язку, елементи теорії ігор, основи ринкової економіки, основи правового регулювання радіочастотного ресурсу, теоретичні та практичні аспекти розподілених реєстрів, методи аналітичного, імітаційного і натурального моделювання.

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

1. *Вперше запропоновано* структурно-функціональну модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка базується на відокремленні площини абонентів, площини мережної інфраструктури, площини операторів, площини децентралізації та площини інтелектуального управління, що дає змогу операторам автоматизовано координувати процес спільного використання мережної інфраструктури, на основі смарт-контрактів, токенизації активів та методів штучного інтелекту.

2. *Вперше запропоновано* метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу на основі інтегральної функції корисності абонента, який забезпечує повсюдне обслуговування на основі публічного

ключа у мережі блокчейн, що дає змогу покращити співвідношення між якістю та вартістю сервісу для абонентів та підвищити прибутки операторів.

3. **Набув подальшого розвитку** метод проектування покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена, який, на відміну від існуючих, використовує метрику співвідношення сигнал/шум для врахування просторових характеристик зони покриття, а також фіксовані вагові коефіцієнти для існуючих базових станцій, що дає змогу операторам децентралізовано синтезувати квазі-оптимальну топологічну структуру за множиною критеріїв ефективності, шляхом врахування статистичних даних переміщення абонентів.

4. **Вперше запропоновано** модель спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку, яка базується на торгівлі токенизованими активами радіочастотного ресурсу на основі смарт-контрактів та теорії ігор, що дає змогу підвищити середню пропускну здатність та знизити кількість відмов в обслуговуванні для абонентів, а також забезпечити прозорий розподіл ресурсів між операторами за правилами ринкової економіки, в залежності від запитів кінцевих абонентів.

5. **Вперше запропоновано** модель спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу операторами мобільного зв'язку на основі смарт-контрактів та кооперативної теорії ігор, що дає змогу забезпечити автоматизований справедливий розподіл ресурсів між операторами.

6. **Набув подальшого розвитку** метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку, який на відміну від відомих, використовує прогнозування часових характеристик трафіку окремих типів сервісу з використанням глибоких рекурентних нейронних мереж, що дає змогу підвищити якість обслуговування абонентів та прибутки операторів за рахунок попереднього резервування радіочастотного ресурсу.

7. **Набув подальшого розвитку** метод інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу, який на відміну від

відомих, враховує взаємозв'язок між інтенсивністю трафіку в сусідніх сегментах мережі мобільного зв'язку, що дає змогу підвищити ефективність управління потоками в децентралізованих мережах мобільного зв'язку в умовах впливу екзогенних факторів.

8. *Набув подальшого розвитку* метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі, який на відміну від відомих, забезпечує узгоджене диференціювання інформаційних потоків з різними вимогами до якості сервісу на основі штучного інтелекту, що дало змогу забезпечити наскрізне управління інформаційними потоками в децентралізованих системах мобільного зв'язку національного масштабу.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у можливості їх безпосереднього застосування для підвищення техніко-економічної ефективності існуючих мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління, а також для розвитку подальших технологій та стандартів мереж мобільного зв'язку в Україні та світі. Зокрема:

1. Розроблено систему децентралізованого краудсорсингового моніторингу просторових характеристик мережі мобільного зв'язку, яка працює на основі асинхронних протоколів Інтернету речей, що дає змогу забезпечити операторам гнучкий процес збору даних із статистичною повнотою інформації для аналітичних засобів машинного навчання, не створюючи при цьому надлишкове використання ресурсів.

2. Запропоновано модель токенизації радіочастотного та інфраструктурного ресурсу на основі стандарту ERC 721, яка дає змогу оцифрувати мережні активи операторів або сторонніх стейкхолдерів з метою їх обміну, шляхом фінансових транзакцій у мережі блокчейн, що забезпечує підвищення середньої пропускної здатності для абонентів до 30% та зменшення кількості відмов в обслуговуванні до 14%, в умовах спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу.

3. Розроблено децентралізовану блокчейн-платформу для управління смарт-контрактами, яка дає змогу підвищити пропускну здатність для абонентів до



11% при незмінній вартості сервісу та збільшити прибутки операторів до 27%, при використанні адаптивного вибору оператора в режимі реального часу.

4. Запропоновано алгоритм моделювання мобільності абонентів, який використовує генеративно-змагальні нейронні мережі у поєднанні із технологіями геоінформаційних систем, що дає змогу підвищити системну спектральну ефективність мережі мобільного зв'язку на 7%, за рахунок оцінювання просторово-часових статистичних характеристик трафіку, на етапі її синтезу, з урахуванням існуючої інфраструктури середовища та індивідуальних атрибутів кінцевих абонентів.

5. Розроблено імітаційну модель фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку, яка враховує тривимірну копію місцевості на основі геоінформаційної системи OpenStreetMaps та реальне розташування базових станцій на основі OpenCellID, що дає змогу на 20% підвищити ймовірність обслуговування абонентів із прийнятним співвідношенням сигнал/шум за рахунок моделювання характеристик просторового поширення сигналу, на етапі синтезу складних топологічних структур з багатопроменевим поширенням хвиль.

6. Розроблено алгоритм координованого прослуховування частотних каналів у неліцензійному діапазоні, який полягає у формуванні окремих груп абонентів з унікальними дискретними інтервалами прослуховування, що дає змогу знизити ймовірність одночасного передавання даних абонентами від 5 до 30%, і відповідно підвищити середні значення пропускної здатності для абонентів до 35%.

7. Розроблено алгоритм прогнозування часових характеристик трафіку з використанням рекурентних нейронних мереж, який дає змогу досягти виграшу у ефективності використання радіочастотних ресурсів мережі мобільного зв'язку, що забезпечує підвищення середньої пропускної здатності для абонентів до 7% та збільшення прибутків операторів до 19%, в умовах спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу.

8. Розроблено алгоритм мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу при здійсненні хендоверу, який дає змогу знизити обсяг надлишкового службового трафіку до 20% за рахунок прогнозування переміщення абонентів та проактивної маршрутизації трафіку.

9. Розроблено алгоритм кешування контенту з використанням обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв, який використовує передбачення запитів абонента, шляхом аналізу його активності у соціальних мережах, що дає змогу забезпечити максимальну якість сприйняття мультимедійного контенту за рахунок зниження затримки його доставки, а також зменшення вимоги до пропускної здатності радіоканалу до 70%, в момент запиту контенту абонентом.

10. Розроблено прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку з використанням програмно-конфігурованих базових станцій стандартів LTE та 5G на основі універсальних програмно-апаратних платформ NI USRP 2900, віртуалізованих мікросервісів ядра мереж 4G та 5G на основі платформи Raspberry Pi, тестової блокчейн інфраструктури Ethereum та системи інтелектуального управління на основі хмарної інфраструктури Google Cloud.

Основні результати роботи використані та впроваджені:

– у ПАТ «УкрТелеком» та ТзОВ ВТФ «Контех» – для прогнозування часових характеристик трафіку телекомунікаційної мережі та адаптивного резервування ресурсів;

– у ТОВ «Сайпрес Семікондактор Україна» – для моделювання мобільності абонентів та інтелектуального управління діаграмою спрямованості фазованих антенних решіток;

– у ТОВ «ІнформКонсалт» – для тестування прототипу приватної мережі мобільного зв'язку на основі програмно апаратних платформ NI USRP 2900;

– у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія» – для моніторингу показників ефективності функціонування телекомунікаційної мережі;

– у ТзОВ «МаксіТех» – для координації процесу розгортання мережної інфраструктури;

– у ТОВ «KeenEthics» – для тестування смарт-контрактів в інфраструктурі блокчейн;

– у навчальному процесі кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» для розроблення курсів лекцій з дисциплін «Технології мереж мобільного зв'язку» та «Проектування програмно-апаратних підсистем інформаційних систем».

**Особистий внесок здобувача.** Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях опублікованих у співавторстві авторів належать: у роботах [1,43,48,83] – розроблення методів та моделей побудови гетерогенної інфраструктури мережі мобільного зв'язку, [4, 12, 18, 23, 36,60,66,70,79,82] – розроблення імітаційної моделі, [9,37,39] – структурно-функціональні моделі децентралізованої мережі мобільного зв'язку, [11] – метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу на основі інтегральної функції корисності абонента, [6,55,61] – метод децентралізованого синтезу покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена, [44,46,52] – модель спільного використання ліцензійних радіочастотних ресурсів в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку, [25,40,45,57,72] – модель спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мобільного зв'язку на основі теорії ігор, [17,56,86] – метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку, [20,26,49,62,67] – метод інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу, [15,19,21,22,24,27,31,33,35,59,68,71,77,78,80,81,84,85] – методи та моделі інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі, [7,41,53] – система децентралізованого моніторингу на основі асинхронних протоколів Інтернету речей, [50, 51, 63, 64, 65] – алгоритм моделювання мобільності абонентів на основі генеративно-змагальних нейронних мереж, [2, 3, 10, 32, 34, 38,47,54,69,73,74,75,76] – імітаційна модель фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку, [13] – модель токенизації радіочастотного та інфраструктурного ресурсу, [14,17] –

децентралізована блокчейн-платформа для управління смарт-контрактами, [28,58] – алгоритм прогнозування часових характеристик трафіку з використанням рекурентних нейронних мереж, [5,42] – алгоритм координованого прослуховування частотних каналів у неліцензійному діапазоні, [16] – алгоритм мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу при здійсненні хендоверу, [8,29] – алгоритм кешування контенту з використанням обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв, [30] – прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку.

**Апробація результатів дисертації.** Основні наукові результати і положення дисертаційної роботи представлялися та були обговорені на міжнародних та всеукраїнських науково–технічних конференціях: IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (Україна, Поляна 2013, 2015, 2019); IEEE International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (Україна, Севастополь, 2013); ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (Індонезія, Балі – 2015, В'єтнам, Да Нанг – 2016, Японія, Беппу – 2017); IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (Україна, Славське–Львів, 2014, 2016); IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (Україна, Київ – 2016, Одеса – 2018); IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (Україна, Львів, 2017, 2019); Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, (Польща, Вільга, 2017); IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (Україна, Харків, 2017, 2018); IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (Україна, Славське–Львів, 2018, 2020); IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (Україна, Львів – 2018, Франція, Метц – 2019, Німеччина, Дортмунд – 2020); IEEE International Symposium ELMAR (Хорватія, Задар,

2019); IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (Україна, Київ, 2019); IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (Румунія, Тімішоара, 2019); IEEE International Conference Radioelektronika (Словаччина, Братислава, 2020); Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій (Україна, Запоріжжя, 2016); Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій (Львів, 2012, 2013, 2014); Computer Science & Engineering (Львів, 2013), Нові технології в телекомунікаціях (Вишків, 2013); Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення (Житомир, 2012); Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (Лівадія, 2012); Наукоємні технології в інфокомунікаціях (Україна, Кам'янець-Подільський, 2019); 17-й Міжнародний радіоелектронний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ столітті» (Україна, Харків, 2013); Інфокомунікації – сучасність та майбутнє (Україна, Одеса, 2013).

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 86 наукових праць, серед яких: 1 монографія [1], 1 патент [2], 12 статей у закордонних періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз Scopus/Web of Science [3-14], 3 статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до інших міжнародних наукометричних [15-17], 12 статей у фахових періодичних виданнях України [18-29], 1 стаття у іншому періодичному виданні [30], 34 тези доповідей на міжнародних конференціях, які індексуються наукометричними базами Scopus/Web of Science [31-66] та 20 тез доповідей на інших конференціях [67-86].

**Структура та обсяг роботи.** Робота складається з переліку умовних скорочень, вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і 4 додатків. Загальний обсяг роботи складає 435 сторінок друкарського тексту, із них 13 сторінок вступу, 304 сторінки основного тексту, 170 рисунків, 16 таблиць, список використаних джерел із 336 найменувань. Додатки містять опис розробленого програмного забезпечення, акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список праць автора.

# **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ЗАСОБІВ ТА МОДЕЛЕЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИМИ МЕРЕЖАМИ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

## **1.1. Сучасні тенденції розвитку мереж мобільного зв'язку 5G**

В сучасному інформаційному світі, дані є головним активом, який дає змогу підвищити ефективність функціонування економічної, соціальної та суспільно-політичної сфер державного управління. Поточна концепція розвитку цифрової економіки та суспільства України потребує комплексного підходу до модернізації існуючої інформаційно-комунікаційної інфраструктури в масштабах держави. Враховуючи попередній досвід та нові виклики пов'язані із пандемією COVID-19, завдання цифрової трансформації та інформатизації держави стає дедалі більш актуальним для покращення якості життя, розвитку економіки та стабільності державного управління в умовах кризових ситуацій. Зокрема, важливим аспектом є забезпечення рівного доступу громадян до інформації, знань та послуг, що потребує розбудови сучасних мереж фіксованого та мобільного зв'язку із забезпеченням всеосяжного широкосмугового доступу до мережі Інтернет.

На відміну від існуючих мереж 4G LTE, які головним чином орієнтовані на сегмент B2C (Business-to-Customer), і оптимізовані під роботу смартфонів, мережі 5G забезпечують не лише надвисоку пропускну здатність понад 1 Гбіт/с для сервісів eMBB (Enhanced Mobile Broadband), але і наднизьку затримку (кілька мс) для сервісів реального часу uRLLC (Ultra-Reliable Low Latency Communications) та надвисоку густину підключення ( $10^6$  пристроїв/км<sup>2</sup>) для сервісів mMTC (Massive Machine Type Communications) [1-3].

Для поєднання сервісів з різними вимогами до характеристик системи зв'язку, мережі 5G використовують принцип логічного розділення мережі (Network Slicing), який полягає у створенні кількох мережних слайсів поверх єдиної фізичної інфраструктури мережі [4-7]. Таким чином, архітектура 5G є адаптованою до створення окремих приватних мереж, для кожного окремого застосування з спеціальними характеристиками зв'язку (AR/VR, автономний

транспорт, індустріальні системи Інтернет речей, тощо) [8,9]. Таким чином, 5G може швидко та динамічно надавати послуги оптимізовані для корпоративного бізнесу, використовуючи граничні обчислення, що дає змогу забезпечити низьку затримку та високу надійність зв'язку [10].

Крім того, у мережах 5G суттєво зростає роль алгоритмів автоматизації та інтелектуального управління. Ускладнення та ущільнення інфраструктури мережі радіодоступу (RAN – Radio Access Network) призводить до зростання кількості ступенів свободи для конфігурації мережі з токи зору надання різних сервісів [11]. Однак більша кількість ступенів свободи спричиняє вищу складність управління процесом функціонування мережної інфраструктури, у зв'язку із зростанням кількості взаємопов'язаних параметрів [12].

Зростання кількості ступенів свободи ускладнює використання класичних аналітичних методів оптимізації, оскільки більшість оптимізаційних задач в управлінні гетерогенною інфраструктурою мережі мобільного зв'язку є NP-складними з точки зору обчислень [13]. Розвиток алгоритмів обробки великих даних та методів штучного інтелекту дав поштовх для нового напрямку наукових досліджень, який пов'язаний із інтелектуальними методами оптимізації мережної інфраструктури [14]. Інтелектуальні методи використовують методологію спроб і помилок для пошуку кращих рішень, шляхом вивчення закономірностей певних характеристик мережі мобільного зв'язку. Таким чином, найсучасніші досягнення машинного навчання та штучного інтелекту показують перспективу даних методів для інтелектуального управління мережною інфраструктурою [15-18].

Застосування машинного навчання може зменшити потребу втручання людини в процес управління мережею, оскільки інтелектуальні методи можуть автоматизовано приймати багато важливих рішень, базуючись на поточних та історичних даних про поведінку мережі [19-20]. Очікується, що технології нейронних мереж досягнуть значно більших можливостей у найближчому майбутньому, враховуючи їх поточну динаміку розвитку. Однак, тепер постає інше важливе завдання, яке полягає у переосмисленні поточної концепції

побудови мережі мобільного зв'язку, щоб забезпечити готовність мережної інфраструктури до майбутніх змін [21]. Нижче наведено ряд важливих технологій для мереж радіодоступу, які мають перспективу значно вищої ефективності при їх поєднанні з елементами штучного інтелекту.

*Дистанційне керування потужністю* дає змогу віддалено змінювати потужність передавачів на базовій станції, для того щоб регулювати радіус її дії та здійснювати координацію інтерференційних завад [22-25]. Крім того, мікрокомірка може бути увімкнена/вимкнена віддалено, щоб заощадити енергію та зменшити експлуатаційні витрати [24]. Такі можливості дають змогу динамічно адаптувати покриття мережі враховуючи динаміку зміни густини абонентського трафіку, для підвищення спектральної та енергетичної ефективності інфраструктури радіодоступу, як показано у роботі [25]. Враховуючи можливості глибоких нейронних мереж стосовно вивчення складних закономірностей, їх можна застосувати для адаптивного керування потужністю окремих базових станцій, забезпечуючи таким чином оптимальну конфігурацію мережі радіодоступу для поточних умов функціонування мережі.

*Багаторівневе покриття* використовується як найбільш ефективне на сьогодні технічне рішення для підвищення системної спектральної ефективності мережі та середньої пропускної здатності для абонентів, за рахунок збільшення коефіцієнта повторного використання частот [26-31]. В ряді досліджень показано, що за рахунок багаторівневого покриття мережі 5G теоретично повинні забезпечувати в тисячу разів вищу сумарну пропускну здатність території, у порівнянні з мережами LTE [28,29]. Проте, на практиці дане завдання спричиняє ряд труднощів, оскільки необхідно розділити радіочастотний ресурс між багатьма рівнями, які перекриваються між собою, для того, щоб уникнути інтерференційних завад між ними [30,31]. Враховуючи вищенаведені підходи до динамічної адаптації покриття, процес розподілу частот стане ще більш складним, що потребуватиме використання методів штучного інтелекту для оптимізації багаторівневого покриття в режимі реального часу.



*Агрегація несучих частот* дає змогу передавати інформаційні потоки у мережі з використанням декількох несучих частот, для підвищення агрегованої пропускної здатності для абонентів [32-35]. для покращення взаємодії з користувачем. Дана технологія стала надзвичайно актуальною після появи багаторівневого покриття, оскільки абонент одночасно знаходиться у зоні дії мікрокомірок та макрокомірок. Враховуючи, що кількість агрегованих каналів з розвитком технологій обробки та фільтрації сигналів лише зростатиме, застосування методів штучного інтелекту стане критично необхідним для вирішення завдання оптимальної агрегації несучих частот [35].

*Використання неліцензійного радіочастотного ресурсу* суттєво розширює можливості операторів з точки зору підвищення пікової пропускної здатності та системної спектральної ефективності [36-45]. Враховуючи випадковий та територіально нерівномірний характер використання неліцензійного радіочастотного ресурсу, оператори мають змогу використовувати його при можливості як додаткову частотну смугу при агрегації кількох потоків для передавання трафіку абонента [39,40]. Існуючі реалізації LTE-Unlicensed та 5G-Unlicensed використовують частотний діапазон 5 ГГц на конкурентній основі із мережами Wi-Fi, забезпечуючи при цьому координацію та уникнення інтерференційних завад [41-43]. Таким чином забезпечується до 1 ГГц додаткового радіочастотного ресурсу в залежності від регіону розгортання. Крім того, деякі перспективні дослідження показують перспективу використання неліцензійного радіочастотного ресурсу в діапазоні 28-60 ГГц, що додатково може забезпечити до 14 ГГц доступного радіочастотного ресурсу [44,45]. Проте, дані діапазони потребують істотного ускладнення апаратних засобів, що призведе до зростання їх вартості [46]. Незважаючи на це, розвиток методів адаптивного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу з використанням елементів машинного навчання та штучного інтелекту дасть змогу суттєво підвищити їх ефективність за рахунок удосконалення методів прослуховування середовища та інтелектуальної обробки сигналів [47,48].

## **1.2. Трансформація мережної інфраструктури 5G для автоматизації процесів управління**

### **1.2.1. Віртуалізація мережних функцій ядра 5G**

Стандарт 3GPP TS 23.501 визначає архітектуру ядра мережі 5G у форматі мікросервісів, які програмно реалізують віртуалізовані функціональні блоки [49]. Дана архітектура суттєво відрізняється від класичної архітектури ядра EPS в мережах стандарту LTE.

Згідно із специфікацією стандарту 3GPP TS 23.501, мережі мобільного зв'язку 5G використовують наступні віртуалізовані функції та програмні модулі:

- Функція управління доступом і мобільністю AMF (Access and Mobility Management Function) [50].
- Функція управління сеансами SMF (Session Management Function)[51].
- Функція передавання даних абонентів UPF (User Plane Function) [52].
- Модуль управління даними абонентів UDM (Unified Data Management) [53].
- Уніфікована база даних UDR (Unified Data Repository) [54].
- Функція зберігання неструктурованих даних UDSF (Unstructured Data Storage Function) [55].
- Функція вибору мережевого слайсу NSSF (Network Slice Selection Function) [56].
- Функція управління політиками PCF (Policy Control Function) [57].
- Функція взаємодії із зовнішніми додатками NEF (Network Exposure Function) [58].
- Репозиторій мережних функцій NRF (NF Repository Function) [59].
- Функції прикладного рівня AF (Application Function) [60].
- Функція обміну короткими текстовими повідомленнями за допомогою протоколу SMSF (SMS Function) [61].
- Функція взаємодії з мережами доступу, які не входять до стандартів 3GPP N3IWF (Non-3GPP InterWorking Function) [62].

Високорівнева сервісно-орієнтована архітектура мережі 5G з точки зору взаємодії віртуалізованих мережних функцій в площині управління представлена на рис.1.1.

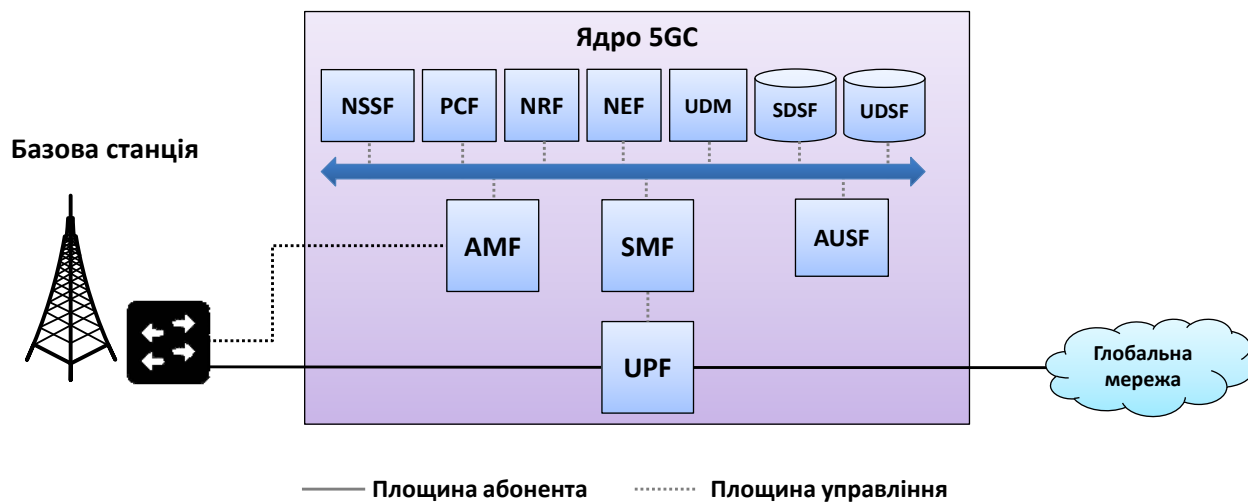


Рис. 1.1. Архітектура ядра мережі 5G.

Функція AMF у мережі 5G відповідає за реєстрацію абонентів у мережі, операції, контроль з'єднання та управління мобільністю. За принципом роботи, функція AMF є схожою до вузла управління мобільністю MME (Mobility Management Entity) у мережі LTE [50,63]. Відповідно, дана функція відповідає за точку з'єднання абонентів та призначення їм відповідної віртуалізованої функції управління сеансом SMF.

Функція SMF відповідає за управління сеансами, призначення та керування IP адресами абонентів, вибір шлюзу UPF та застосування політик QoS на рівні управління, взаємодія із іншими мережами в рамках процедур роумінгу, збір тарифікаційних даних та організація інтерфейсу з системою білінгу. За принципом роботи функція SMF є аналогом функцій MME, SGW, PGW в площині управління мереж стандарту LTE [51,64].

Функція UPF відповідає за підключення до глобальної мережі Інтернет, маршрутизацію та передавання пакетів даних абонентів, буферизацію пакетів у висхідному каналі, ініціацію повідомлення UE про наявність даних для приймання у низхідному каналі, маркування пакетів даних відповідно до необхідних параметрів QoS, аналіз шаблонів трафіку та застосування

мережевих політик PCF. За принципом роботи UPF є аналогом функцій SGW та PGW в площині абонента мереж стандарту LTE [52,64]. Крім того, UPF є опорною точкою для підтримки мобільності як в межах однієї, так і між різними технологіями радіодоступу.

Модуль UDM є аналогом HSS/AAA сервера мереж стандарту LTE [53,65]. UDM відповідає за управління даними профілів абонентів, включаючи зберігання і модифікацію переліку доступних абонентам послуг і відповідних їм параметрів, управління ідентифікаторами абонентів (SUPI), генерацію облікових даних автентифікації 3GPP АКА, авторизацію доступу на основі даних профілю абонента (наприклад, обмеження роумінгу), управління реєстрацією абонента (збереження інформації про обслуговуючу AMF, підтримку неперервності обслуговування (збереження інформації про призначені SMF/DNN для поточних сеансів зв'язку) [53]. Крім того, кілька різних UDM можуть обслуговувати різні транзакції одного абонента.

Уніфікована база даних UDR відповідає за зберігання різноманітних абонентських даних та взаємодію із віртуалізованими функціями UDM, PCF та NEF за допомогою інтерфейсу прикладного рівня Nudr. UDR відповідає за збереження інформації у довгостроковій перспективі. Ключовою особливістю UDR є доступність даних для будь-якої мережної функції ядра 5G через запити прикладного рівня. Таким чином, забезпечується універсальність системи управління даними, що дає змогу одночасно підтримувати наступні функції [54]:

- збереження та управління даними про абонентів функцією UDM;
- збереження та управління даними про політики верхнього рівня функцією PCF;
- збереження та управління даними для взаємодії із зовнішніми мережами функцією NEF;
- збереження та управління даними функціями прикладного рівня AF.

Окрім UDR, в архітектурі 5G використовується допоміжна система для зберігання даних з невідомою структурою UDSF (Unstructured Data Storage

Function), яка взаємодіє із будь-якими мережними функціями через інтерфейс N18. Зокрема, UDSF використовується функціями AMF для збереження поточних контекстів зареєстрованих абонентських пристроїв UE. Це дає змогу забезпечити неперервність сеансів зв'язку для абонентів при запланованому хендовері між різними AMF, або виникненні аварійної ситуації, унаслідок якої обслуговуюча AMF стає недоступною для UE [55]. В обох випадках, альтернативний AMF миттєво продовжить обслуговування UE, використовуючи поточний контекст даних абонента, збережений попередньою AMF у неструктурованій базі UDSF [55].

Функція вибору мережевого слайсу NSSF зберігає список мережевих слайсів, які визначені оператором. NSSF забезпечує вибір необхідного набору мережевих слайсів в процесі реєстрації абонентського пристрою в мережі [56]. Даний процес здійснюється в залежності від типу послуги, типу абонентського пристрою, місця розташування абонента та багатьох інших мережних параметрів. Крім того, NSSF відповідає за вибір функцій AMF, які будуть використовуватися для обслуговування абонентських пристроїв шляхом запиту в NRF [56].

Функція управління політиками PCF є аналогом модуля PCRF у мережах LTE [57,66]. Зокрема, PCF в режимі реального часу формує політики обслуговування для абонентів, включаючи параметри QoS та правила тарифікації. На основі даних політик, створюються віртуальні канали для абонентів з відповідними характеристиками, враховуючи вимоги QoS абонента, його профіль обслуговування, місце розташування, рівень завантаження мережі та ряд інших параметрів мережі мобільного зв'язку [57].

Функція взаємодії з зовнішніми додатками NEF забезпечує взаємодію в межах та за межами ядра 5G з використанням RESTful інтерфейсів прикладного програмування API. NEF дає змогу організувати безпечну взаємодію зовнішніх платформ та сервісів з опорною мережею 5G [58]. Зокрема, NEF дає змогу зовнішнім додаткам підписуватися на певні події, які генеруються різними функціями мережі 5G, наприклад втрата та відновлення зв'язку з конкретним

UE (функція AMF), звіти про місцезнаходження UE (функція AMF), зміна абонентом мережі обслуговування (функція UDM). Таким чином, NEF є логічним продовженням функції SCEF, яка запропонована у Релізі 13 сімейства стандартів 3GPP, для мереж вузькосмугового Інтернету речей (NB-IoT) [67]. NEF зберігає інформацію, отриману від мережних функцій, у вигляді структурованих даних в репозиторії UDR [58]. В подальшому дана інформація може бути використана для будь-яких інших мережних функцій, або для мережної аналітики на основі методів машинного навчання.

Репозиторій мережних функцій NRF є еволюційним розвитком сервера доменних імен DNS. NRF зберігає профілі усіх розгорнутих в мережі екземплярів віртуалізованих мережних функцій NF. Профіль NF, містить інформацію про ідентифікатори екземплярів мережних функцій, типи мережних функцій, ідентифікатор PLMN, ідентифікатори мережних слайсів (S-NSSAI, NSI ID), доменні імена або IP-адреси мережних функцій, інформацію про підтримувані сервіси та інші мережні параметри [59].

Функція прикладного рівня AF взаємодіє з мережею ядра 5G для виконання завдань управління маршрутизацією трафіку, взаємодія із зовнішніми системами через NEF та також взаємодія із функцією управління політиками PCF [60]. Залежно від реалізації оператором зв'язку, деяким зовнішнім платформам та додаткам може бути дозволений безпосередній доступ до мережних функцій 5G. Альтернативним варіантом є взаємодія із прикладними інтерфейсами API, які надаються модулем NEF [60].

Для ідентифікації абонента в мережі використовується міжнародний постійний ідентифікатор абонента 5G SUPI (Subscription Permanent Identifier) [49, 68]. Даний ідентифікатор призначається кожному абоненту мережі 5G і зберігається в уніфікованій базі даних UDM та USIM модулі абонента. В якості ідентифікатора SUPI може виступати міжнародний ідентифікатор мобільного абонента IMSI (International Mobile Subscriber Identity) або ідентифікатор доступу до мережі - NAI (Network Access Identifier), формат якого визначений у RFC 4282 [49,68].

Окрім того, у кожного абонентського пристрою є постійний ідентифікатор PEI (Permanent Equipment Identifier) [69]. На сьогоднішній час 3GPP визначає лише один можливий формат PEI – IMEI (International Mobile Station Equipment Identity) [70]. IMEI – це є унікальна цифрова послідовність, яка присвоюється усім мобільним пристроям стандартизованим 3GPP, при їх виробництві.

Окрім того, в цілях безпеки використовується прихований ідентифікатор абонента SUCI (Subscription Concealed Identifier), який є зашифрованою копією міжнародного постійного ідентифікатора 5G SUPI, і дає змогу уникнути його передавання по мережі у відкритому вигляді, навіть при первинній реєстрації абонентського пристрою в мережі [49,68]. Для захисту SUPI використовується криптографічна схема на основі алгоритму еліптичних кривих. При цьому частина SUPI, яка містить мобільний код країни (MCC) та мобільний код мережі (MNC) використовується для маршрутизації сигнального трафіку та не шифрується [49,68].

Глобальний тимчасовий унікальний ідентифікатор абонента 5G-GUTI (5G Globally Unique Temporary Identifier) призначається функцією AMF для абонента незалежно від типу мережі доступу (3GPP або не-3GPP) [49]. За винятком початкової реєстрації в мережі, при всіх подальших підключеннях абонентський пристрій використовує 5G-GUTI [49].

Усі вищезазначені функції ядра мережі 5G, реалізовані у вигляді мікросервісів, які взаємодіють між собою з використанням віртуальної «шини повідомлень», яка пов'язує всі компоненти з використанням протоколу HTTP/2 (Hypertext Transfer Protocol) [71].

### **1.2.2. Удосконалення функцій автоматизованого управління в мережах 5G**

Існує багато причин для децентралізації функціональних можливостей, але одна з найбільш переконливих полягає в тому, що шляхом роз'єднання функцій управління та передавання даних можна оптимізувати процес управління мережею [72,73]. Сучасні програмно-конфігуровані комутатори з

програмованими чергами переадресації пакетів є прикладом спеціалізованого обладнання, яке можна використовувати в мережі мобільного зв'язку [74,75].

На рисунку 1.2 показано, яким чином здійснюється реалізація елементів PGW-U, SGW-U, PDCP-U в програмно-конфігурованих комутаторах [76,77]. Така архітектура дає змогу безпосередньо інтегрувати ядро мережі мобільного зв'язку в площині мережі SDN (Software Defined Network) [77]. Враховуючи, що 5G розділяє функціональні блоки на площини управління та абонента, тоді як SDN розділяє функціональні блоки на площини управління та площини даних, досягається узгодження архітектур LTE/5G та SDN [72-77].

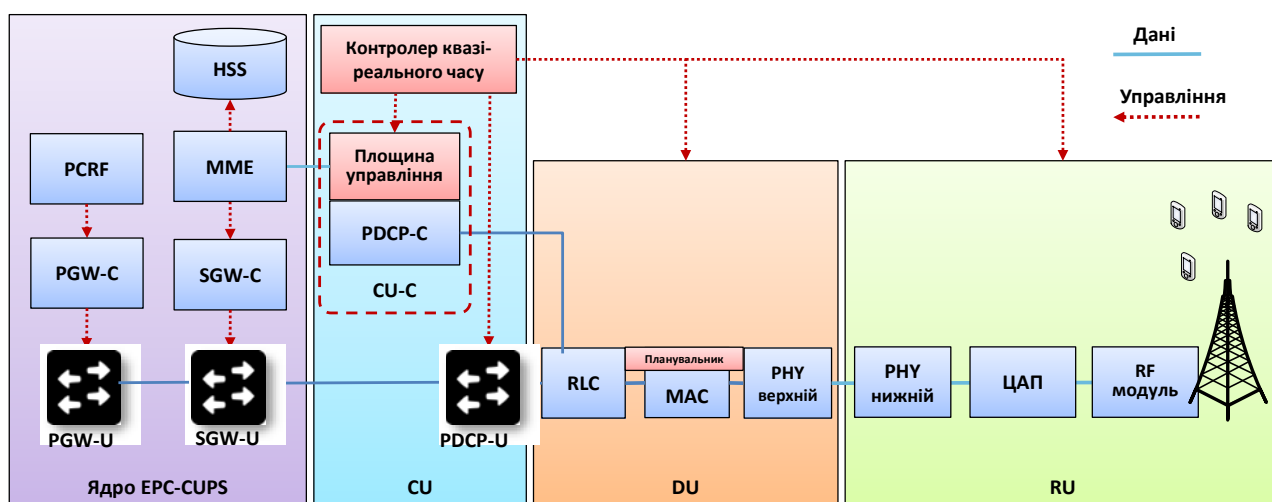


Рис. 1.2. Архітектура реалізації елементів площини передавання даних на основі програмно-конфігурованих вузлів.

Передбачена в SDN реалізація площини управління потребує використання масштабованої та високо доступної мережної операційної системи (ONOS – Open Network Operating System) [78]. Як і традиційні операційні системи, ONOS розміщується між прикладними програмами та базовими апаратними пристроями, надаючи їм абстракції вищого рівня, приховуючи низькорівневі деталі базового обладнання. Як приклад, PGW-C, SGW-C та PDCP-C можуть бути реалізовані як програми управління, що працюють поверх ONOS [76].



На рисунку 1.3 показана одна можлива конфігурація, в якій основні комутатори з'єднані між собою. Таким чином, компоненти площини управління 5G можуть бути реалізовані як додатки управління поверх SDN [75,76,78].

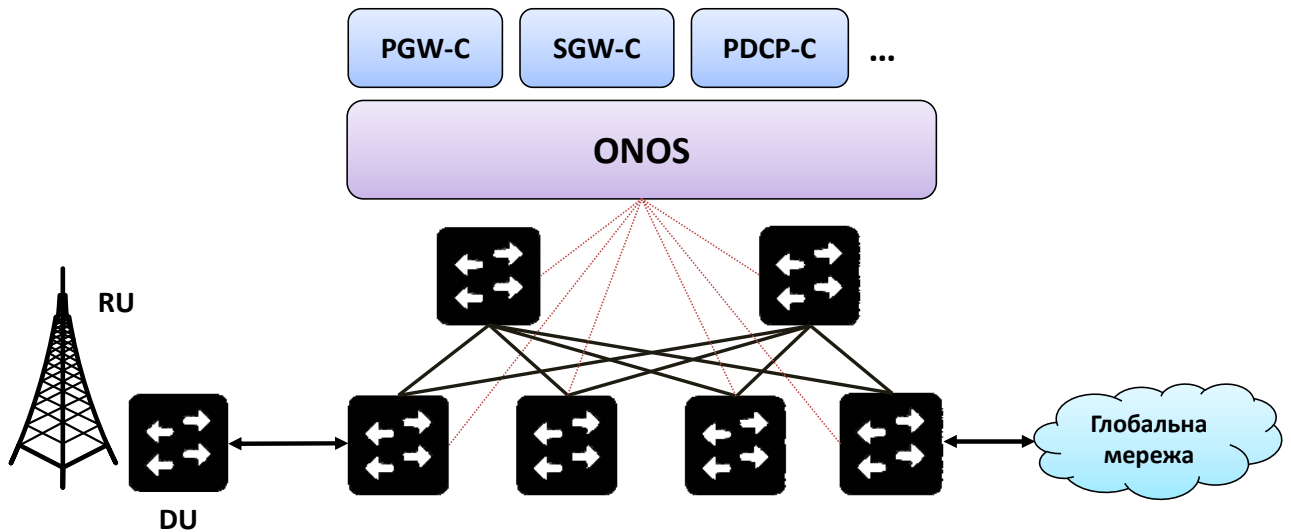


Рис. 1.3. Реалізація елементів управління площиною абонентів як додатків поверх SDN контролера на основі ONOS.

Іншим наслідком децентралізації функціональних можливостей є те, що після роз'єднання різні функції можуть бути розміщені в різних фізичних місцях. Наприклад, при розділенні мережі радіодоступу, деякі функції (наприклад, PCDP та RRC) розміщуються у центральних вузлах (CU – Central Unit), а інші (наприклад, RLC та MAC) у розподілених вузлах (DU – Distributed Unit). На рис. 1.4 показано реалізацію ядра мережі при якій площина абонента залишається у граничних серверах MEC (Mobile Edge Computing), а площина управління переноситься у централізовану хмарну систему, наприклад Google Cloud або Amazon AWS [79]. Така архітектура полегшує збір та аналіз даних, а також забезпечує великі обчислювальні ресурси. Але, варто звернути увагу також на те, що вона знижує бар'єр для будь-кого (не лише операторів, які експлуатують інфраструктуру RAN), пропонувати мобільні послуги клієнтам. Такі суб'єкти називають віртуальними операторами мобільного зв'язку (MVNO – Mobile Virtual Network Operator), які мають змогу розгорнути власне ядро мережі на основі хмарних сервісів [80].

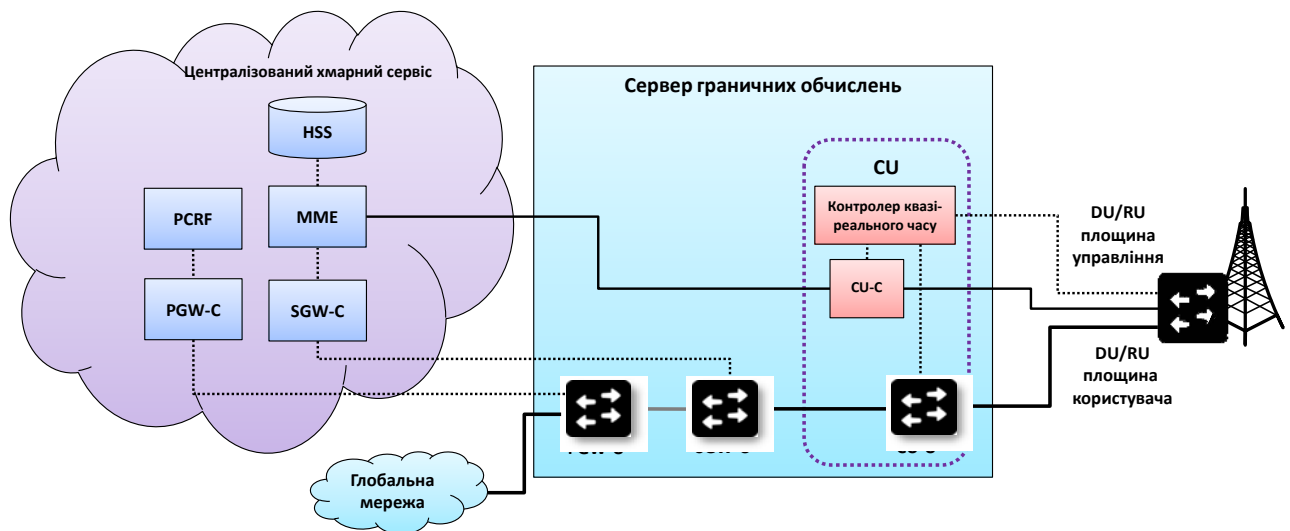


Рис. 1.4. Архітектура існуючої реалізації ядра мережі LTE/5G на основі хмарних та граничних обчислень.

### 1.2.3. Методи логічного розділення радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури 5G

Однією з найбільш вагомих переваг 5G є здатність диференціювати рівень сервісу, пропонованого різним додаткам та клієнтам. Диференціація, звичайно, є ключовою для можливості стягувати різну плату з клієнтів, але вона також необхідна, для підтримки різноманітних послуг. Наприклад, потокове відео, яке вимагає великої пропускної здатності, але є толерантним до затримки та критичні сервіси Інтернету речей, які мають мінімальну потребу в пропускній здатності, але вимагають надзвичайно низьких та прогнозованих затримок [82].

Механізм, який підтримує такий вид диференціації, називається мережевим слайсингом, і він зводиться до планування ресурсів як мережі радіодоступу (розподіл радіочастотного ресурсу), так і ядра (масштабування екземплярів мікросервісів та їх розміщення на доступних серверах) [56,83].

Варто зазначити, що мережевий слайс є узагальненням індексу класу QoS (QCI – QoS Class Identifier, 5QI – 5G QoS Identifier) [49]. 3GPP визначає стандартний набір мережевих слайсів, які називаються значеннями стандартизованого типу слайсу (SST – Slice/Service Type). Наприклад, SST 1 відповідає мобільній широкопasmовій мережі (eMBB – enhanced Mobile

Broadband), SST 2 – критичним сервісам з підвищеною надійністю та низькою затримкою (URLLC Ultra-Reliable Low Latency Communications), SST 3 – множинний доступ для великої кількості пристроїв машинного типу (mMTC – Massive Machine Type Communications) [56]. Крім того, стандарт передбачає розширення стандартного набору мережних слайсів на розсуд оператора, або більш точно диференціювати сервіси різних абонентів, шляхом розділення стандартного SST на декілька окремих слайсів з різним пріоритетом [56].

Радіочастотний ресурс у мережі 5G організований у формі двовимірної сітки, яка розділена на частотно-часові ресурсні блоки, розподіл яких визначений у стандарті 3GPP [84-85]. Завдання планувальника ресурсів полягає у найбільш ефективному заповненні ресурсної сітки наявними сегментами даних з черги пакетів кожного абонента, використовуючи при цьому інформацію про стан якості каналу CQI [84-90].

Теоретично, можна розробити досконалий планувальник, який враховує десятки різних факторів для оптимального розподілу ресурсів. Проте, ключовою особливістю слайсингу мережі є додавання рівня абстракції, який дає змогу відокремити процес виділення ресурсів кожному абоненту від їх фізичного розподілу. Таким чином, можна визначити кілька наборів віртуальних ресурсних блоків (різного розміру), для кожного з яких призначений власний планувальник [56,76,85]. На рисунку 1.5 представлено приклад з двома наборами ресурсних блоків, які розподіляються різними планувальниками. Таким чином, планувальники, можуть вільно розподіляти віртуальні ресурсні блоки незалежно один від одного. Наприклад, один планувальник може бути розроблений для роботи з відеотрафіком з великою пропускною здатністю, а інший планувальник може бути оптимізований для трафіку критичних сервісів IoT із низькою затримкою. Крім того, певна частка ресурсів може бути зарезервована для пріоритетних абонентів або іншого високопріоритетного трафіку (наприклад, дані пов'язані з громадською безпекою), а решта розподілятися між усіма іншими [56,76,85].

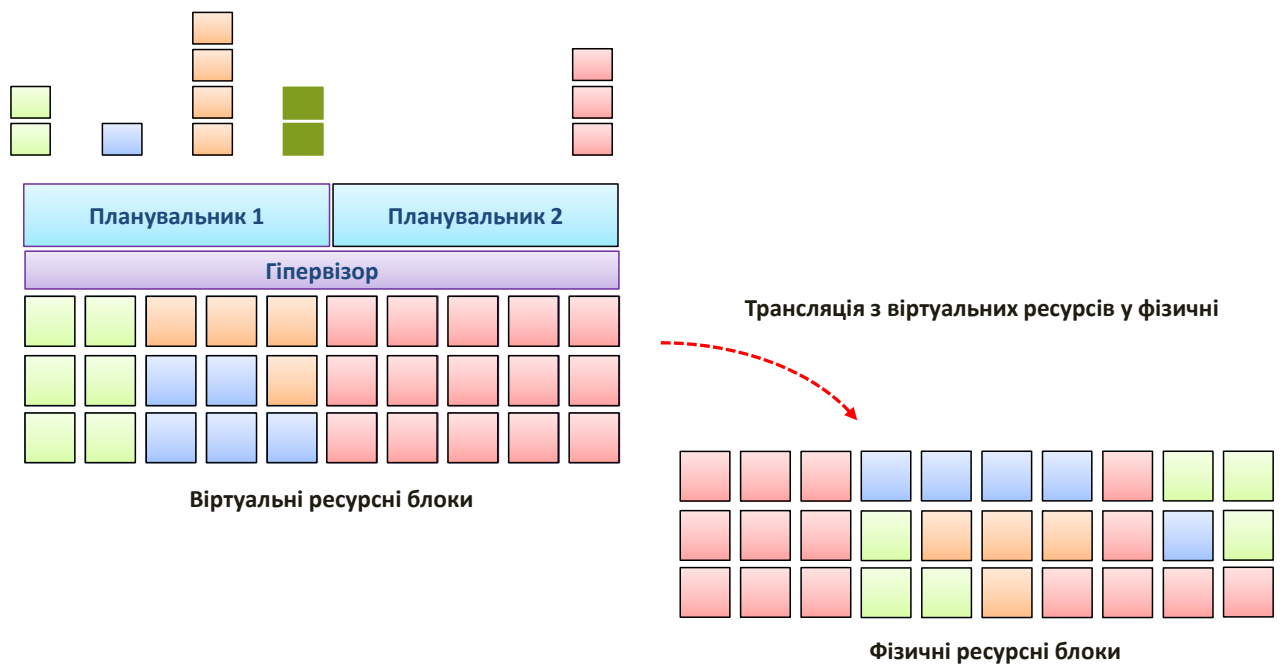


Рис. 1.6. Використання кількох планувальників для реалізації мережевого слайсингу.

Заглиблюючись в деталі реалізації, планувальник реального часу, що працює в кожному DU, отримує директиви високого рівня від планувальника квазі-реального часу, що працює в CU, як показано на рис. 1.7. Дані директиви стосуються повторної передачі, хендоверу та контролю інтерференції між слайсами. Спільна програма управління слайсингом RAN відповідає за рішення про планування, розподіляючи ресурси між поточними активними слайсами. Розуміння цієї деталі реалізації є важливим, оскільки всі ці рішення щодо управління реалізуються програмними модулями, а отже, легко змінюються або налаштовуються при розгортанні мережі. Це є ключовою відмінністю архітектури 5G від 4G [76,91].

Окрім слайсингу RAN, необхідно забезпечити слайсинг мережі ядра, який включає механізми QoS у мережевих комутаторах для забезпечення необхідної смуги пропускання, призначеної кожному слайсу, а також обчислювальних вузлах для гарантування контейнерам мікросервісів достатнього обчислювального ресурсу. Відповідно необхідно віртуалізувати ресурси ядра та відстежувати набір взаємопов'язаних мікросервісів, які реалізують кожен слайс

[76,91]. Після цього планувальники пакетів повинні виділити достатню пропускну здатність мережі для потоків даних кожного слайсу, в той час як планувальники обчислювальних ресурсів повинні виділити достатню кількість обчислювальних циклів для відповідних контейнерів слайсу [76,83].

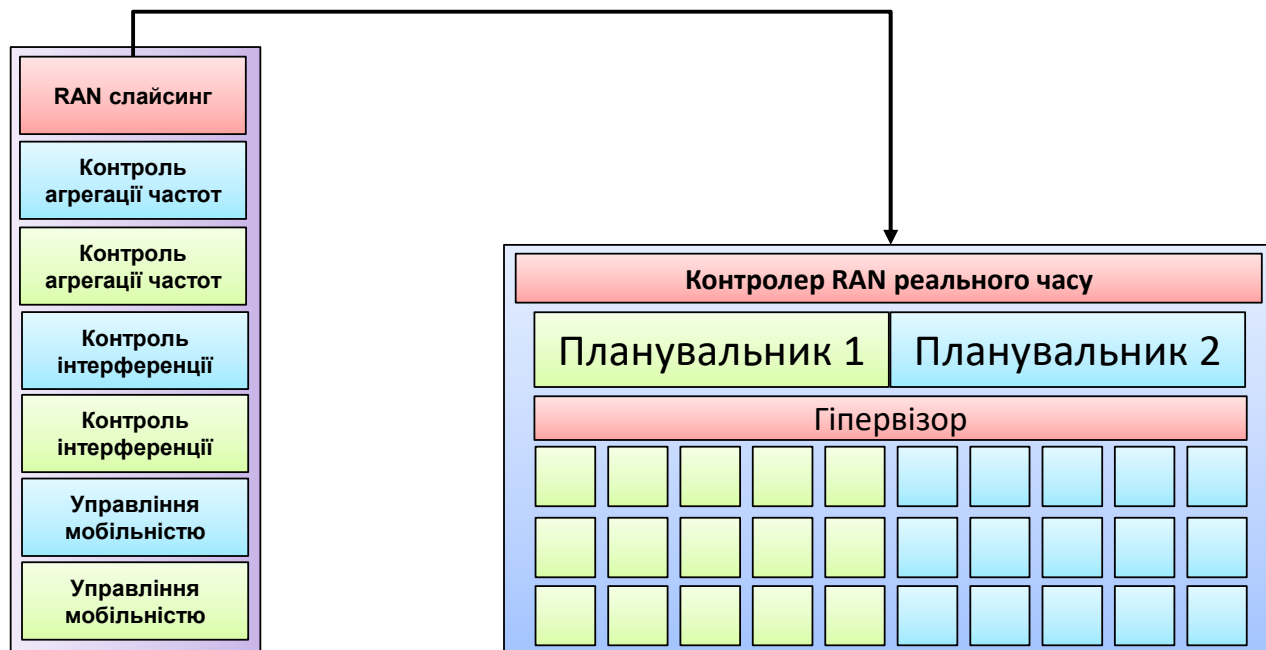


Рис. 1.7. Розподіл функцій управління реального часу та квазі-реального часу.

Крім того, окремі слайси можуть мати різні варіанти реалізації, наприклад, один оптимізований для масових додатків IoT, а інший оптимізований для AR/VR додатків з високою пропускну здатністю [56].

### 1.3. Методи інтелектуального автоматизованого управління інфраструктурою та процесом функціонування мереж мобільного зв'язку

#### 1.3.1. Методи аналізу великих обсягів даних в мережах мобільного зв'язку

Розвиток технологій мобільного зв'язку призводить до зростання кількості сервісів, які використовують кінцеві абоненти, щодня генеруючи величезні обсяги мобільного трафіку. Зокрема, дані можуть генеруватися або безпосередньо з мобільних пристроїв, які реєструють поведінку абонентів, або

вузлів інфраструктури мережі мобільного зв'язку, які дають змогу отримати більш узагальнену динаміку в масштабах міста або держави. Належний аналіз отриманих даних може бути корисним як для управління мережею мобільного зв'язку, так і для соціальних потреб, таких як оптимізація громадського транспорту, персоналізація послуг та прогнозування поширення вірусних захворювань в умовах епідеміологічної ситуації (MERS, COVID-19, тощо) [92]. Однак оператори мобільного зв'язку на сьогоднішній час не в змозі забезпечити належне управління великими обсягами даних у зв'язку із відсутністю належної програмно-апаратної інфраструктури.

Тому, на сьогоднішній час активно розробляються нові підходи до системного аналізу даних мереж мобільного зв'язку на основі методів машинного навчання. Зокрема, у роботі [93], запропоновано класифікувати мобільні дані на дві категорії: дані рівня мережі та дані рівня додатків. Основна відмінність цих категорія полягає у тому, що у першому випадку дані зазвичай збираються кінцевими мобільними пристроями, а в другому – вузлами мережної інфраструктури. Мобільні дані, які генеруються мережевою інфраструктурою, дають змогу проводити більш глобальний аналіз продуктивності мережі мобільного зв'язку з точки зору пропускну здатності, наскрізної затримки, джиттеру, відмови окремих сегментів або наявності вузьких місць в мережі. Відповідно, даним на рівні мережі, як правило, притаманні значні просторово-часові зміни внаслідок динаміки мереж мобільного зв'язку], що може бути використано для управління мережею, аналізу мобільності абонентів, планування громадського транспорту, тощо [94]. Крім того, деякі дані мережі мобільного зв'язку, такі як просторова геолокаційна характеристика трафіку, можна розглядати як панорамний знімок статистичної активності жителів міста, що дає достатньо цінну інформацію для управління міською інфраструктурою та комунальними службами.

В свою чергу, дані рівня додатків безпосередньо реєструються датчиками або мобільними додатками, встановленими на кінцевих пристроях. Ці дані часто збираються за допомогою краудсорсингу з великої кількості

різноманітних джерел, таких як системи глобального позиціонування (GPS), мобільні камери та відео реєстратори, портативні медичні монітори, тощо. В такому випадку, мобільні пристрої функціонують в ролі концентраторів, які відповідають за процес збору та попередньої обробки даних, з подальшим їх відправленням в цільові бази даних [92].

### **1.3.2. Особливості аналізу даних на мережному рівні**

Мобільні дані на рівні мережі в основному відносяться до статистичної інформації, яку збирають провайдери послуг Інтернету, включаючи метадані мережної інфраструктури, показники ефективності мережі та геолокаційну статистику мережі. Стрімкий розвиток та хороші результати методів глибокого навчання у розв'язку різноманітних задач, спричинив зростання інтересу до можливого використання цих методів для аналізу даних та оптимізації конфігурації мереж мобільного зв'язку, покращуючи тим самим якість сервісу для кінцевих абонентів. Загалом, роботи по дослідженню глибокого навчання для мереж мобільного зв'язку можна розділити на три основні категорії: прогнозування стану мережі, класифікація мережевого трафіку та аналіз радіоканалів.

Зокрема, у роботі [95] досліджується взаємозв'язок між основними об'єктивними метриками мережі та параметрами якості сприйняття послуг (QoE – Quality of Experience). Автори використовують класичний багат шаровий перцептрон (MLP – Multi Layer Perceptron) для прогнозування параметрів якості послуг кінцевих абонентів мережі мобільного зв'язку на основі середньої пропускної здатності абонентів, кількості активних абонентів у комірці, середнього обсягу переданих даних на одного абонента та показників якості каналу. У роботі [96], автори використовують розріджене кодування та макс-пулінг з напівконтрольованою моделлю глибокого навчання для класифікації отриманих шаблонів кадру/паketу та прийняття рішення про вихідні властивості потоків мережі Wi-Fi.

Враховуючи особливості функціонування мереж мобільного зв'язку з точки зору повторного використання радіочастотних ресурсів та уникнення інтерференційних завад між комірками, значна кількість досліджень спрямовані на використання глибокого навчання для прогнозування мобільного трафіку в масштабах міста, враховуючи його просторово-часові співвідношення. Наприклад, у роботі [97] автори пропонують використовувати архітектуру на основі автоенкодерів та рекурентних нейронних мереж з довгою короткостроковою пам'яттю (LSTM – Long Short-Term Memory) для моделювання просторових та часових кореляцій розподілу мобільного трафіку. Зокрема, автори використовують глобальну та багаторазову локальну схему автоенкодера для вилучення просторових об'єктів, зменшення розмірності та паралельного навчання. Після цього, отримані представлення на виході автоенкодера обробляються рекурентною нейронною мережею LSTM для здійснення остаточного прогнозування. Проведені експерименти із датасетом реальних даних демонструють високу ефективність такого рішення, порівняно із методом опорних векторів (SVM – Support Vector Machine) та моделлю авторегресивного інтегрованого ковзного середнього (ARIMA – Autoregressive Integrated Moving Average).

Подальший розвиток методів прогнозування в напрямку розширення часових інтервалів прогнозування запропоновано у роботі [98]. Автори поєднали архітектуру ConvLSTM та 3D CNN (Convolutional Neural Network) для побудови нейронних мереж, які фіксують складні просторово-часові особливості в масштабах міста. В роботі також запропоновано схему поєднання прогнозів з історичними даними, що значно підвищує точність прогнозування на великих часових інтервалах. Глибоке навчання також застосовувалося в роботах [99-100], де авторами використовуються різні варіації CNN та LSTM для прогнозування трафіку в мережі мобільного зв'язку. Узагальнюючи запропоновані рішення, можна зробити висновок, що ефективне вивчення просторово-часових особливостей з використанням глибокого навчання,



забезпечує значно вищу точність, ніж традиційні статистичні підходи до прогнозування.

Враховуючи різноманіття сервісів у сучасних мережах мобільного зв'язку, класифікація трафіку є важливим аспектом ефективного управління якістю сервісу, шляхом виокремлення конкретних програм та протоколів із агрегованих мультисервісних інформаційних потоків. Наприклад, у роботі [101] автори використовують глибокий автоенкодер для ідентифікації протоколів у наборі даних TCP (Transmission Control Protocol) трафіку, досягаючи високої точності розпізнання та швидкодії. У роботі [102] пропонується використовувати архітектуру 1D CNN для класифікації зашифрованого трафіку. Автори припускають, що така структура більш ефективно працює для моделювання послідовних даних, і є простою в реалізації перспективним для розв'язку проблеми класифікації трафіку. Схоже рішення для класифікації зашифрованого трафіку на основі CNN запропоноване у роботі [103]. Автори розробили фреймворк Deep Packet, який дає змогу зменшити обсяг ручних налаштувань моделі забезпечуючи при цьому високу точність. Удосконалений автоенкодер з накопиченням застосовується у роботі [104], де автори використали байєсівські методи в автоенкодері для підвищення точності класифікації мережевого трафіку.

Метод ідентифікації трафіку зловмисного програмного забезпечення запропонований у роботі [105]. Автори представляють дані про трафік як зображення, і використовують репрезентативне навчання з метою виявлення аномальних шаблонів, які притаманні трафіку зловмисного програмного забезпечення.

Просторово-часові залежності даних мережного рівня можуть ефективно узагальнюватись з використанням архітектур CNN та RNN, які призначені для обробки зображень та часових рядів. Тому, одним із перспективних підходів до аналізу мережного трафіку є його представлення у вигляді послідовності кадрів, аналогічно того, як формується відео з послідовності зображень [98]. Однак існуючі методи, які використовуються для візуалізації відеоінформації

не можуть бути безпосередньо застосовані до даних мережі мобільного зв'язку. Тому, важливим напрямком подальших досліджень є адаптація відомих на сьогодні методів глибокого навчання до особливостей аналізу трафіку у мережах мобільного зв'язку.

З іншого боку, навіть при досягненні високої точності алгоритмів глибокого навчання в завданнях аналізу мобільних даних на рівні мережі, завдання формування причинно-наслідкових висновків на сьогодні є нерозв'язаним у зв'язку із складністю інтерпретацій моделей нейронних мереж. Наприклад, нейромережеві моделі легко можуть передбачити різке зростання трафіку в певних регіонах, проте не дають змоги пояснити причину зростання трафіку. Тому, потрібні додаткові дослідження, які б дали змогу забезпечити коректну інтерпретацію та впевненість у процесі прийняття рішень. На сьогоднішній час, оператори в основному використовують алгоритми глибокого навчання як допоміжні засоби для інженерів, проте ще не мають змоги забезпечити повну автоматизацію процесу прийняття рішень.

### **1.3.3. Використання елементів штучного інтелекту для аналізу даних на рівні прикладних застосувань**

Зі стрімким зростанням популярності Інтернету речей (IoT), сучасні мобільні пристрої поєднують в собі все більшу кількість програм та сенсорів, які збирають величезні обсяги даних на рівні додатків [106]. Застосування алгоритмів штучного інтелекту для виокремлення корисної інформації з цих даних може суттєво розширити можливості пристроїв [107,108], що в свою чергу дасть змогу підвищити якість сервісу для абонентів, надати важливу інформацію операторам про ефективність функціонування мережної інфраструктури, а також дасть важливу інформацію для виробників кінцевих пристроїв для оптимізації їхнього апаратного та програмного забезпечення.

З існуючих технічних рішень, можна виділити дві основні парадигми аналізу мобільних даних на рівні додатків, а саме хмарні обчислення та граничні обчислення. Хмарні обчислення розглядають мобільні пристрої як

колектори даних та месенджери, які постійно надсилають дані на хмарні сервери без їх попередньої обробки. Зазвичай цей процес здійснюється за наступним алгоритмом. Спочатку користувачі надсилають зібрані дані до хмарних серверів. Сервери використовують отримані дані для навчання моделей глибокого навчання та прийняття рішень. Після цього, результати або надсилаються назад до абонентів, або використовується сторонніми програмами в залежності від цільового застосування. Недоліком такої реалізації значне навантаження на мережну інфраструктуру та значна затримка.

Парадигма граничних обчислень відрізняється тим, що попередньо навчені моделі завантажуються з хмарних серверів на мобільні пристрої, що дає їм змогу здійснювати аналіз даних локально та формувати відповідні висновки. Реалізація такої моделі працює за наступним алгоритмом. Спочатку хмарні сервери використовують автономні набори даних (датасети) для навчання моделей глибокого навчання. Потім, навчені моделі завантажуються на мобільні пристрої. Мобільні пристрої локально здійснюють процес обробки даних на основі завантаженої моделі та надсилають сформовані висновки до хмарних серверів. Хмарні сервери приймають дані з мобільних пристроїв та використовують їх для відповідних цільових застосувань. При необхідності, моделі перенавчаються на основі більш актуальних наборів даних. Не зважаючи на очевидні переваги граничних обчислень, їх використання обмежується обчислювальними та енергетичними можливостями кінцевих пристроїв. Тому, застосування граничних обчислень доцільне або для простих застосувань, або у поєднанні з хмарними обчисленнями.

#### **1.3.4. Методи прогнозування переміщення абонентів у мережах мобільного зв'язку з використанням штучного інтелекту**

Прогнозування переміщення груп людей є надзвичайно важливим та актуальним завданням для епідеміології, містобудування, державного управління та планування сервісу в мережах мобільного зв'язку [109]. Алгоритми глибокого навчання отримують дедалі більшу увагу в даній галузі

як для прогнозування групових переміщень, так і для прогнозування переміщень окремих осіб. Зокрема, у роботі [110] запропоновано схему навчання ієрархічної архітектури CNN, яка дає змогу розпаралелювати модель для обробки потоків даних. Запропонований авторами фреймворк “DeepSpace” передбачає траєкторії людей зі значно вищою точністю у порівнянні із звичайною архітектурою CNN, що експериментально підтверджується на реальних наборах даних. У роботі [111] автори розробили нейронну машину Тюрінга [112] для прогнозування траєкторій руху людей, на основі даних мобільних телефонів. Нейронна машина Тюрінга поєднує два основні компоненти: модуль пам'яті для зберігання історії траєкторій та контролер для управління операціями «зчитування» та «запису» даних. Експерименти авторів показують, що запропонована архітектура досягає кращого узагальнення, ніж архітектури RNN та LSTM, забезпечуючи при цьому більш точне прогнозування траєкторії, ніж метод К найближчих сусідів.

Прогнозування мобільності груп абонентів розглядалось у роботі [113]. Автори запропонували алгоритм на основі LSTM для моделювання переміщення великих груп людей та транспортних засобів в міському масштабі. Загальноміські моделі руху також досліджуються у роботі [114], де автори створюють глибокі просторово-часові залишкові нейронні мережі (ResNet) для прогнозування групових переміщень. Для того, щоб охопити унікальні характеристики просторово-часових кореляцій, пов'язаних з мобільністю абонентів, автори відмовляються від моделей на основі RNN, на користь архітектури трьох ResNets для виокремлення ближніх та дальніх просторових залежностей у міському масштабі. Запропонована архітектура додатково використовує інформацію про зовнішні фактори впливу, що дає змогу досягти найвищої точності серед усіх методів глибокого та неглибокого машинного навчання.

Дані про переміщення абонентів як правило представляються у вигляді часових рядів, але також характеризуються додатковим просторовим виміром. Відповідно, даним мобільності, як правило, притаманні стохастичність, втрати

та шуми, що ускладнює їх точне прогнозування. Оскільки алгоритми глибокого навчання здатні автоматично наближувати функції з високою точністю, вони є достатньо перспективними для прогнозування мобільності абонентів мобільного зв'язку. Зокрема, алгоритми на основі CNN та RNN є найбільш успішними архітектурами для таких завдань, оскільки вони можуть ефективно поєднувати просторові та часові кореляції [110,111,113-115].

### **1.3.5. Методи просторового позиціонування кінцевих пристроїв на основі інтелектуального аналізу сигналів**

Деякі послуги та додатки в мережах мобільного зв'язку, потребують точної індивідуальної технології позиціонування [116]. Як наслідок, активно ведуться дослідження в напрямку локалізації абонентів мобільного зв'язку [117]. Загалом, методи локалізації абонентів можна класифікувати на залежні від пристрою та незалежні від пристрою [118]. Перша категорія використовує сигнали пристрою для визначення місця розташування. До другої, відносяться методи, які використовують зовнішню інфраструктуру для моніторингу зміни сигналу, з метою локалізації об'єктів, які представляють інтерес.

Алгоритми глибокого навчання можуть забезпечити високу точність локалізації для обох категорій. Зокрема, у роботі [119], запропоновано метод глибокого навчання “DeepFi” для локалізації в межах приміщення на основі інформації про стан каналу (CSI – Channel State Information). Таке рішення має значно вищу точність у порівнянні з традиційними методами, такими як FIFS [120], Horus [121] та методо максимальної ймовірності [122]. Подальші дослідження даної науково-дослідної групи відображені у роботах [123-128], де система локалізації удосконалена таким чином, щоб працювати з відкаліброваною інформацією про стан каналу CSI [123,124,127]. Вони також застосовують більш складні CNN [125] та бімодальні структури [126] для підвищення точності.

У роботі [129] автори використовують автоенкодер для вивчення інформативних закономірностей сигналів Wi-Fi. Таким чином синтезується

модель, яка може одночасно виконувати кілька завдань, включаючи локалізацію в приміщенні, виявлення активності та розпізнавання жестів. У роботі [130], автори пропонують енергоефективний підхід до локалізації в приміщеннях на основі технології Bluetooth. Запропоноване рішення використовує автоенкодер для вивчення характеристик електромагнітного поля сигналів BLE (Bluetooth Low Energy) маяків та проектування на їх основі точного положення абонентів у тривимірному просторі.

Загалом, дані про рівень сигналу та електромагнітну обстановку зазвичай описуються складними характеристиками, тому для навчання алгоритмів глибокого навчання потрібні великі обсяги даних [131]. Варто зазначити, що точність та надійність системи позиціонування можна покращити шляхом поєднання декількох типів сигналів на вході нейронної мережі [132]. Тому, в подальшому актуальним є розвиток методів локалізації абонентів на основі глибокого навчання для підвищення ефективності надання контекстно-орієнтованих сервісів у мережах мобільного зв'язку.

### **1.3.6. Технології управління мережною інфраструктурою на основі елементів штучного інтелекту**

Одним із найбільш важливих аспектів у мережах мобільного зв'язку є методи управління мережною інфраструктурою. Розвиток методів глибокого навчання дав змогу здійснити значний прорив у даному напрямку за рахунок використання навчання з підкріпленням [133] та імітаційного навчання [134]. Дані методи дають змогу вирішувати складні завдання, які раніше вважалися нерозв'язними [135,136]. Оскільки, оптимізація мережі мобільного зв'язку полягає в управлінні мережними ресурсами та функціями для досягнення максимальної продуктивності мережі з урахуванням поточних умов, методи глибокого навчання показують хороші результати у таких завданнях. Наприклад, у роботах [137,138] автори використовують глибоке навчання з підкріпленням для вирішення проблем кешування та зниження рівня інтерференційних завад у мережах мобільного зв'язку. Зокрема, автори

описують часові характеристики каналів, як Марківські процеси з скінченним станом та застосовують глибокі Q-мережі для вивчення оптимальної політики вибору абонентів.

Інший аспект управління мережною інфраструктурою, де доцільно застосовувати алгоритми глибокого навчання є маршрутизація трафіку. Зокрема, у роботі [139], автори пропонують архітектуру DBN для вибору наступного вузла маршруту, яка використовується в основі програмно-конфігурованого маршрутизатора. Розглядаючи алгоритм Open Shortest Path як оптимальну стратегію маршрутизації, запропонований метод досягає точності до 95%, одночасно значно зменшуючи час пошуку та затримку обслуговування. Подальший розвиток роботи представлено у [140] де автори використовують тензорні представлення прихованих шарів та ваг DBN, що додатково покращує ефективність запропонованого методу маршрутизації. Схожі результати отримані у роботі [141], де автори використовують нейромережі Хопфілда для маршрутизації, досягаючи вищої надійності у мережах мобільного зв'язку спеціального призначення. Алгоритм маршрутизації на основі графів та глибокого навчання представлений у роботі [142]. Запропонована архітектура приймає за вхідні дані граф мережі та повідомлення, що передається між вершинами графа, що дає змогу працювати з різними топологіями мережі.

Одним із важливих аспектів у мережах мобільного зв'язку є планування ресурсів. Зокрема, персоналізоване використання ресурсів та кешування контенту на основі методів глибокого навчання з підкріпленням запропоновано у роботі [143]. Автори навчають DRL агента, що складається з актора та критика. Актор відповідає за прийняття рішення про те, яка базова станція повинна обслуговувати певний контент, і необхідність його кешування. Далі застосовується критик, для оцінки функції вартості та надсилання зворотного зв'язку до актора. У роботі [144] запропоновано систему на основі глибокого Q-навчання, для оптимізації процесу розподілу обчислювальних ресурсів, з метою мінімізації затримки та енергоспоживання в мережі мобільного зв'язку.

Алгоритми глибокого навчання також знайшли застосування в хмарних мережах радіодоступу (Cloud-RAN). Зокрема, у роботі [145] пропонується глибоке Q-навчання для визначення режимів увімкнення/вимкнення віддалених базових станцій, аналізу поточного режиму їх роботи та прогнозування абонентського трафіку. Запропонований контролер DRL дає змогу задовольнити запити абонентів, знижуючи при цьому енергоспоживання мережі. У роботі [146], автори використовують архітектуру LSTM для прогнозування трафіку базових станцій в надшільних коміркових мережах. На основі прогнозів запропонований метод змінює політику розподілу ресурсів, з метою уникнення перевантажень окремих базових станцій, що призводить до нижчих показників втрати пакетів, а також до вищої пропускної здатності та кращої якості обслуговування. Схожий підхід пропонується у роботі [147] для оптимального динамічного розподілу радіочастотних ресурсів при їх спільному використанні кількома операторами мобільного зв'язку.

Отже, є два підходи до управління мережею з використанням глибокого навчання, а саме: навчання з підкріпленням та навчання на основі імітації. Навчання з підкріпленням потребує взаємодії з навколишнім середовищем, випробування різних дій та отримання зворотного зв'язку з метою подальшого вдосконалення. Оскільки, агент буде робити помилки під час навчання протягом великої кількості кроків, такий підхід не підходить для навчання на реальній інфраструктурі мережі, оскільки помилкові рішення можуть мати серйозні наслідки. Натомість такі алгоритми тренуються на основі симулятора середовища мережі мобільного зв'язку. З іншого боку, механізм імітаційного навчання полягає у наявності тренувальної вибірки, яка вказує моделі взаємозв'язок між вхідними параметрами та оптимальним вихідним результатом. В контексті тренування алгоритмів управління мережною інфраструктурою, такий підхід використовується для зменшення тривалості навчання моделей [140]. Наприклад, в завданнях маршрутизації, обчислення оптимального розв'язку займає багато часу, що не дає змоги задовольнити обмеження затримки в мережі мобільного зв'язку. З метою усунення даної



проблеми, необхідно підготувати велику навчальну вибірку для того щоб попередньо навчити глибоку нейронну мережу прогнозувати оптимальний маршрут з належною точністю.

#### **1.4.Методи інтеграції технології блокчейн у мережну інфраструктуру для децентралізації процесу її функціонування**

##### **1.4.1. Основні принципи функціонування технології блокчейн**

Технологія блокчейн в останні роки стрімко розвивається як перспективне технічне рішення для різноманітних децентралізованих застосувань. Блокчейн – це розподілений реєстр, який забезпечує масштабовану децентралізовану платформу, що може зберігати, верифікувати та перевіряти транзакції між різними сторонами, забезпечуючи децентралізований рівень довіри між ними, без залучення третьої сторони [148-151]. Ключовими особливостями цієї технології є децентралізація, прозорість, анонімність, незмінність, безпека та короткий час транзакцій. Варто зазначити, що при підкріпленні економічними та законодавчими механізмами, блокчейн може змінити парадигму управління інформаційно-комунікаційною інфраструктурою, забезпечуючи надійний обмін даними між різними операторами та абонентами. Тому блокчейн вважається однією із ключових технологій для розвитку програмно-конфігурованих мереж, технологій IoT та мереж мобільного зв'язку 5G/6G [151-156].

Розподілений реєстр в блокчейні містить інформацію про стан баз даних та дає змогу відстежувати будь-які зміни. Першою і найвідомішою реалізацією блокчейну є криптовалюта Біткоїн, де розподілений реєстр містить всю історію транзакцій між усіма зареєстрованими гаманцями, яка ведеться усіма вузлами мережі [157]. Блокчейн характеризується кількома ключовими особливостями, які роблять його перспективним варіантом для побудови децентралізованих систем мобільного зв'язку.

*Незмінність.* Блокчейн розроблений таким чином, що не дозволяє видалити будь-яку підтверджену транзакцію. Ця функція спрощує будь-які суперечки між операторами, регулятором та абонентами щодо будь-яких

порушень національного законодавства, таких як маніпуляції вартістю сервісу для абонентів, несанкціоноване використання радіочастотного ресурсу та порушення норм електромагнітної сумісності [158].

*Децентралізація.* Для забезпечення децентралізованої довіри без центрального органу влади (наприклад, банку, регулятора) блокчейн використовує механізм консенсусу для валідації транзакцій та верифікації правильного стану реєстрів даних [159].

*Безпека.* Кожен блок транзакцій має унікальний криптографічний хеш, який забезпечує цілісність і коректність інформації. Хеш обчислюється на основі даних транзакції та хешу попереднього блоку, так що його значення залежить від усього попереднього ланцюжка (рис. 1.8). Ця функція забезпечує захист даних від модифікації, оскільки зміна будь-якої транзакції в минулому призведе до зміни значення криптографічного хешу, що призведе до відхилення такого блоку іншими вузлами [160].

*Смарт-контракти.* Ця функція дозволяє розробляти будь-який програмний алгоритм декількох пов'язаних транзакцій, який може бути автоматично виконаний відповідно до визначених умов (рис. 1.8). Смарт-контракти можуть розкрити потенціал 5G/6G з точки зору підвищення ефективності управління мережною інфраструктурою та гнучких автоматизованих домовленостей між операторами, абонентами та регулятором [161].

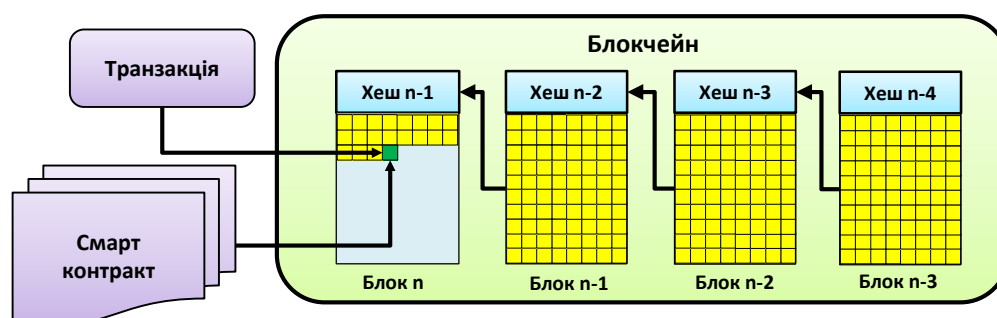


Рис. 1.8. Приклад ланцюжка блоків у мережі блокчейн.

При розгортанні смарт-контракту створюється звичайна транзакція без заданої адреси отримувача. Крім того, в якості вхідних даних додається деякий байт-код. Цей байт-код працює як конструктор, який необхідний для запису

початкових змін до сховища перед виконанням контракту [162,163]. Під час розгортання, байт-код ініціалізації буде виконаний лише раз, тоді як байт-код виконання буде виконуватися при кожному виклику смарт-контракту (рис. 1.9).

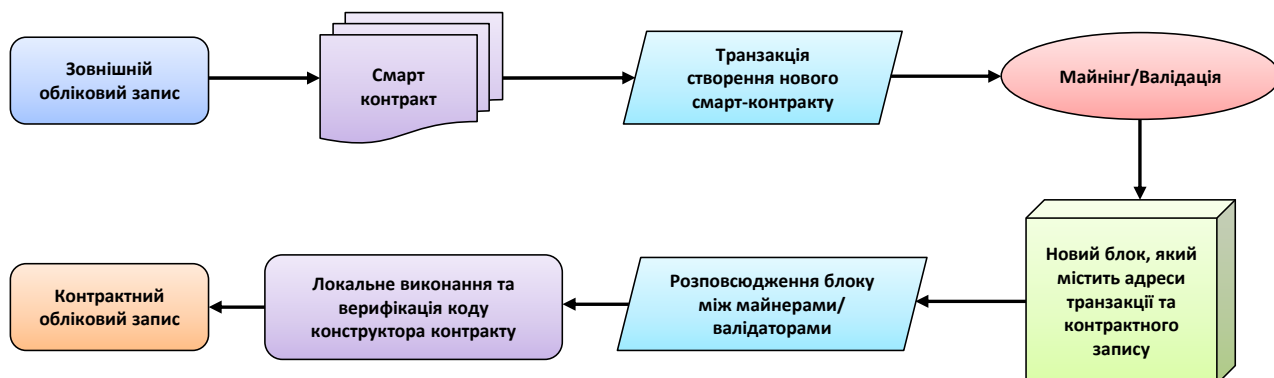


Рис. 1.9. Процес розгортання смарт-контракту.

Система управління мережею може бути реалізована у вигляді децентралізованих додатків. Децентралізований додаток (DAPP – Decentralized Application) - це послуга, яка дозволяє безпосередньо взаємодіяти між кінцевими абонентами та провайдерами послуг (наприклад, з'єднувати абонентів та операторів) [164].

Децентралізовані додатки, як правило, мають власний набір пов'язаних з ними додатків, які вони використовують для кодування бізнес-логіки. Децентралізовані додатки розділяють логіку виконання між блокчейном та пристроєм абонента, так як децентралізоване виконання є затратним. Переважно, блокчейн використовують в ролі “сервера”, який зберігає інформацію про загальний стан децентралізованої системи [165].

DAPP фактично дозволяють децентралізувати усі дані і backend-код, що робить їх незмінними і захищеними від стороннього втручання. Враховуючи децентралізований характер цих додатків і механізми захисту даних блокчейн, DAPP потенційно мають безліч різноманітних варіантів використання [164,165]. Для забезпечення високої швидкодії та пропускну здатності системи, архітектуру додатків необхідно реалізувати таким чином, щоб основне навантаження приймав на себе централізований сервер (дата центр), а важливі дані асинхронно зберігалися в блокчейні (рис. 1.10) [165].

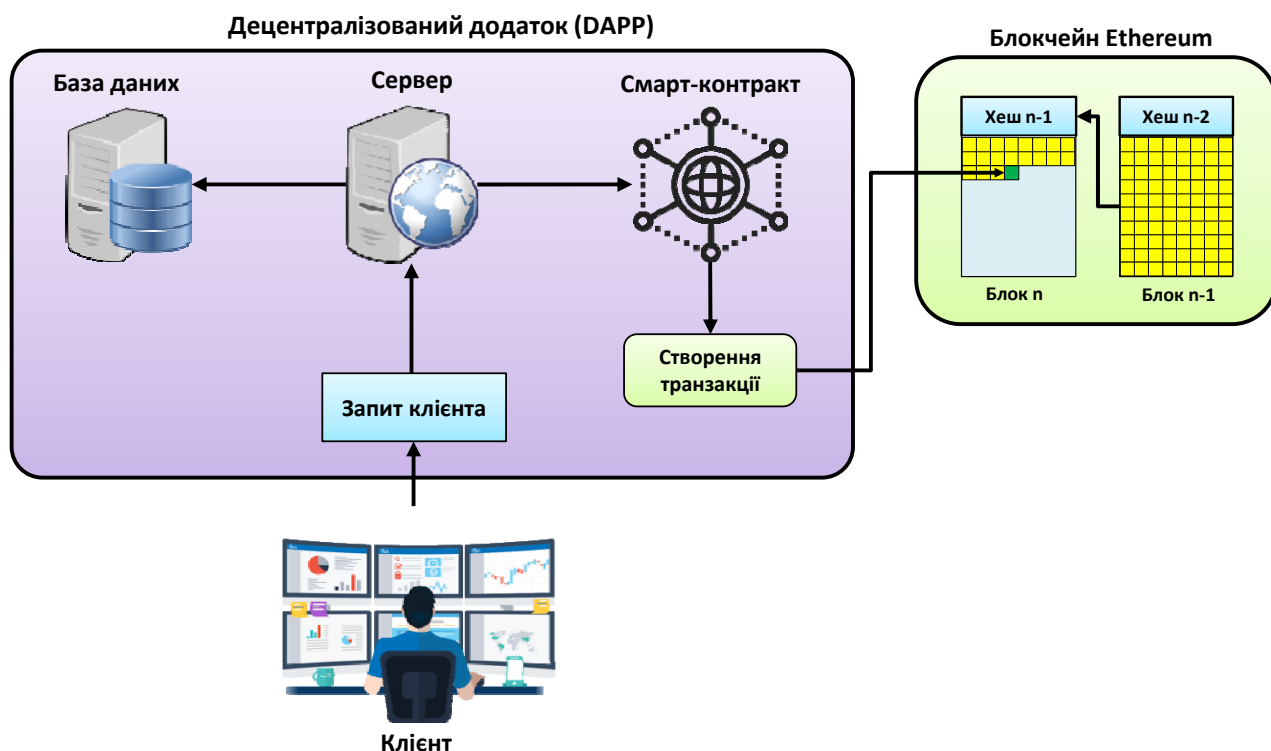


Рис. 1.10. Архітектура клієнт-сервер-блокчейн для децентралізованих додатків.

Децентралізовані додатки, побудовані на основі даного підходу володіють найкращими характеристиками, проте процес розробки стає дорожчим. В таких системах мережа блокчейн по суті виступає гарантом достовірності та цілісності даних. У сховищі блокчейну можна не зберігати повну копію даних, а лише наприклад їх хеш суму, а потім періодично звіряти їх відповідність між блокчейном і базою.

Щоб додаток вважався децентралізованим, він повинен відповідати ряду критеріїв. До критеріїв децентралізованого додатку відносяться [164,165]:

1. Повністю відкритий вихідний код, оскільки всі рішення в DAPP приймаються на основі консенсусу.
2. Автономність незалежно від кількості пристроїв, на яких активований DAPP.
3. Бази даних і звіти повинні зберігатися в публічній області децентралізованого блокчейну.
4. Додаток повинен використовувати криптографічно безпечний токен для доступу до нього.

5. В якості доказу роботи вузлів повинен використовуватися один з прийнятих алгоритмів встановлення консенсусу, наприклад Proof-of-Work (PoW) та/або Proof-of-Stake (PoS) [166].

Наприклад, у мережі Ethereum виділяють три основних види децентралізованих додатків [167]:

- Додатки для управління грошовими переказами: клієнти можуть проводити транзакції один з одним в мережі блокчейн, використовуючи її внутрішню валюту. Такі DAPP зазвичай мають власні блокчейни.
- Додатки, які інтегрують грошові кошти з зовнішніми подіями у реальному світі: наприклад, логістична компанія може з допомогою місцезнаходження чіпу радіочастотної ідентифікації (RFID) визначати, чи досяг вантаж порту, і лише тоді оплачувати перевізнику. Це може бути реалізовано за допомогою коштів в блокчейні, без людського втручання, якщо покупець і продавець заключають смарт-контракт.
- Децентралізовані автономні організації (DAO – Decentralized Autonomous Organization): децентралізовані організації на блокчейні, які не мають єдиного керівника. Вони з самого створення працюють відповідно програмно заданим правилам, які визначають, хто може бути учасником організації, як учасники можуть голосувати, яким бізнесом або якою діяльністю вони можуть займатися, як відбувається обмін токенами, коштами або активами. Після запуску DAO працюють автономно, відповідно своїм правилам. Їх учасники можуть знаходитися в будь-якій точці земної кулі [168].

В подальшому в роботі, під терміном «блокчейн» вважаються саме децентралізовані додатки на основі смарт-контрактів.

#### **1.4.2. Методи інтеграції технології блокчейн у системи хмарних обчислень**

Технологія хмарних обчислень отримала широке застосування протягом останніх років за рахунок підтримки великих обсягів обчислювальних

потужностей та сховища даних, які надаються на вимогу. Очікувано, технологія хмарних обчислень знайшла широке застосування у поєднанні із мережами мобільного зв'язку 4G та 5G для забезпечення різноманітних сервісів для кінцевих абонентів, які потребують обробки великих масивів даних [169]. Парадигма хмарних обчислень відкриває ряд технічних можливостей для мереж 5G, таких як оптимізація інфраструктури мережі мобільного зв'язку, процесів обробки та зберігання даних, передавання контенту 5G, управління ресурсами [170]. Особливо актуальною для умов ультра щільного розгортання мереж мобільного зв'язку є технологія Cloud-RAN, яка використовує централізований хмарний контролер як пул блоків обробки сигналів (BBU – Baseband Unit) [171]. За рахунок централізованого координованого формування сигналів одночасно для великої кількості комірок Cloud-RAN може забезпечити високу спектральну та енергетичну ефективність.

Проте, в існуючих моделях хмарних обчислень все ще залишаються нерозв'язаними питання безпеки мережі та персональних даних. Не зважаючи на те, що централізовані хмарні сервіси є доволі зручними для кінцевих абонентів, така парадигма викликає критичні занепокоєння щодо конфіденційності даних абонентів, враховуючи те, що великі обсяги різних даних, які передаються у мережах мобільного зв'язку та Інтернету речей передаються, зберігається та використовується в динамічних хмарних середовищах. Середньостатистичні кінцеві абоненти довіряють свої персональні дані провайдерам хмарних сервісів, не замислюючись над тим хто їх в подальшому використовує. Таким чином, довіряючи захист свої даних третій стороні, користувачі ризикують втратити їх конфіденційність, а також несуть супутні ризики, пов'язані із можливим використанням цих даних зловмисниками.

Для вирішення вищезгаданих проблем ряд дослідницьких груп інтегрують технологію блокчейн для ефективного вирішення вищезазначених проблем безпеки в мережах 5G. Наприклад, в роботі [172] використовується блокчейн для побудови платформи автоматичної автентифікації IoT пристроїв в мережі

Cloud-RAN на основі смарт-контрактів. Використання смарт-контрактів на основі децентралізованого консенсусу в мережі блокчейн дає змогу уникнути використання централізованої бази даних кінцевих абонентів, що усуває ризики відмови доступу до мережі у випадку атаки на головний сервер. У цьому ж напрямку, дослідження [173] застосовує блокчейн для побудови надійної архітектури автентифікації для мереж Cloud-RAN за довіреною угодою між постачальниками послуг Інтернету речей та кінцевими абонентами. Запропонований підхід дає змогу знизити експлуатаційні витрати та підвищити ефективність використання спектру в мережі мобільного зв'язку. У роботі [174], запропоновано хмарно-орієнтовану структуру системи IoT, яка використовує блокчейн смарт-контракти для контролю за цілісністю та валідністю даних. В запропонованій системі хешовані метадані IoT зберігаються в мережі блокчейн, у той час як фактичні дані зберігаються в хмарному сховищі, що забезпечує кращу масштабованість в умовах великої густини IoT пристроїв.

Крім того, блокчейн ефективно поєднується із складними хмарними системами для 5G та IoT для координованого та прозорого надання сервісів. Зокрема, в роботі [175] автори запропонували трирівневу архітектуру, яка складається із мережі IoT сенсорів, розподілених хмарних систем та сервісної платформи на основі технології блокчейн. Оскільки дані окремих IoT підсистем зберігаються у відповідних їм приватних хмарних середовищах, технологія блокчейн дає змогу підвищити ефективність функціонування композитних сервісів, які потребують координованої взаємодії кількох незалежних підсистем зі забезпеченням прозорості, довіри та інформаційної безпеки на основі розподілених реєстрів даних [176]. Автори приділяють особливу увагу побудові спільного хмарного блокчейну для зберігання даних, прозорого моніторингу та управління ресурсами, що дає змогу підвищити продуктивність застосувань IoT на пристроях з обмеженими обчислювальними та енергетичними ресурсами.

### **1.4.3. Методи інтеграція технології блокчейн в інфраструктуру граничних обчислень**

Технологія мобільних граничних обчислень МЕС (Mobile Edge Computing) є однією із ключових структурно-функціональних елементів мереж мобільного зв'язку 5G. За своїм функціональним призначенням граничні обчислення ідентичні до хмарних обчислень, проте сервери мають менші обсяги ресурсів та територіально розподілені в безпосередній близькості до кінцевих абонентів. Така парадигма забезпечує високоефективне обчислення даних мереж 5G та IoT із значно меншою затримкою передавання даних та більш оперативним наданням сервісів, порівняно з хмарними обчисленнями [177]. Розподілена структура граничних обчислень у поєднанні із належним покриттям мереж мобільного зв'язку дає змогу забезпечити повсюдний комп'ютинг, кращу масштабованість та контекстну орієнтованість сервісів, зменшення завантаженості транспортної інфраструктури, а також балансування навантаження [178].

Висока мобільність абонентів у мережах 5G потребує гнучкості та динамічності обчислювальної системи. Зокрема, важливим аспектом технології мобільних граничних обчислень є міграція сервісних компонент, таких як віртуальні машини та контейнери. Проте, процес міграції сервісних компонент, які включають конфіденційну інформацію абонентів є вразливим до зовнішніх атак перехоплення, відмови в обслуговуванні, тощо [179,180].

Для вирішення вищезазначених проблем, у роботі [181] запропоновано розподілену систему автентифікації та обміну інформацією між різними граничними серверами на основі технології блокчейн. Запропонована система зберігає інформацію про доступ абонентів в блокчейн, що дає змогу відстежувати та регулювати діяльність мобільних пристроїв на основі смарт-контрактів, без централізованої системи моніторингу та контролю мережі.

У роботі [182] запропоновано метод економічного регулювання процесу спільного використання обчислювальних ресурсів МЕС-системи на основі використання розподілених реєстрів блокчейн. Розподілені реєстри блокчейн



можна розглядати як децентралізовану базу даних, яка верифікує усі транзакції пов'язані із змінами в реєстрі на основі децентралізованого консенсусу. Реєстри блокчейн можна розглядати як розподілену базу даних, яка зберігає дані без можливості їх подальшої модифікації за рахунок включення криптографічного хешу попереднього блоку у наступний за ним блок. Варто зазначити, що масштабованість блокчейну є досить складним завданням враховуючи експоненційне зростання складності обчислень при зростанні кількості транзакцій, що в свою чергу знижує пропускну здатність та збільшує затримку [148]. Тому, запропоновано децентралізовану платформу сховища великих даних, таку як міжпланетна файлова система (IPFS – InterPlanetary File System), яка використовує розподілену хеш-таблицю для верифікації даних [183]. Інтеграція такої блокчейн-платформи з мережами МЕС дає змогу знизити ризики втрати цілісності даних та їх несанкціонованого перехоплення у динамічних мережах граничних обчислень [184].

Крім того, блокчейн може безпосередньо підтримувати обчислювальні процеси в мережах граничних обчислень. Зокрема, блокчейн дає змогу забезпечити автентифікацію абонентів для захисту МЕС-систем, як вже згадувалось вище. У роботі [185] запропоновано систему захисту від несанкціонованого доступу та послідовної автентифікації абонентів на рівні граничних та туманних обчислень. Основною метою такої системи є моніторинг та перевірка всіх обчислювальних завдань, які надходять на МЕС-сервери, що захищає їх від зовнішніх атак. У роботі [186], автори пропонують використання смарт-контрактів для підвищення ефективності обчислень застосувань IoT, за рахунок точного, узгодженого та прозорого механізму визначення походження файлів. Крім того, дані транзакцій також шифруються та зберігаються у блоках, що може забезпечити конфіденційність та безпеку для мережі мобільних граничних обчислень [186].

#### **1.4.4. Децентралізація процесу управління мережною інфраструктурою з використання технології програмно-конфігурованих мереж**

Програмно конфігуровані мережі (SDN – Software Defined Networks) є однією із ключових технологій для розвитку мереж мобільного зв'язку 5G/6G. Архітектура SDN, яка передбачає поліпшення програмованості та гнучкості мереж за рахунок відокремлення площини управління від площини передавання даних та забезпечення централізованого управління процесом функціонування мережі мобільного зв'язку з використанням SDN контролера, який координує взаємозв'язок між гетерогенними сегментами мережі [187]. Така архітектура забезпечує не лише більш гнучкі можливості стосовно розгортання та управління інфраструктурою, але й значно вищу якість обслуговування абонентів за рахунок більш ефективного використання мережних ресурсів.

Однією із основних проблем, які постають перед технологією SDN у мережах мобільного зв'язку, є масштабованість. На відміну від фіксованих мереж, у мережах мобільного зв'язку постає проблема спільного використання радіочастотних ресурсів з уникненням інтерференції між різними провайдерами послуг мобільного зв'язку. Враховуючи мобільність кінцевих абонентів та значні варіації трафіку в мережі, навантаження на SDN-контролери є значно вищим, особливо у великих містах із високою густиною базових станцій. Тому, важливо розгортати програмно-конфігуровані мережі мобільного зв'язку з розподіленими контролерами SDN, які взаємодіють між собою по захищених каналах зв'язку, що дасть змогу знизити витрати на обслуговування мережі, підвищити її гнучкість та масштабованість, а також забезпечити динамічне впровадження нових послуг для задоволення нових потреб ринку мобільного зв'язку [188].

Таким чином, розроблення децентралізованої архітектури SDN є важливим завданням для забезпечення ефективної взаємодії усіх сегментів гетерогенної мультиоператорної інфраструктури з точки зору адаптивного спільного

використання ресурсів та координованого надання сервісів у мережах мобільного зв'язку 5G/6G [153].

У роботах [189-194], автори пропонують використання блокчейну для автентифікації в програмно-конфігурованих мережах 5G, що дає змогу операторам обмінюватись інформацією про абонентів, знижуючи таким чином обсяги службової інформації при здійсненні процедури хендоверу. За рахунок інтеграції усіх SDN контролерів в мережі блокчейн, запропонована система забезпечує ефективне децентралізоване управління глобальними політиками в мережі, включаючи автентифікацію абонентів, гарантування якості сервісу, управління мобільністю та балансування навантаження. Завдяки незмінності даних та децентралізованій архітектурі, блокчейн забезпечує механізм довіри між різними операторами мереж мобільного зв'язку з точки зору спільного використання радіочастотних ресурсів та мережної інфраструктури.

Для досягнення високоефективного та відмовостійкого контролю мережної інфраструктури у дослідженні [195] використовується блокчейн для інтеграції різних доменів площини управління у програмно конфігурованих оптичних мережах. На рівні протоколу OpenFlow, кожен контролер у площині управління завантажує реєстр даних мережі, який верифікується шляхом консенсусу між контролерами та використовується для автоматизованого управління процесом функціонування оптичної мережі на основі смарт-контрактів.

#### **1.4.5. Моделі децентралізованого управління віртуалізованими мережними функціями з використанням технології блокчейн**

Віртуалізація мережних функцій (NFV – Network Function Virtualization) - це стандартизована Європейським інститутом стандартів телекомунікацій (ETSI) технологія, яка полягає у програмній реалізації незалежних мережних компонентів з використанням стандартного, не пропрієтарного обладнання [196]. NFV складається з трьох основних архітектурних компонент, а саме інфраструктури віртуалізації мережних функцій (NFVI), безпосередньо віртуалізованих мережних функцій (VNF) та системи управління та оркестрації

(MANO), яка відповідає за управління життєвим циклом та оркестрацією фізичних та програмних ресурсів [197]. NFV реалізує мережні функції, без прив'язки до апаратних пристроїв, забезпечуючи таким чином зменшення витрат операторів на обладнання, автоматизацію експлуатації мережі та гнучкість до модифікацій мережної інфраструктури [197].

Однак, враховуючи можливість розгортання віртуалізованих мережних функцій в хмарних середовищах різних провайдерів, а також можливість використання хмарної інфраструктури кількома операторами, забезпечення ефективних механізмів захищеного зв'язку між оркестратором та фізичними машинами є актуальною проблемою [198,199].

Завдяки автентичності, цілісності та неможливості модифікації даних, блокчейн дає змогу підвищити ефективність використання технології NFV у трьох основних аспектах мереж мобільного зв'язку [200-204].

По-перше, блокчейн забезпечує надійну, просту та гнучку оркестрацію віртуальних мережних функцій VNF для більш ефективного управління мережею. По-друге, блокчейн забезпечити надійну доставку мережних функцій та забезпечити цілісність системи як проти внутрішніх, так і від зовнішніх атак. По-третє, блокчейн дає змогу здійснювати аудит даних та моніторинг стану мережі в процесі її функціонування.

У роботі [200], автори пропонують систему управління оркестрацією мережних функцій на основі відкритої блокчейн платформи. Запропонована система використовує консенсусний протокол консенсусу PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance). Запропонована система складається з трьох основних модулів: модуль візуалізації, який забезпечує інтерфейс між замовниками та сервісами NFV; модуль оркестрації, який відповідає за виконання інструкцій, переданих замовниками через модуль візуалізації; блокчейн-модуль, який перевіряє та підтверджує транзакції перед їх виконанням модулем оркестрації. Завдяки реєстрації всіх виконуваних інструкцій, які відповідають за процес надання послуг, у мережі блокчейн, запропонована система гарантує достовірність, цілісність, безпеку даних абонентів та прозорість процесу

спільного управління та використання мережних функцій NFV в мультидоменних середовищах.

Для виявлення несправностей конфігурації VNF, у роботі [201] автори пропонують блокчейн-систему для перевірки операцій оркестрування мережних сегментів (слайсів) та оновлення конфігурацій VNF. Запропонована система базується на двох смарт-контрактах, які підтримують конкретні формати транзакцій для безпечного управління мережевими сегментами та конфігураціями VNF. Автори використовують платформу Hyperledger Fabric для управління цифровими сертифікатами кожного вузла та прозорого аудиту усіх операцій з віртуалізованими мережними функціями.

У роботі [202] представлено метод проведення аукціонів на основі блокчейн для вирішення проблеми оренди та використання мережної інфраструктури NFV. Для забезпечення взаємодії між провайдерами інфраструктури та кінцевими абонентами використовуються розумні контракти, які регулюють процес обміну фінансовими та мережними активами. У роботі [203] запропоновано механізм забезпечення довіри та прозорості при спільному використанні радіочастотних та обчислювальних ресурсів кількох операторів мереж мобільного зв'язку 5G.

В роботі [204] представлено архітектуру на основі блокчейну для безпечного управління конфігурацією віртуалізованих мережних функцій (VNF). Використовуючи властивості незмінності, послідовності та прозорості блокчейн транзакцій, які забезпечуються механізмом децентралізованого консенсусу, запропонована система забезпечує можливість міграції конфігурацій VNF між різними провайдерами інфраструктури та сервісів у мережах мобільного зв'язку. Зокрема, блокчейн дає змогу перевірити права доступу абонентів та надати їм відповідні віртуалізовані ресурси NFV для ефективного функціонування сервісів.

#### **1.4.6. Методи децентралізованого управління ресурсами між віртуалізованими слайсами у мережах 5G**

Іншим важливим аспектом функціонування мереж 5G є технологія логічного розділення інфраструктури (слайсинг). Логічне розділення інфраструктури мережі використовується для ефективної підтримки різних типів сервісів у системах 5G та IoT [56]. Дана технологія полягає у створенні декількох віртуальних мереж, які працюють поверх спільної фізичної мережної інфраструктури [205]. Така технологія дає змогу операторам зв'язку розподіляти свої ресурси між різними сервісами. Крім того, логічне розділення дає змогу операторам спільно використовувати фізичну мережну інфраструктуру та радіочастотні ресурси. Логічне розділення мережі здійснюється повністю програмним чином шляхом розгортання віртуальних машин та контейнерів, які реалізують віртуальні мережні функції (VNF) у межах окремих пулів апаратних ресурсів [206]. Реалізація логічного розділення потребує наявності ефективних механізмів адаптивного розподілу мережних ресурсів [207], [208].

У такому контексті, технологія блокчейн відкриває великі можливості для управління логічними слайсами в мережі 5G. У роботі [209] автори використовують блокчейн для динамічного контролю надійності логічного сегменту зв'язку для транспортних засобів V2V (Vehicle-to-Vehicle) та V2X (Vehicle-to-Everything). Сегменти для транспортних засобів оперуються контент-орієнтованою мережею (CCN – Content-Centric Network), у якій транспортні засоби можуть безпечно обмінюватися інформацією про дорожній рух з іншими транспортними засобами або службами безпеки дорожнього руху, використовуючи розподілені реєстри даних блокчейн. В такій системі, блокчейн діє як проміжний рівень безпеки між транспортними засобами та мережною інфраструктурою, забезпечуючи таким чином надійність системи від вторгнення та розповсюдження неправдивої інформації про дорожньо-транспортну обстановку, яка може привести до значних негативних наслідків економічного та соціального характеру. Крім того, запропонований підхід дає

зможу здійснювати динамічний контроль цілісності та достовірності інформації, якою обмінюються транспортні засоби. Для того, щоб забезпечити захищеність транзакцій між провайдером віртуального сегменту мережі та провайдером ресурсів фізичної інфраструктури мережі 5G, у роботі [210] використовується технологія блокчейн для створення платформи-посередника. В такому випадку, коли оператор логічного сегменту надсилає запит на встановлення наскрізного слайсу, блокчейн верифікує наявність достатньої кількості ресурсів та гарантує їх доступність для логічного сегменту протягом його життєвого циклу. Даний механізм працює на основі індивідуальних смарт-контрактів для кожного слайсу, які відповідають за процес управління ресурсами. Такий підхід дає змогу провайдерам послуг динамічно змінювати розміри своїх слайсів, шляхом торгівлі ресурсами з іншими провайдерами мережних слайсів, в межах єдиної фізичної інфраструктури. Процес торгівлі ресурсами координується брокером, який забезпечує безпечне та справедливе функціонування мережі мобільного зв'язку.

У роботі [211] проведено дослідження концепції мережевого слайсингу на основі блокчейн, з точки зору часу розгортання послуг, автономності та динамічності. Результати показали, що технологія блокчейн відіграє важливу роль у встановленні взаємних довірчих відносин між операторами в процесі управління віртуальними сегментами мережі 5G, забезпечуючи нові наскрізні бізнес-моделі, включаючи розумні міста, Індустрію 4.0, а також інші сегменти інфраструктури Інтернету речей.

У роботі [212] запропоновано архітектуру віртуалізації радіочастотних ресурсів на окремі частотно-часові слайси для їх спільного використання кількома віртуальними операторами мобільного зв'язку MVNO. Кожна транзакція містить інформацію про зміну розподілу смуги пропускання між операторами, максимальну потужність передавання в каналі та швидкість передавання даних, яку гарантує MVNO під час обслуговування своїх абонентів. Усі транзакції верифікуються та реєструються у блокчейн для забезпечення ефективного прозорого управління ресурсами.

Схожий підхід використовується у роботі [213], де блокчейн використовується віртуальними операторами мобільного зв'язку для передавання в суборенду слайсів радіочастот від постачальників інфраструктури мережі. Блокчейн в такому випадку використовується для побудови схеми розподілу частот мережних слайсів на основі репутації, що дає змогу мінімізувати затримки в процесі обслуговування.

Блокчейн також пропонується для підтримки сценарію розвантаження обчислень в мережах "пристрій до пристрою" (D2D – Device-to-Device) у роботі [214]. D2D дає змогу мобільним пристроям (таким як смартфон, планшет, тощо) взаємодіяти безпосередньо один з одним без використання коміркової інфраструктури, що дає змогу підвищити сумарну пропускну здатність системи та знизити навантаження на базові станції [215]. У [214] запропоновано децентралізовану платформу для координації процесу розвантаження обчислень, на основі блокчейну, що дає змогу керувати розподілом завдань та винагород між абонентами, із збереженням статистичної інформації у блокчейн. Завдяки прозорості та довірі до транзакцій блокчейн забезпечує децентралізований процес взаємодії абонентів через канали D2D без централізованого контролю з боку оператора мобільного зв'язку. При цьому, дані надійно передаються через канали D2D, а також надсилаються до граничних серверів для кешування контенту та підтримки сервісів, які потребують великих обчислювальних ресурсів.

### **1.5. Систематизація основних нерозв'язаних завдань для синтезу децентралізованої інфраструктури мереж мобільного зв'язку 5G/6G**

Першочерговим завданням при синтезі складних гетерогенних систем є чітке формулювання критеріїв ефективності та класифікація факторів, які безпосередньо або опосередковано впливають на ці критерії. Зокрема, враховуючи особливості мереж мобільного зв'язку, варто виокремити ендогенні та екзогенні фактори впливу. До ендогенних факторів можна віднести ті, які безпосередньо залежать від дій оператора мобільного зв'язку,



таких як конфігурація елементів мережної інфраструктури з точки зору вибору стандартів зв'язку та режимів функціонування, а також планування ресурсів, розподіл пропускної здатності між абонентами, пріоритезація абонентів, тощо. До екзогенних факторів відноситься фактори, на які оператор не може впливати, такі як мобільність абонентів, обмеження радіочастотного ресурсу, а також економічні та правові обмеження. Взаємозв'язок між факторами впливу та відповідними їм показниками ефективності представлено на рис. 1.11.

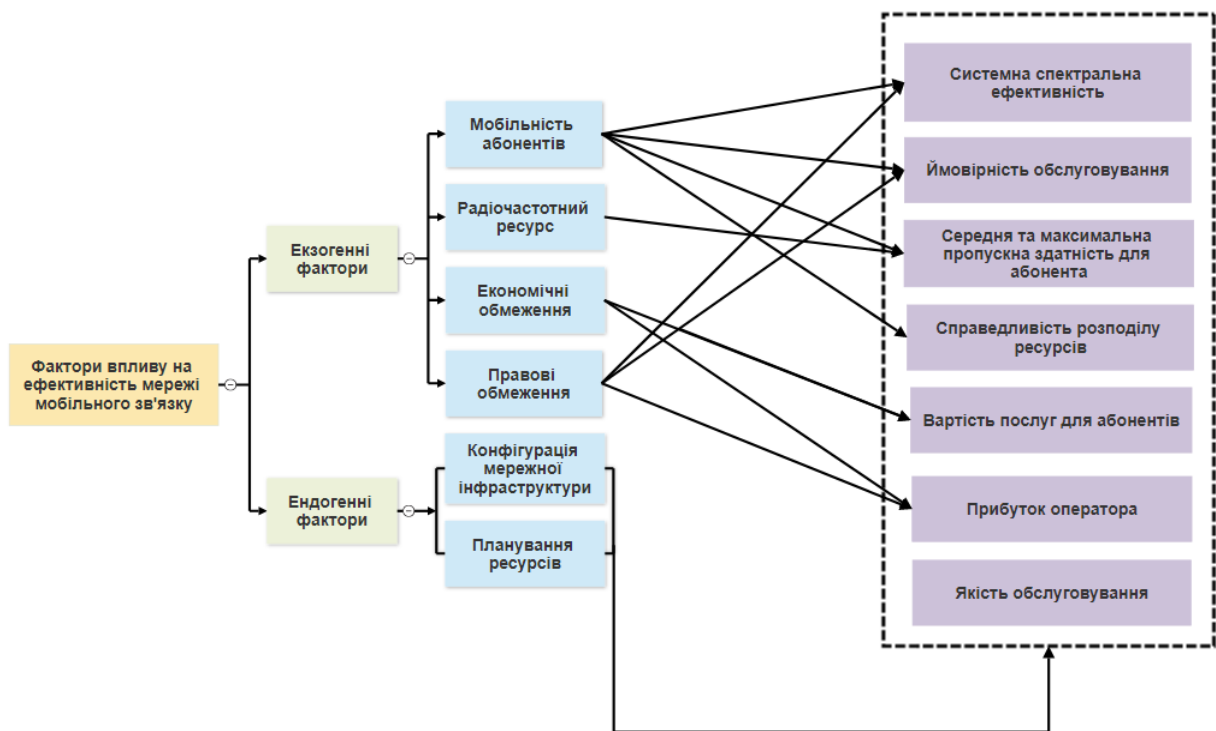


Рис. 1.11. Сукупність взаємопов'язаних проблем для синтезу децентралізованої мультиоператорної системи мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням.

Таким чином, для забезпечення вимог до ефективності функціонування мережі, оператори мобільного зв'язку повинні оптимізувати процеси управління мережною інфраструктурою з метою компенсації впливу екзогенних факторів. Особливо складним це завдання постає при розширенні безпроводної та транспортної інфраструктури, а також зростанні кількості абонентів, в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу для їх обслуговування.

Основним обмеженням інтелектуального управління мережною інфраструктурою з використанням алгоритмів штучного інтелекту є доволі складний навчальний процес. Для досягнення необхідної ефективності, їм потрібен тривалий час для навчання з використанням реальних наборів даних. З іншого боку, можна обмежитися менш складними сценаріями навчання, такими як менша кількість доступних каналів, менша кількість абонентів та комірок, або спрощені моделі радіоканалів. Проте, навіть при досягненні значної ефективності методів штучного інтелекту, невирішеною залишається проблема ефективного використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури.

Тому, в короткостроковій перспективі, поточна централізована модель побудови та експлуатації мережної інфраструктури неминуче зміниться на більш гнучку децентралізовану модель із відкритим ринком радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури. Децентралізована модель стимулюватиме появу великої кількості мікро-операторів, які будуть вузько-орієнтованими на вирішення певних потреб економіки та суспільства. Проте, така модель потребує механізмів довіреного децентралізованого управління, які б дали змогу незалежно координувати використання радіочастотного ресурсу для територіально рознесених зон покриття. Зокрема, на сьогоднішній час, немає методів ліцензування радіочастотних ресурсів з поділом на окремі територіальні зони, які б дали змогу операторам розгортати регіональні мережі мобільного зв'язку в окремих містах, районах чи областях із значно меншими капітальними та експлуатаційними витратами.

З іншого боку, децентралізована модель ускладнює процес управління мережною інфраструктурою та радіочастотним ресурсом, оскільки виникає необхідність узгодження конфігурацій між великою кількістю операторів. Децентралізація систем мобільного зв'язку створює ряд викликів, які не характерні для існуючих централізованих мереж. Зокрема, існує невизначеність з точки зору мобільності абонентів між мережами мікро-операторів, враховуючи їх обмежені зони обслуговування. Динамічна зміна мережі

оператора ускладнює процедуру тарифікації та забезпечення якості обслуговування для абонента. Крім того, в централізованій моделі, оператори незалежно здійснюють синтез власної коміркової інфраструктури в рознесених частотних діапазонах. При децентралізованій моделі, усі оператори повинні координовано синтезувати фізичну коміркову інфраструктуру як одне ціле, що потребує удосконалення існуючих підходів. Також постає питання узгодження даних моніторингу мережної інфраструктури між операторами з точки зору основних показників ефективності функціонування мережі для забезпечення ефективного навчання алгоритмів управління на основі штучного інтелекту. Крім того, на сьогоднішній час немає механізмів наскрізного управління інформаційними потоками із забезпеченням вимог до якості обслуговування при передаванні трафіку різних операторів у межах єдиної транспортної мережної інфраструктури.

Таким чином, в сучасних умовах розвитку мереж мобільного зв'язку виникає **протиріччя** між потребою у *централізованій моделі* управління інфраструктурою та радіочастотними ресурсами в мережі мобільного зв'язку на основі штучного інтелекту, для забезпечення її ефективності за множиною *технічних* показників та потребою у *децентралізованій моделі* гнучкого розгортання мереж мобільного зв'язку в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури, для забезпечення її ефективності за множиною *економічних* показників (рис. 1.12).

Розв'язок даного протиріччя потребує створення нової концепції побудови децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка інтегрує методи та засоби штучного інтелекту із інфраструктурою блокчейн, що дасть змогу поєднати переваги централізованої та децентралізованої моделей побудови мережної інфраструктури, усуваючи при цьому їх характерні недоліки та обмеження.

Зокрема, у даній роботі блокчейн використовується для розширення можливостей розподіленої та віртуалізованої мережної інфраструктури та спрощення взаємодії між регулятором спектру, операторами та кінцевими абонентами на основі смарт-контрактів та криптовалют.

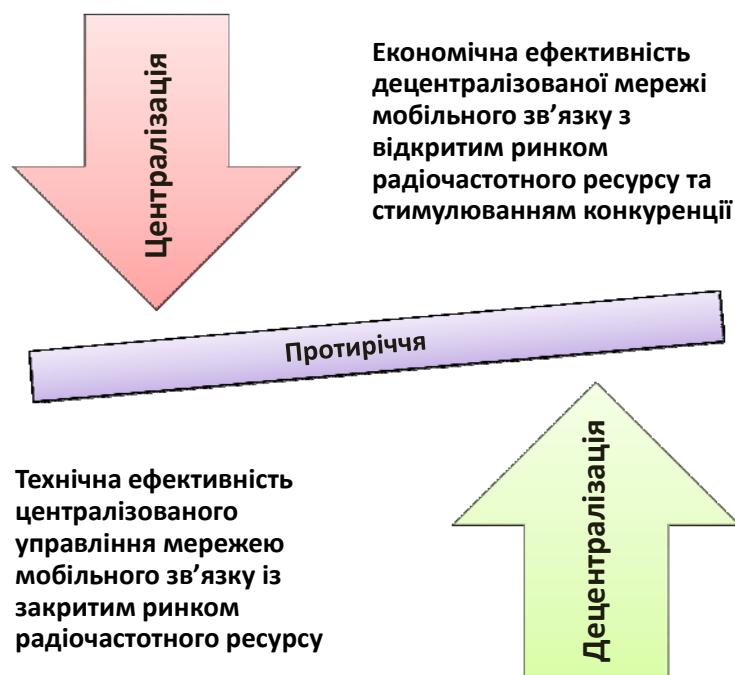


Рис. 1.12. Протиріччя між централізацією та децентралізацією інфраструктури мереж мобільного зв'язку.

В рамках проблематики, що розглядається у даній дисертаційній роботі необхідно виділити сукупність першочергових взаємопов'язаних проблем, вирішення яких у комплексі дасть змогу підвищити техніко-економічну ефективність децентралізованих систем мобільного зв'язку в національному масштабі (рис. 1.13):

1. Для вирішення проблеми інтелектуального управління мережами мобільного зв'язку необхідно розробити сукупність методів штучного інтелекту для розв'язку задач синтезу топологічної структури мережі, адаптивного управління радіочастотними ресурсами ліцензійного та неліцензійного діапазонів, прогнозування інформаційних потоків у транспортних мережах, управління контентом для абонентів.

2. Для вирішення проблеми автоматизованого управління складними розподіленими системами необхідно розробити нову гнучку архітектуру програмно-конфігурованої мережі мобільного зв'язку з повною віртуалізацією мережних функцій для забезпечення її універсальності для будь-яких

стандартів безпроводного зв'язку та типів мобільних пристроїв, із забезпеченням автоматизованої конфігурації елементів мережної інфраструктури в режимі реального часу.

3. Для забезпечення децентралізації системи мобільного зв'язку в національному масштабі необхідно розробити технологічні передумови для відкритого ринку мобільного зв'язку з підтримкою державного регулювання, шляхом використання смарт-контрактів на основі блокчейн платформи, які б дали змогу операторам прозоро взаємодіяти один з одним, обслуговувати абонентів без прив'язки до одного оператора та функціонувати в рамках регуляторних обмежень.



Рис. 1.13. Сукупність взаємопов'язаних проблем для синтезу децентралізованої мультиоператорної системи мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням.

На основі систематизації усіх вищенаведених аспектів, сформовано ряд завдань дисертаційного дослідження, окреме розв'язання яких у комплексі дасть змогу досягти синергетичного ефекту підвищення техніко-економічної ефективності мультиоператорної мережі мобільного зв'язку шляхом децентралізованого інтелектуального управління інфраструктурою.

Таким чином, сформовано структурно-логічну схему досліджень, яка представлена на рис. 1.14

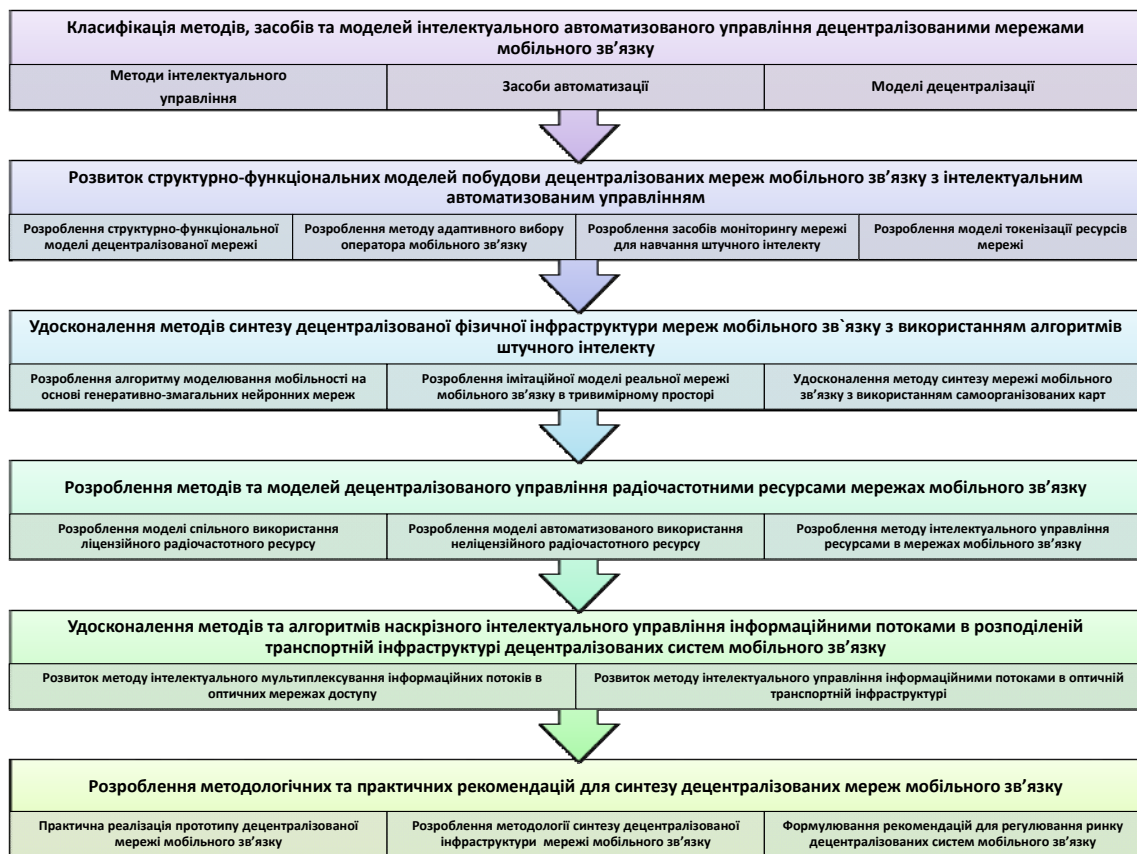


Рис. 1.14. Структурно-логічна схема дисертаційного дослідження.

## 1.6. Висновки до 1-го розділу.

Проведено аналіз існуючих методів та моделей управління гетерогенною мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку. Зокрема, проаналізовано тенденції впровадження елементів штучного інтелекту в системах автоматизованого управління ключовими аспектами функціонування мережі, розглянуто існуючі підходи до збору та аналізу великих обсягів даних мережі, визначено основні світові тенденції техніко-економічного розвитку ринку мобільного зв'язку, а також класифіковано ендегенні та екзогенні фактори, які впливають на ефективність функціонування мережі. В результаті проведеного аналізу, систематизовано сукупність взаємопов'язаних проблем, вирішення яких у комплексі дає змогу підвищити техніко-економічну ефективність децентралізованих систем мобільного зв'язку в національному масштабі.

## РОЗДІЛ 2. РОЗВИТОК СТРУКТУРНО-ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОДЕЛЕЙ ПОБУДОВИ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ АВТОМАТИЗОВАНИМ УПРАВЛІННЯМ

### 2.1. Структурно-функціональна модель мультиоператорної мережі мобільного зв'язку з автоматизованим децентралізованим управлінням

Запропонована структурно-функціональна модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку складається із площини абонентів, площини мережної інфраструктури, площини операторів, площини децентралізації та площини інтелектуального управління, які взаємодіють одна з одною. (рис. 2.1) [216-219].

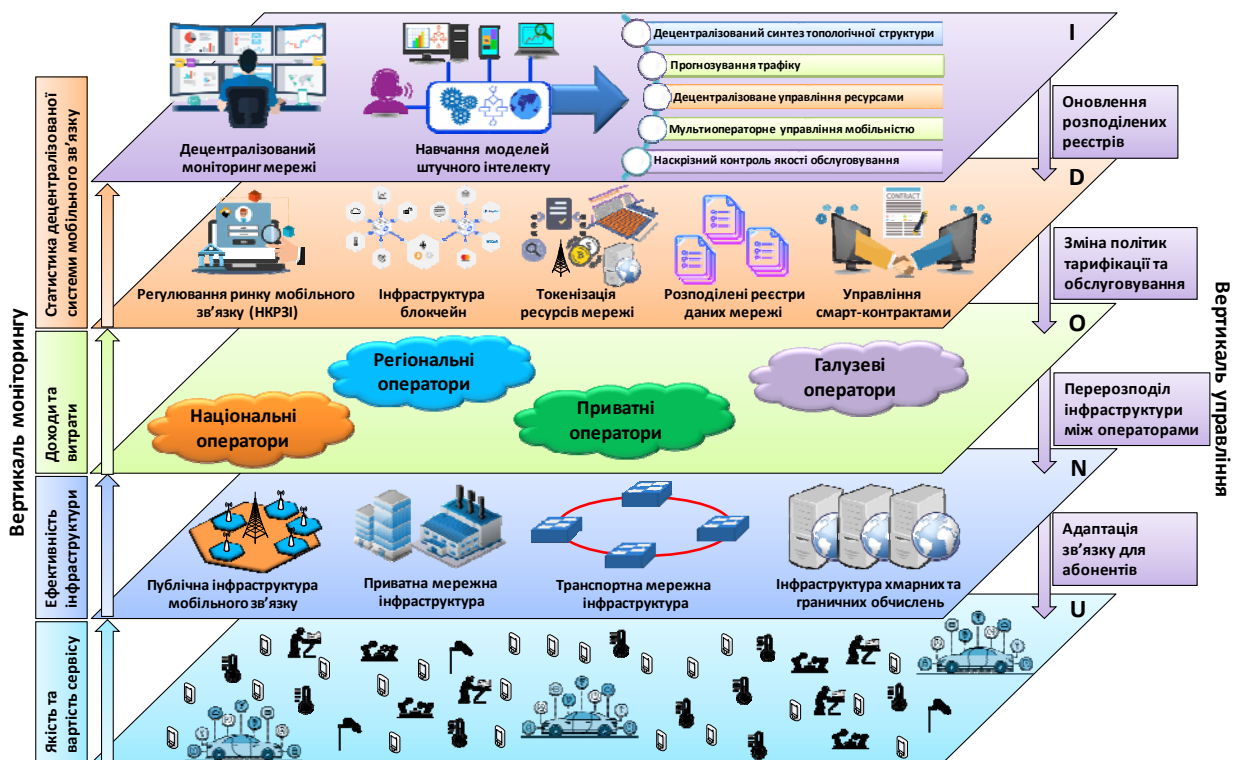


Рис. 2.1. Мультиплощинна архітектура мультиоператорної мережі мобільного зв'язку з автоматизованим децентралізованим управлінням на основі штучного інтелекту.

В площині абонентів ( $U$ ) здійснюється контроль за показниками якості та вартості сервісу. Площина мережної інфраструктури ( $N$ ) забезпечує обслуговування абонентів в мережі на фізичному та каналному рівнях,

охоплюючи гетерогенну коміркову інфраструктуру мереж мобільного зв'язку, точки доступу Wi-Fi, з'єднання типу D2D (Device-to-Device), MTC (Machine Type Communications), V2x (Vehicle-to-Everything), Starlink, транспортні канали зв'язку, а також інфраструктуру хмарних та граничних обчислень.

В площині операторів (*O*) здійснюється розподіл ресурсів мережної інфраструктури між операторами, в залежності від їх поточних техніко-економічних стратегій, а також укладаються угоди SLA (Service Level Agreement) між операторами та абонентами.

Площина децентралізації (*D*) здійснює регулювання процесу функціонування децентралізованих систем мобільного зв'язку з використанням розподілених реєстрів даних на основі технології блокчейн. Зокрема, в даній площині зберігаються реєстри радіочастотного ресурсу, мережної інфраструктури, операторів, абонентів та угод SLA. Блокчейн в даному контексті виконує функції нотаріального засвідчення коректності даних та прав доступу окремих абонентів чи операторів до їх зчитування або модифікації, що забезпечує технологічні передумови для автоматизованого регулювання ринку мобільного зв'язку на основі смарт-контрактів. Використання смарт-контрактів дає змогу автоматизувати процес спільного використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури, шляхом продажу або обміну токенизованих активів, забезпечуючи при цьому належний рівень довіри між операторами. Крім того, використання розподіленої блокчейн інфраструктури забезпечує наскрізну автентифікацію абонентів у мережі будь-якого оператора на основі публічного ключа у мережі блокчейн. В свою чергу, оператори мають змогу обмінюватись даними, для забезпечення неперервного обслуговування абонентів при хендвері абонентів між своїми мережами [217].

Площина інтелектуального управління (*I*) відповідає за управління процесом функціонування розподіленої мультиоператорної інфраструктури мережі мобільного зв'язку в національному або транснаціональному масштабі для забезпечення якісного зв'язку для абонентів незалежно від їх адміністративно-територіального розташування. Зокрема, в даній площині



здійснюється оптимізація топологічної структури для забезпечення її максимальної ефективності, прогнозування трафіку та управління інформаційними потоками, управління доступом, мобільністю та тарифікацією абонентів, а також управління мережними слайсами та політиками якості обслуговування в децентралізованій мультиоператорній мережі. Дані функції реалізуються на основі моделей штучного інтелекту, які навчаються на основі статистики про основні параметри функціонування мережної інфраструктури [217,218, 220,221].

У наступних підрозділах описуються основні структурні схеми та функціональні характеристики для кожної із представлених площин.

### **2.1.1. Соціально-технологічні аспекти формування інформаційних сервісів та відповідних їм вимог в площині абонентів**

Мережі мобільного зв'язку 5G поставлені перед викликом забезпечення різноманітних вимог до параметрів мережі, що пов'язано із значною гетерогенністю їх застосувань. В загальному, вимоги до послуг у мережі 5G поділяються на три категорії [56]. До першої відноситься широкосмуговий доступ із високою пропускнуою здатністю (eMBB – Enhanced Mobile Broadband) для підтримки мультимедійних послуг, віртуальної та доповненої реальності, та ряду інших сервісів із високими вимогами до швидкості передавання інформації. Такі сервіси характеризуються порівняно невеликою кількістю пристроїв, які повинні одночасно взаємодіяти у мережі. До другої категорії відносяться сервіси масового зв'язку машинного типу (mMTC – Massive Machine Type Communications), що використовуються для підключення різноманітних пристроїв в рамках концепції Інтернет речей (IoT – Internet of Things) [56,216]. Такі сервіси характеризуються низькою пропускнуою здатністю та невисокими вимогами до затримки передавання даних. Проте, mMTC потребують підтримки одночасного функціонування кількох тисяч кінцевих пристроїв в межах одного квадратного кілометра. Третя категорія стосується сервісів, які потребують ультра-низької затримки та високої надійності

доставки даних (URLLC – Ultra-Reliable Low Latency Communications), що пов'язано із важливими застосуваннями на об'єктах критичної інфраструктури (атомні електростанції, системи газопостачання та інші типові об'єкти), або в системах контролю дорожнього руху.

Мережі 5G вже сьогодні здатні підтримувати високий рівень синхронізації між географічно розділеними пристроями [222]. На сьогоднішній час вже підтримуються багато критично важливих сервісів із низькою затримкою, включаючи зв'язок для транспортних засобів, віддалена хірургія, індустриальний Інтернет речей та багато інших [222-225].

У мережах 6G передбачається повсюдне охоплення контексту абонентів в рамках фізичної, віртуальної та змішаної реальності, із забезпеченням миттєвої доставки даних, високої надійності зв'язку та повсюдної доступності незалежно від оператора [5,226,227].

Незважаючи на те, що сучасні смартфони є незамінною частиною нашого життя, швидкі досягнення нових технологій відображення, поява нових надчутливих сенсорів та спеціалізованих обчислювальних процесорів з малою потужністю відкривають нову еру для інтеграції кінцевих пристроїв з органами чуття людини. Зокрема у 6G, технології віртуальної, доповненої та змішаної реальності на основі носимих дисплеїв та датчиків руху, зможуть забезпечити ілюзію повного взаємопроникнення віртуального та фізичного світу, формуючи альтернативну версію реальності, яка повністю змінить поведінку та способи взаємодії абонентів у мережі Інтернет. Сучасні смартфони ймовірно будуть замінені на окуляри, які проектують зображення з надзвичайно високою роздільною здатністю та частотою кадрів. Крім того, зворотній зв'язок абонентів буде забезпечуватися через аудіо гарнітуру та тактильний інтерфейс [228].

Отже, до потенційних пристроїв площини абонентів у запропонованій моделі мережі доцільно віднести також: панорамні високошвидкісні камери; біосенсори для контролю стану здоров'я (наприклад частота серцевих скорочень, артеріальний тиск та нервова активність); спеціалізовані процесори

для комп'ютерної графіки, комп'ютерного зору, обробки даних із датчиків та машинного навчання.

Очікувано, що ефект телеприсутності абонентів стане можливим завдяки отриманню зображень на основі сканування середовища з високою роздільною здатністю, розвитком переносних дисплеїв, мобільних роботів та дронів, які будуть об'єднуватись у мережі мобільного зв'язку. В умовах викликів на зразок пандемії COVID-19, потреба у віддаленому спілкуванні та віртуальній присутності стає актуальною для широких мас абонентів. Зокрема, ефект телеприсутності може бути досягнутий шляхом зйомки, передавання та рендерингу 3D-голографічного зображення, у комбінації із даними датчиків руху, які фіксуються для кожного учасника зустрічі в режимі реального часу [9, 229,230]. Це дасть змогу забезпечити зовсім інший рівень сприйняття послуг абонентом та забезпечить нові можливості для різноманітних застосувань таких як дистанційне навчання, робота, телемедицина, участь у масових соціальних заходах, тощо.

Іншим вагомим напрямком розвитку сервісів у площині абонента є системи управління автономними транспортними засобами [231]. Ці транспортні засоби можуть включати легкові автомобілі, які забезпечують переміщення людей між будинками та робочими місцями чи школами, а також автономні вантажівки, які забезпечують доставку товарів. Кожен такий транспортний засіб буде оснащений багатьма датчиками, включаючи камери, лазерні сканери, одометри, акселерометри, гіроскопи, тощо [8]. Для забезпечення їх функціонування необхідно буде підтримувати стабільний зв'язок у мережах мобільного зв'язку, для об'єднання даних з багатьох джерел та прийняття швидких рішень про керування транспортним засобом, враховуючи локально створену карту його найближчого оточення, інформацію про інші транспортні засоби, людей, тварин, споруди або небезпеки, які можуть призвести до аварійної ситуації. Для цього, необхідно щоб інфраструктура мережі мобільного зв'язку забезпечувала надвисоку надійність, низьку затримку та високу пропускну здатність [56,82]. Теоретично, технології зв'язку

6G повинні досягти продуктивності мережі, яка переважає здатність людини сприймати флуктуації при наданні сервісу та виявляти зміну їх рівнів якості. Проте, поява нових, не відомих раніше сервісів неодмінно призведе до значно вищих вимог до якості обслуговування, що потребуватиме механізмів їх забезпечення. Незважаючи на те, що аспекти якості сприйняття QoE (Quality of Experience) суттєво залежать від параметрів якості сервісу QoS (Quality of Service), які забезпечує мережа, важливим фактором у мережах наступного покоління постає врахування контексту та індивідуальних атрибутів кінцевих абонентів [223,232].

Як зазначалося вище, досвід використання сервісів абонентом у мережах 6G буде здебільшого пов'язаний з кіберфізичним світом на основі великої кількості факторів для сприйняття. Це означає, що мережа повинна забезпечувати весь або майже весь контекст кінцевих абонентів. Крім того, сервіси, які надаватимуться абонентам будуть об'єднуватись безпосередньо у пристроях абонентів з великої кількості інформаційних потоків, які передаються різними мережами зв'язку та операторами.

Тому, необхідно виділити три ключові фактори, які впливають на якість сприйняття послуг: людський, контекстний та системний [232]. Перший стосується демографічних особливостей абонентів, таких як вік, стать, культура, особистість, настрій, інтерес, тощо. Очевидно, що дані фактори не є статичними і мають властивість змінюватися в часі та просторі. Врахування контексту, доповнює людські фактори шляхом врахування місцезнаходження абонента, оточення, часу, типу діяльності, технічних та економічних можливостей. У підсумку, системні фактори дають інформацію про конфігурацію та стан елементів мережної інфраструктури [232].

Підсумовуючи вищезгадані особливості надання сервісів у сучасних та перспективних мережах мобільного зв'язку, доцільно формалізувати аспекти задоволеності абонентів якістю сервісів. Враховуючи неоднозначну залежність та відсутність прямої математичної кореляції між параметрами інфраструктури мережі мобільного зв'язку та ступенем задоволеності абонентів, у дані роботі

пропонується формалізувати дані параметри у вигляді наступної функції корисності абонента [233]:

$$u(q, p) = [\mu(q - q_{\min}) + (1 - \mu)(p_{\max} - p)] \quad (2.1)$$

де  $q$  – інтегральний параметр якості сервісу, який визначається відповідно до класифікації 5QI (5G Quality Identifier) визначеної 16 релізом стандарту 3GPP TS 23.501 [49] (табл. 2.1-2.3),  $p$  – параметр вартості сервісу нормований по часу,  $q_{\min}$  – мінімальна якість сервісу, яка задовольняє абонента,  $p_{\max}$  – максимальна вартість, яку кінцевий абонент готовий сплатити за відповідний сервіс.

Запропонований критерій  $\mu \in (0,1)$  у виразі (2.1) є важливим для уникнення протиріччя, при якому сервіс з високою вартістю та якістю матиме таке ж значення функції корисності, як і сервіс з пропорційно нижчою вартістю та якістю. Це дає змогу абоненту заплатити вищу ціну при важливій відео-конференції, і водночас мінімізувати свої витрати та знизити навантаження на мережну інфраструктуру, при використанні менш критичних сервісів або при фоновому завантаженні оновлень [219,233].

Таблиця 2.1

Класифікація параметрів якості сервісів у мережах 5G з гарантованою пропускнуою здатністю та критичних до затримки [49].

5QI	Тип	Пріоритет	Затримка, мс	Втрати	Приклад сервісу
82	DC-GBR	1.9	10	$10^{-4}$	Дискретна автоматизація (малі пакети)
83		2.2	10	$10^{-4}$	Дискретна автоматизація (великі пакети)
84		2.4	30	$10^{-5}$	Інтелектуальні транспортні системи
85		2.1	5	$10^{-5}$	Високовольтні системи електропостачання
86		1.8	5	$10^{-6}$	Інтелектуальні транспортні системи

Таблиця 2.2

Класифікація параметрів якості сервісів у мережах 5G з гарантованою пропускнуою здатністю [49].

5QI	Тип	Пріоритет	Затримка, мс	Втрати	Приклад сервісу	
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Голос реального часу	
2		4	150	$10^{-3}$	Відео реального часу	
3		3	50	$10^{-3}$	Ігри в реальному часі, V2X повідомлення, контроль електромереж, автоматизація індустриальних процесів	
4		5	300	$10^{-6}$	Відео не реального часу	
65		0.7	75	$10^{-2}$	Критично важливі голосові сервіси РТТ (Push To Talk)	
66		2	100	$10^{-2}$	Не критично важливі голосові сервіси РТТ (Push To Talk)	
67		1.5	100	$10^{-3}$	Критично важливі відео сервіси	
75		2.5			V2X повідомлення	
71		5.6		150	$10^{-6}$	Потокове мультимедіа у висхідному каналі
72				300	$10^{-4}$	
73				300	$10^{-8}$	
74				500	$10^{-8}$	
76			500	$10^{-4}$		

Таблиця 2.2

Класифікація параметрів якості сервісів у мережах 5G з негарантованою пропускнуою здатністю [49].

5QI	Тип	Пріоритет	Затримка, мс	Втрати	Приклад сервісу
5	Non-GBR	1	100	$10^{-6}$	IMS сигналізація
6		6	300	$10^{-6}$	Відео не реального часу, TCP-сервіси (www, email, чат, ftp, p2p)

продовження таблиці 2.2.

7		7	100	$10^{-3}$	Голос та відео реального часу, інтерактивні ігри
8		8	300	$10^{-6}$	Відео не реального часу, TCP-сервіси (www, email, чат, ftp, p2p)
9		9	300	$10^{-6}$	
69		0.5	60	$10^{-6}$	Критично важлива сигналізація (МС-РТТ сигналізація, МС відео сигналізація)
70		5.5	200	$10^{-6}$	Критично важливі сервіси відео не реального часу та TCP-сервіси (www, email, чат, ftp, p2p)
79		6.5	50	$10^{-2}$	V2X повідомлення
80		6.8	10	$10^{-6}$	Надширокосмугові сервіси з низькою затримкою (TCP/UDP), віртуальна та доповнена реальність

Для більш детального оцінювання параметрів якості сервісу для абонентів, представимо часткові функції корисності у наступному вигляді:

$$\begin{cases} u(R) = \left[ \mu^{(R)} (R - R^{(\min)}) + (1 - \mu^{(R)}) (p^{(\max)} - p) \right] \\ u(Q) = \left[ \mu^{(Q)} (Q - Q^{(\min)}) + (1 - \mu^{(Q)}) (p^{(\max)} - p) \right] \\ u(T) = \left[ \mu^{(T)} (T - T^{(\min)}) + (1 - \mu^{(T)}) (p^{(\max)} - p) \right], \\ u(L) = \left[ \mu^{(L)} (L - L^{(\min)}) + (1 - \mu^{(L)}) (p^{(\max)} - p) \right] \\ u(I) = \left[ \mu^{(I)} (I - I^{(\min)}) + (1 - \mu^{(I)}) (p^{(\max)} - p) \right] \end{cases}, \quad (2.2)$$

де  $R, Q, T, L$  – параметри швидкості передавання даних, пріоритету сервісу, затримки та втрат, які визначаються ідентифікатором 5QI (5G Quality Identifier),  $I$  – пріоритет абонента, який визначається параметром ARP (Allocation and Retention Priority). Змінюючи коефіцієнти  $\mu^{(R)}, \mu^{(Q)}, \mu^{(T)}, \mu^{(L)}, \mu^{(I)}$ , абонент має змогу визначати параметри, які є більш важливими, а які – менш важливими, і

адаптивно змінювати баланс якості сервісу враховуючи індивідуальні особливості його сприйняття. Таким чином, розв'язується задача пошуку взаємозв'язку між параметрами QoS, які гарантує мережа та ступенем задоволеності абонента QoE, який залежить від великої кількості параметрів індивідуального контексту абонента [219,233]. При накопиченні достатньої кількості статистичних даних, абонентські пристрої матимуть змогу самонавчатися для пошуку оптимальних коригуючих параметрів для кожного типу сервісу в залежності від зворотного зв'язку абонента стосовно задоволеності рівнем сервісу:

$$\begin{aligned}
 \mu_j^{(R)} &\leftarrow \mu_j^{(R)} \cdot \eta_j^{(R)} \\
 \mu_j^{(Q)} &\leftarrow \mu_j^{(Q)} \cdot \eta_j^{(Q)} \\
 \mu_j^{(T)} &\leftarrow \mu_j^{(T)} \cdot \eta_j^{(T)}, \\
 \mu_j^{(L)} &\leftarrow \mu_j^{(L)} \cdot \eta_j^{(L)} \\
 \mu_j^{(I)} &\leftarrow \mu_j^{(I)} \cdot \eta_j^{(I)}
 \end{aligned} \tag{2.3}$$

Узагальнюючи усі типи сервісів, які можуть надаватися будь яким абонентам, формуємо загальну матрицю інформаційних потоків у площині абонентів  $\underline{\mathbf{F}} \in \mathbb{R}^{I \times J}$ :

$$\underline{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & \cdots & f_{1J} \\ f_{21} & f_{22} & \cdots & f_{2J} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{I1} & f_{I2} & \cdots & f_{IJ} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{I \times J}, \tag{2.4}$$

де найменша складова інформаційного потоку визначається як трафік абонента  $i$ , з сервісом  $j$ :

$$f_{i,j} = \underline{\mathbf{F}}(i, j). \tag{2.5}$$

Враховуючи, що не всі абоненти будуть використовувати усі можливі типи сервісів, матриця (2.4) є розрідженою, оскільки її окремі елементи  $f_{i,j}$  можуть бути нулями. Таким чином, сумарний трафік площини абонентів у дискретний момент часу  $t$  обчислюється наступним чином:

$$F(t) = \sum_i \sum_j f_{i,j}(t). \tag{2.6}$$



Таким чином, запропонована формалізація площини абонентів забезпечує децентралізоване управління параметрами надання сервісів для кінцевих абонентів враховуючи їх індивідуальні особливості сприйняття [219,233].

### **2.1.2. Принципи побудови та функціонування децентралізованої програмованої мережі мобільного зв'язку в площині інфраструктури**

У даному пункті розглядаються основні аспекти функціонування сервісно-орієнтованої архітектури мережі 5G (SBA – Service Based Architecture), яка закладена у стандарті 3GPP TS 23.501 [49]. В основі SBA закладено хмарно-центричну систему програмно-конфігурованої взаємодії мережних функцій, яка базується на розділенні площини управління та площини даних абонентів. Ключовою особливістю архітектури SBA є перехід від парадигми апаратних мережних модулів пов'язаних пропрієтарними мережними інтерфейсами, яка використовувалась у LTE EPC, до парадигми віртуалізованих мережних функцій, які взаємодіють на основі REST-повної архітектури на основі протоколу HTTP2.0 [49-71]. Таким чином уся взаємодія між мережними елементами здійснюється на основі моделей «запит/відповідь», або «підписка/сповіщення» в рамках загально прийнятих стандартів взаємодії у мережі Інтернет. Таким чином, усі функції ядра мережі 5G можуть розгортатись на основі існуючої інфраструктури хмарних та граничних обчислень. Мережеві функції на площині управління 5G повинні використовувати тільки сервіс-орієнтовані інтерфейси для їх взаємодії.

Спрощення архітектури UPF в порівнянні з PGW мережі 4G-LTE дає змогу знизити витрати на експлуатацію мережі. В свою чергу це дає змогу підтримувати парадигму граничних обчислень за рахунок можливості встановлювати велику кількість серверів в безпосередній близькості до мережі радіодоступу [188,234]. Проте, такий підхід створює проблему мобільності абонентів, оскільки активне переміщення абонентів супроводжується частою зміною UPF.

Одним із головних обмежень специфікації 3GPP TS 23.501 є те, що віртуальні мережні функції можуть взаємодіяти лише із UDR та UDSF, які належать до їхньої PLMN (Public Land Mobile Network), що ускладнює процес обміну даними про абонентів між різними операторами для забезпечення ефективного роумінгу в процесі переміщення абонентів [49,54,55]. Таким чином, у операторів є лише два варіанти забезпечення процедур роумінгу в залежності від типу розгортання мережі.

При розгортанні мережі 5G на основі існуючого ядра LTE EPC, використовується сигналізаційний протокол Diameter, що потребує від оператора додаткових ресурсів на обмін даними у площині IMS [49].

З іншого боку, при розгортанні нової мережі 5G на основі сервісно-орієнтованої архітектури SBA, усі дані сигналізації будуть передаватись на основі протоколу HTTP/2. При цьому, з'єднання між операторами буде відбуватись з використанням модуля SEPP (Secure Edge Protection Proxy), який може належати або до мережі оператора або до мережі провайдера IPX [49].

Проте, децентралізація мережі мобільного зв'язку є доволі складним завданням, яке потребує зміни існуючих підходів до проектування мережної інфраструктури та нових механізмів її спільного використання операторами. Серед основних вимог, які ставляться до децентралізованої мережної інфраструктури є її універсальність, гнучкість та програмованість, що дає змогу операторам адаптивно використовувати її для різних потреб.

В даній роботі запропоновано інтеграцію системи зберігання неструктурованих даних UDSF та уніфікованої бази даних UDR на основі технології блокчейн [216]. Таке рішення, дає змогу створити універсальну платформу для взаємодії між операторами мереж мобільного зв'язку 5G шляхом обміну даними абонентів, політиками верхнього рівня, даними про мережну інфраструктуру та розподіл радіочастотних ресурсів, із забезпеченням при цьому належного рівня довіри між операторами та кінцевими абонентами (рис. 2.2).

Запропонований підхід полягає у відокремленні системи зберігання даних

на базі хмарних технологій та системи контролю доступу до даних на основі децентралізованої мережі блокчейн. Блокчейн в даному контексті виконує функції нотаріального засвідчення коректності даних та прав доступу окремих абонентів чи операторів до їх зчитування або модифікації [216]. Такий підхід забезпечує гнучкість процесу управління даними на різних рівнях збереження та обробки. Зокрема, запропонована концепція передбачає наскрізну автентифікацію абонентів у мережі будь-якого оператора на основі унікальних адрес у мережі блокчейн [216,219]. Таке рішення є аналогом криптовалютного гаманця, який використовується у популярних блокчейнах (Bitcoin, Ethereum, тощо.), що дає змогу абонентам проходити автентифікацію у мережі будь-якого оператора, який зареєстрований в платформі блокчейн. В свою чергу, віртуалізовані функції ядра, які належать до різних операторів, мають змогу обмінюватись даними про абонентів, для забезпечення неперервного обслуговування абонентів при хендвері або роумінгу між мережами різних операторів.

Гнучкість мережної інфраструктури повинна забезпечувати можливість її розвитку для підтримки нових типів сервісів та способів використання, які на сьогодні ще є невідомими. Як зазначалося у першому розділі, ключовою перевагою мереж 5G над мережами попередніх поколінь є їх програмованість, що дає змогу розширювати або модифікувати мережні функції для підтримки нових функціональних можливостей та варіантів використання.

Інфраструктура мереж 5G є орієнтованою на віртуалізацію мережних функцій та може підтримувати різні їх особливості в залежності від типу сервісу, наприклад різні процедури управління мобільністю для окремих класів трафіку. Крім того, використання технології віртуалізації дає змогу змінювати функції мережі без розгортання нових апаратних засобів для їх виконання. З іншого боку, віртуалізація підвищує рівень гнучкості в мережі за рахунок розгортання мережних функцій у віртуальному середовищі, без прив'язки до фізичного місця розташування.

Таким чином, гнучкість та програмованість мережної інфраструктури 5G забезпечує можливість децентралізації мережі для її спільного використання будь-яким оператором мобільного зв'язку шляхом програмного розгортання власних мережних функцій та координації між операторами на основі технології блокчейн [216,219].

Іншим важливим аспектом мережної інфраструктури є її масштабованість для забезпечення взаємодії між різними системами зв'язку та співіснування між різними середовищами, технологіями та протоколами. За рахунок віртуалізації та програмованості, мережі 5G підтримують інтеграцію різних технологій радіодоступу в спільне ядро мережі, а також забезпечують конвергенцію з мережами фіксованого зв'язку [49,58].

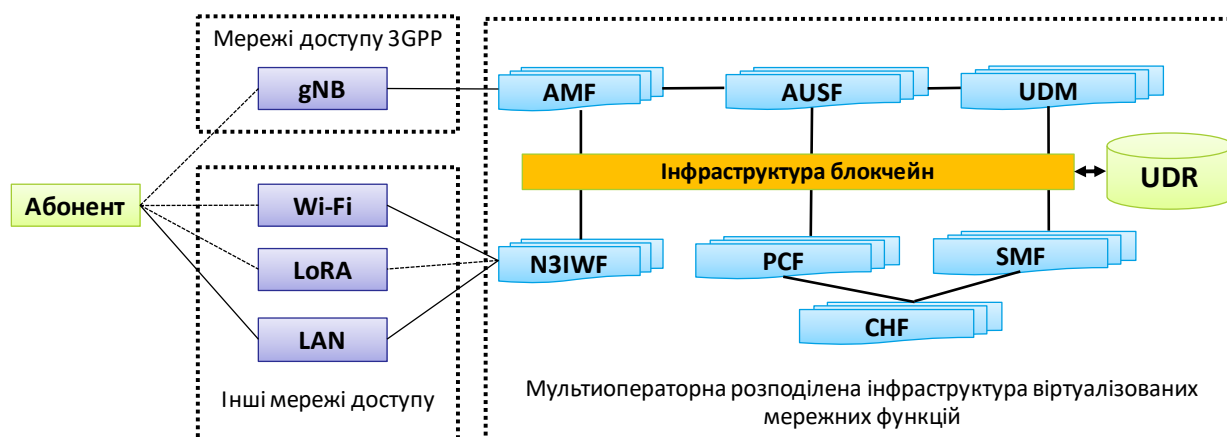


Рис. 2.2. Структурно-функціональна схема площини управління гетерогенною інфраструктурою мережі мобільного зв'язку на основі стандарту 3GPP TS 23.501 та технології блокчейн.

Для забезпечення інтеграції існуючої мережної інфраструктури 4G та нової інфраструктури 5G можна використати кілька альтернативних варіантів, які рекомендовані 3GPP [49]. Перший варіант полягає у створенні повністю автономної мережі 5G, яка буде функціонувати незалежно від існуючих мереж 4G. Інший варіант передбачає інтеграцію мереж радіодоступу 5G у ядро 4G EPC. Проте, в обох випадках інфраструктура 4G залишиться централізованою. Тому, єдиним варіантом для забезпечення децентралізації мережної

інфраструктури залишається інтеграція усіх мереж доступу в спільне мультиоператорне ядро мережі 5G.

Для забезпечення максимальної гнучкості та масштабованості, інфраструктура децентралізованої мережі мобільного зв'язку будується за ієрархічним принципом розділення функцій між централізованими та розподіленими елементами, як показано на рис. 2.3. Спільний центральний вузол керування CU (Centralized Unit), який розгортається в хмарних або граничних серверах, обслуговує кілька розподілених вузлів DU (Distributed Unit), кожен з яких, у свою чергу, обслуговує кілька віддалених універсальних радіо модулів RU (Remote Unit) [145,235].

При цьому, CU відповідає лише за конфігурацію в квазі-реальному часі та прийняття рішень управління, тоді як DU, який є частиною рівня MAC, відповідає за всі рішення щодо передавання даних в реальному часі.

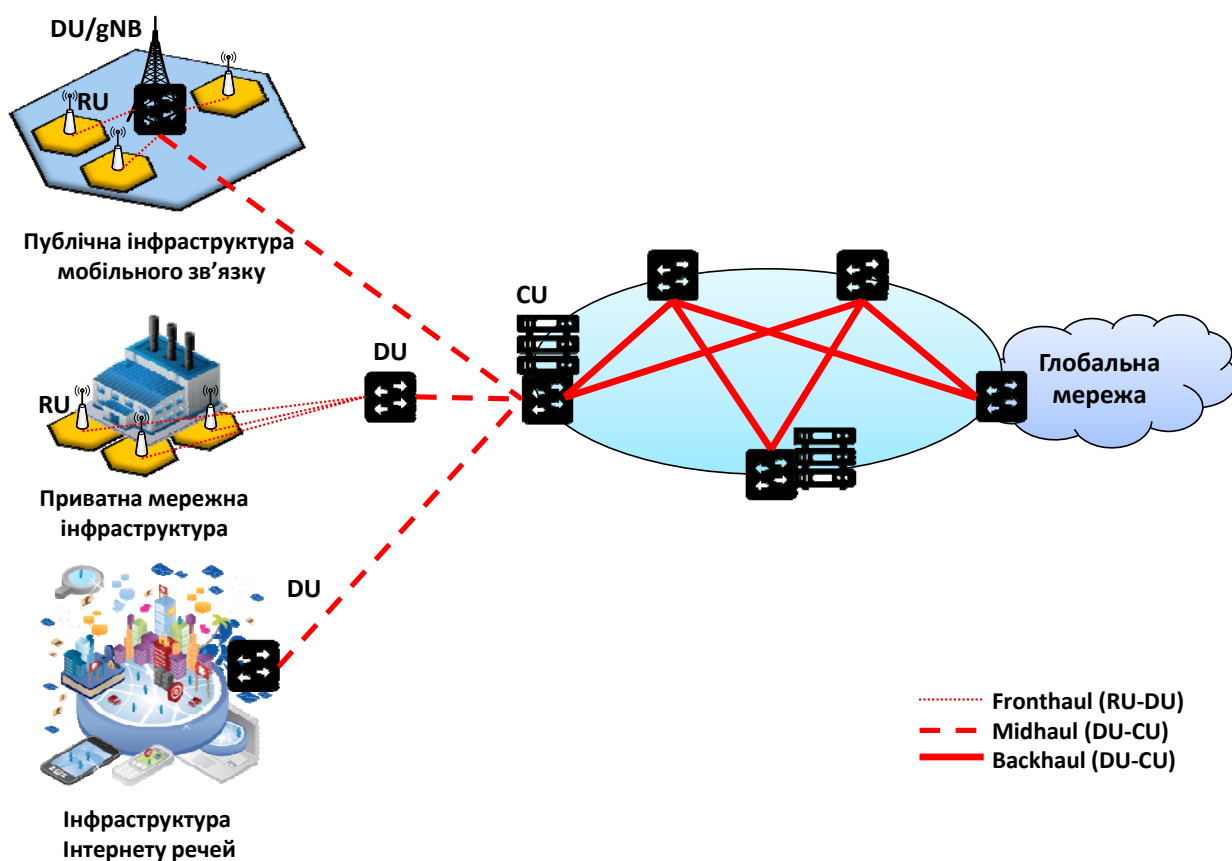


Рис. 2.3. Ієрархічна інфраструктура децентралізованої мережі мобільного зв'язку.

В даній архітектурі, DU повинен знаходитись в межах 1 мс затримки до RU, якими він управляє, оскільки він повинен здійснювати планування радіоресурсів на рівні MAC в режимі реального часу. Ідеальною є конфігурація, при якій конфігурацій DU та RU розташовуються в одному вузлі (макрокомірці). Але у випадку коли RU є мікрокомірками, а їх кількість є великою в межах невеликої територіальної зони (торговий центр, кампус або завод), один DU обслуговує декілька RU. Така конфігурація є найбільш логічною, якщо врахувати перспективи використання міліметрових довжин хвиль для мікрокомірок. Також варто зазначити, що архітектура на рис. 2.3 змінює підхід до організації транспортної мережі. Зокрема:

- зв'язок RU-DU – fronthaul;
- зв'язок DU-CU – midhaul;
- зв'язок CU-ядро – backhaul.

Дані аспекти більш детально розглядаються у 5 розділі.

Для формалізації площини інфраструктури представимо матрицю інформаційних потоків, шляхом перетворення матриці (2.4) у форму  $\underline{\mathbf{F}} \in \mathbb{R}^{I \times J \times L}$ :

$$\underline{\mathbf{F}} = [f_{ij1} \quad f_{ij2} \quad \dots \quad f_{ijL}] \in \mathbb{R}^{I \times J \times L}, \quad (2.7)$$

де найменша складова інформаційного потоку визначається як трафік абонента  $i$ , з сервісом  $j$ , через базову станцію (RU)  $l$ :

$$f_{i,j,l} = \underline{\mathbf{F}}(i, j, l). \quad (2.8)$$

Аналогічно до (2.4), тривимірна матриця (2.7) є розрідженою, оскільки її окремі елементи  $f_{i,j,l}$  можуть бути нулями. Тому, сумарний трафік в площині інфраструктури у дискретний момент часу  $t$  обчислюється як :

$$F(t) = \sum_i \sum_j \sum_l f_{i,j,l}(t). \quad (2.9)$$

Враховуючи особливості ієрархічної побудови мережної інфраструктури, представимо простори вузлів RU, DU та CU, як  $l = \{1, 2, \dots, L\}$ ,  $m = \{1, 2, \dots, M\}$  та  $n = \{1, 2, \dots, N\}$ , відповідно. Така формалізація дає змогу визначити матрицю взаємозв'язків  $\underline{\mathbf{C}} \in \mathbb{R}^{L \times M \times N}$ , елементи якої можуть набувати значення 0 або 1:

$$c_{l,m,n} = \begin{cases} 1, & \text{якщо існує зв'язок } RU_l, DU_m \text{ та } CU_n \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} . \quad (2.10)$$

Слід зазначити, що сучасні транспортні мережі є високоінтегрованими між собою, і на практиці базові станції RU можуть мати канали зв'язку кількома DU, у той час як кожен DU може одночасно з'єднуватись із кількома CU. Таким чином, для обчислення характеристик завантаженості довільних вузлів DU та CU, введемо миттєвий стан матриці  $\underline{C}(t)$ , у дискретний момент часу  $t$ :

$$F_m(t) = \sum_i \sum_j \sum_l \sum_n (f_{i,j,l}(t) \cdot c_{l,m,n}(t)), \text{ при } \sum_l \sum_m \sum_n c_{l,m,n}(t) = L . \quad (2.11)$$

$$F_n(t) = \sum_i \sum_j \sum_l \sum_m (f_{i,j,l}(t) \cdot c_{l,m,n}(t)), \text{ при } \sum_l \sum_m \sum_n c_{l,m,n}(t) = L . \quad (2.12)$$

Таким чином, запропонована формалізація площини інфраструктури забезпечує можливість децентралізованого управління інформаційними потоками на різних рівнях ієрархії мережі.

### **2.1.3. Нові бізнес-моделі побудови мереж мобільного зв'язку у площині операторів**

Одним із ключових аспектів децентралізації мереж мобільного зв'язку є відкриття ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури. Основними існуючими обмеженнями ефективного розвитку мереж 4G та 5G в Україні є високі капітальні затрати та низька платоспроможність кінцевих абонентів. Зокрема, показник середнього прибутку на абонента (ARPU - average return per user) в Україні є у понад 20 разів менший, ніж у США. Крім того, існуюча архітектура мереж LTE (4G) є доволі громіздкою, що потребує значних капітальних затрат на її побудову навіть для відносно невеликої зони покриття. Це в свою чергу, не дає змоги операторам підтримувати високі темпи модернізації інфраструктури через достатньо довгий період окупності інвестицій. Також існують правові обмеження стосовно ліцензування та розподілу радіочастотних ресурсів, які не дають операторам змогу забезпечити достатньо широкі суцільні смуги частот для підтримки високих пропускних здатностей для кінцевих абонентів. Тому, у даній роботі пропонуються нові

більш ефективні та гнучкі методи до децентралізованого розгортання мереж мобільного зв'язку операторами в довільному масштабі. Зокрема, для спрощення виходу нових операторів на ринок необхідно забезпечити їм можливість локального ліцензування радіочастотного ресурсу, щоб забезпечити економічно вигідні умови для побудови мережі. Таким чином, в рамках площини операторів можна визначити декілька бізнес моделей, які можуть використовуватись операторами при побудові мережі.

До першої категорії можна віднести національних операторів мобільного зв'язку, які вже працюють на ринку мобільного зв'язку. Дана модель передбачає централізоване розгортання мережної інфраструктури національного масштабу та купівлю постійної ліцензії на ексклюзивне право на використання радіочастотного ресурсу у певних частотних діапазонах в межах території держави [237].

До другої категорії відносяться регіональні оператори, принцип функціонування яких схожий до національних операторів, проте передбачає регіональне розгортання мережі в межах окремих міст, районів або областей. Спрощення процесу розгортання мереж 5G, у порівнянні із мережами LTE дає змогу перейти до парадигми регіональних або локальних мереж 5G [219,238]. Така модель в свою чергу потребує механізмів ліцензування радіочастотного ресурсу в межах окремих регіонів, для того щоб забезпечити можливість використання однакових частотних діапазонів операторами, зони функціонування яких територіально розділені.

До третьої категорії відносяться приватні оператори [239]. Приватна мережа – це спеціалізована мережа, яка забезпечує обмін даними між людьми, пристроями та фізичною інфраструктурою в межах конкретного підприємства, і є оптимізованою під його бізнес процеси. Ключовою вимогою до приватних мереж є обмеження доступу лише для працівників установи та локалізація даних у межах підприємства, забезпечуючи при цьому високий рівень безпеки та конфіденційність інформації. Традиційно, дана вимога обмежує технологічний стек корпоративних мереж лише до стандартів IEEE 802.3



Ethernet та IEEE 802.11 Wi-Fi, що в свою чергу обмежує можливості підключення працівників та корпоративної інфраструктури лише до пристроїв, які підтримують вищезазначені стандарти.

Проте, сучасні досягнення в галузі інформаційних технологій стимулюють більшість установ до цифрової трансформації. Окрім існуючих ПК або смартфонів, до приватної мережі підключаються різноманітні пристрої з власними вимогами до мережі зв'язку, такі як роботи, дрони, сенсори, пристрої віртуальної та доповненої реальності (AR – Augmented Reality/VR – Virtual Reality), автономні транспортні засоби. Усі дані, які генеруються цими пристроями, обробляються в системі мобільних граничних обчислень (MEC – Mobile Edge Computing), яка контролює їх поведінку та координує взаємодію між ними в межах мережі підприємства [8-10].

Нові сервіси цифрової трансформації потребують високої мобільності, надійного зв'язку, низької затримки, конфіденційності даних, ізоляції трафіку та гарантії якості сервісу різних підсистем, що обмежує можливості існуючих рішень для побудови корпоративних мереж. З одного боку, фіксовані мережі Ethernet є відносно простими, забезпечують стабільну якість зв'язку та високу продуктивність. З іншого боку, вони не забезпечують мобільність пристроїв, а їх розгортання є довготривалим у зв'язку із прокладкою структурованих кабельних систем. Альтернативний варіант розгортання на основі технології Wi-Fi, дає змогу забезпечити часткову мобільність пристроїв та відносну простоту реалізації. Проте, Wi-Fi зв'язок нестабільний, суттєво обмежений по відстані, характерний високими затримками та низьким рівнем безпеки. перевищує десятки мілісекунд, він вразливий до безпеки, а її мобільність обмежена. Такі характеристики, обмежують можливості обох технологій щодо цифрової трансформації в різних сферах економіки.

Тому, одним із головних напрямків розвитку мереж 5G є забезпечення їх універсальності та гнучкості розгортання з метою підтримки різноманітних сервісів цифрової трансформації. Це дало поштовх до появи нових приватних операторів мобільного зв'язку мереж 5G, які спеціалізуються на конкретних

бізнес процесах окремих підприємств (рис.2.4) [238,239]. Приватні оператори 5G використовують технології та стандарти 3GPP. Оскільки стек 3GPP в основному направлений на побудову коміркових мереж мобільного зв'язку, він забезпечує повну мобільність із збереженням якості зв'язку на рівні провідних мереж. Крім того, 5G вирішує проблему автентифікації та захисту мережі, шляхом використання персональних SIM-карт для кожного пристрою. В даній роботі, передбачається кілька потенційних зацікавлених сторін, які могли б виконувати роль приватного оператора, наприклад: будівельні компанії, аеропорти, університети, індустріальні підприємства, організатори масових заходів, власники торгово-розважальних центрів, стадіони, тощо [81,238].

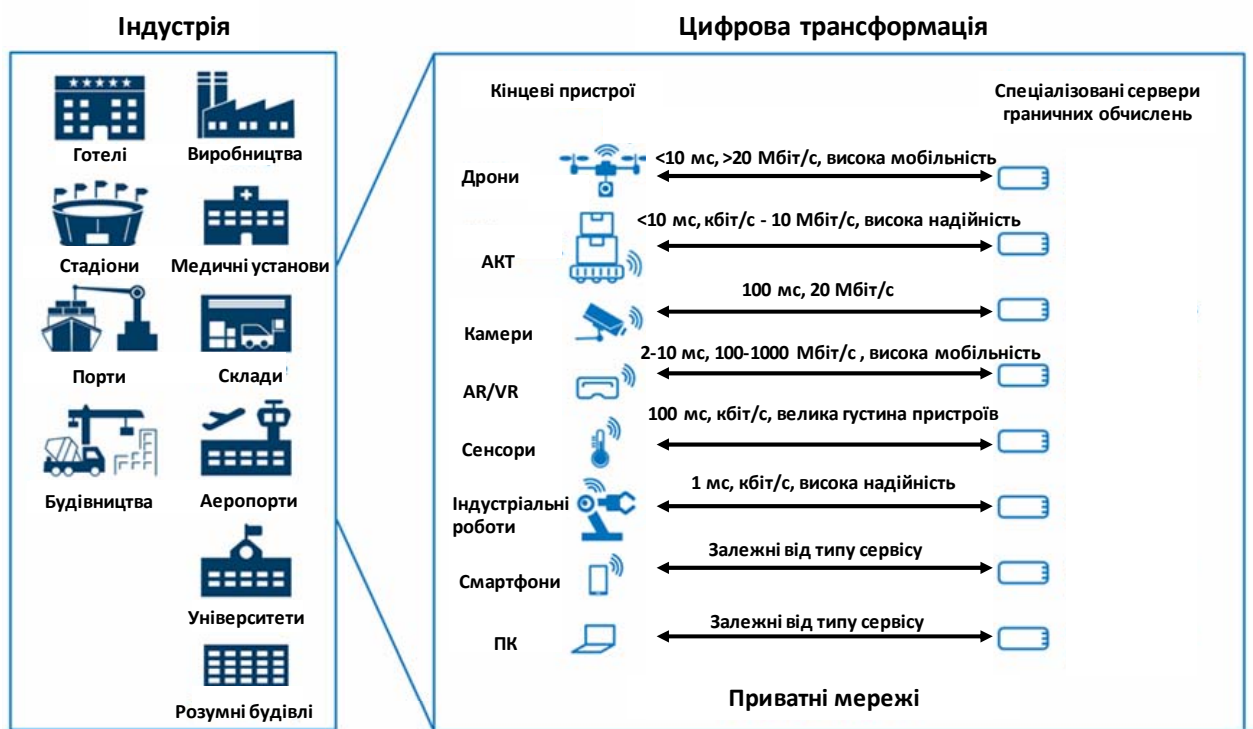


Рис. 2.4. Концептуальна модель приватних операторів мобільного зв'язку.

До останньої категорії відносяться галузеві оператори [238,239]. На відміну від приватної моделі, галузеві оператори передбачають функціонування в рамках окремих економічних вертикалей, які можуть бути як регіонального так і національного масштабу. До таких бізнес моделей можна віднести галузь залізничних перевезень, різноманітні галузі державного управління, системи

військового та спецзв'язку, сервіси Інтернету речей, розумні міста та багато інших.

Для забезпечення ефективного функціонування розглянутих бізнес-моделей операторів в рамках єдиної децентралізованої системи мобільного зв'язку необхідно забезпечити прозорі та довірені механізми для спільного використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури усіма операторами мобільного зв'язку. та можливість автоматизованої зміни оператора для кінцевих абонентів.

Для формалізації процесу функціонування децентралізованої мережі мобільного зв'язку в площині мережної інфраструктури, представимо матрицю інформаційних потоків, шляхом перетворення матриці (2.7) у форму  $\underline{\mathbf{F}} \in \mathbb{R}^{I \times J \times K \times L}$  :

$$\underline{\mathbf{F}} = \begin{bmatrix} f_{ij11} & f_{ij12} & \cdots & f_{ij1L} \\ f_{ij21} & f_{ij22} & \cdots & f_{ij2L} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{ijK1} & f_{ijK2} & \cdots & f_{ijKL} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{I \times J \times K \times L}, \quad (2.13)$$

де найменша складова інформаційного потоку визначається як трафік абонента  $i$ , з сервісом  $j$ , через базову станцію (RU)  $l$ , який обслуговується оператором  $k$  :

$$f_{i,j,k,l} = \underline{\mathbf{F}}(i, j, k, l). \quad (2.14)$$

Аналогічно до попередніх випадків, чотиривимірна матриця (2.13) є розрідженою, оскільки її окремі елементи  $f_{i,j,k,l}$  можуть бути нулями. Тому, сумарний трафік в площині операторів у дискретний момент часу  $t$  обчислюється як :

$$F(t) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l f_{i,j,k,l}(t). \quad (2.15)$$

Одним із ключових завдань у запропонованій структурно-функціональній моделі децентралізованої мережі мобільного зв'язку є можливість спільного використання мережної інфраструктури усіма операторами. Для формалізації даного процесу сформуємо матрицю взаємозв'язків  $\underline{\mathbf{O}} \in \mathbb{R}^{K \times L}$ , елементи якої можуть набувати значення 0 або 1:

$$o_{k,l} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } RU_l \text{ належить оператору } k \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} . \quad (2.16)$$

Враховуючи ієрархію взаємозв'язків у запропонованій моделі інфраструктури, матрицю (2.16) альтернативно можна представити у формі  $\underline{\mathbf{O}} \in \mathbb{R}^{K \times L \times M \times N}$ , де:

$$o_{k,l,m,n} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } RU_l, DU_m \text{ та } CU_n \text{ належить оператору } k \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases} . \quad (2.17)$$

В децентралізованій мережі мобільного зв'язку передбачається, що елементи мережної інфраструктури можуть адаптивно використовуватись усіма операторами, що робить матриці (2.16-2.17) змінними в часі. Тому для представлення трафіку, який обслуговує оператор  $k$  у дискретний момент часу  $t$ , введемо миттєвий стан матриці  $\underline{\mathbf{O}}(t)$ :

$$F_k(t) = \sum_i \sum_j \sum_l \sum_m \sum_n (f_{i,j,k,l}(t) \cdot o_{k,l,m,n}(t)), \text{ при } \sum_k \sum_l \sum_m \sum_n o_{k,l,m,n}(t) = L . \quad (2.18)$$

В окремих випадках, для спрощення розрахунків вираз (2.18) можна спростити до форми:

$$F_k(t) = \sum_i \sum_j \sum_l f_{i,j,k,l}(t) . \quad (2.19)$$

Таким чином, запропонована формалізація площини операторів, забезпечує можливість децентралізованого управління інформаційними потоками в рамках спільного використання мережної інфраструктури та адаптивного обслуговування абонентів усіма операторами мобільного зв'язку.

## **2.2. Розроблення моделей та засобів децентралізованого управління мережами мобільного зв'язку**

### **2.2.1. Інтеграція засобів технології блокчейн в системи управління децентралізованими мережами мобільного зв'язку**

Основні принципи функціонування технології блокчейн та методи їх інтеграції у телекомунікаційну інфраструктуру вже розглянуто детально у першому розділі дисертаційної роботи. Тому в даному розділі увага акцентується лише на ключових аспектах використання технології блокчейн в

рамках розробленої системи децентралізованого управління мережами мобільного зв'язку [216,219]. Зокрема, блокчейн надає можливість зберігання та управління даними мережі мобільного зв'язку з використанням захищених розподілених реєстрів, що забезпечує ряд ключових функцій безпеки, таких як незмінність, децентралізація, прозорість та конфіденційність інформації в мережі. Такі особливості забезпечують механізм децентралізованого управління мережами мобільного зв'язку, їх функціями та сервісами, із забезпеченням належного рівня безпеки. З іншого боку, мережі мобільного зв'язку 5G/6G передбачають значно вищу швидкість передавання даних, меншу затримку, масове підключення пристроїв та гарантію рівня якості обслуговування незалежно від місцезнаходження абонентів, що потребує додаткових механізмів для децентралізованого контролю та регулювання даних показників [219].

Існуюча централізована архітектура інфраструктури мереж мобільного зв'язку є вразливою з точки зору безпеки та перевантаження обчислювальних ресурсів. Поточні моделі граничних та хмарних обчислень в основному базуються на централізованих постачальниках послуг, що створює вузьке та вразливе місце в контексті загальної мережної інфраструктури. Зокрема, централізована система не гарантує безперебійне надання сервісів IoT, у випадку коли у головних серверах виникають збої програмного забезпечення, або вони знаходяться під кібератаками [199].

Крім того, при використанні віртуалізованої архітектури мережних функцій, частот виникає потреба розгортати функції в середовищах декількох хмарних провайдерів, що може призвести до проблеми витоку даних при передаванні між ними. Тому, безпека зв'язку між оркестратором мережних функцій та менеджером віртуальних та фізичних серверів є важливою складовою у децентралізованих мережах мобільного зв'язку [219].

Крім того, зростаючі вимоги абонентів інфраструктури мереж мобільного зв'язку також створюють нові виклики з точки зору безпеки та продуктивності мережі. Наприклад, зростаюча потреба в додатках, що потребують високої

пропускної здатності, таких як мобільне потокове відео та обробка великих даних, потребує зміни принципів управління ресурсами в мережах мобільного зв'язку, щоб уникнути їх дефіциту ресурсів для забезпечення безперервного та повсюдного забезпечення сервісів для абонентів. Тому, у даній роботі розробляються нові методи та моделі розподілу радіочастотного спектру між операторами мереж мобільного зв'язку [216,219,233,236]. Один з підходів, який пропонується у даній роботі, полягає у використанні сертифікатів для програмованих базових станцій, які дають право на використання радіочастотного ресурсу. Проте, дані методи неможливо реалізувати в рамках централізованих систем управління, оскільки складність відповідних алгоритмів буде надзвичайно високою, враховуючи кількість елементів інфраструктури та операторів.

Використовуючи засоби технології блокчейн, у даній дисертаційній роботі розробляється ряд інноваційних рішень для децентралізації мереж мобільного зв'язку та трансформації архітектури управління мережами для підвищення ефективності їх функціонування за технічними та економічними показниками [219,233,236].

Концепція децентралізованого механізму довіри без залучення третьої сторони на основі використання алгоритмів консенсусу в блокчейн дає змогу усунути необхідність централізованого управління процесом функціонування мереж мобільного зв'язку [148,149]. На відміну від звичайних систем управління базами даних, які використовують централізований сервер для здійснення автентифікації доступу та механізмів безпеки, у даній роботі запропоновано децентралізовану перевірку даних абонентів та мережної інфраструктури на основі смарт-контрактів, що може бути реалізованим з використанням обчислювальних ресурсів усіх пристроїв мережі [216,219,233]. При такій конфігурації процес спільного використання радіочастотних ресурсів та мережної інфраструктури операторами, а також процес укладання та гарантування угод SLA між операторами та абонентами буде стійким до будь-яких спроб порушити такі угоди.

Завдяки смарт-контрактам, які забезпечують надзвичайно гнучкі та ефективні механізми контролю доступу в даній роботі пропонується нове рішення для автентифікації абонентів на основі індивідуальних ідентифікаторів у мережі блокчейн [219]. Такий механізм дає змогу абонентам використовувати мережі будь яких операторів шляхом укладання смарт-контрактів безпосередньо між абонентом та будь-яким оператором [219,233]. Це забезпечує більш гнучку та ефективну модель обслуговування абонентів, забезпечуючи при цьому належний рівень безпеки в децентралізованій системі мобільного зв'язку.

### **2.2.2. Розроблення техніко-економічної моделі децентралізованої мультиоператорної мережі мобільного зв'язку**

Для забезпечення функціонального розділення децентралізованої мережі мобільного зв'язку у роботі пропонується техніко-економічна модель децентралізованої мультиоператорної мережі мобільного зв'язку, яка передбачає чотирьох основних учасників ринку (рис. 2.5)[219]:

*Регулятор ринку* - це урядовий орган, який виконує функції планування та регулювання спектру в межах країни, продаж ліцензій для операторів, гармонізацію різних стандартів безпроводного зв'язку для забезпечення їх електромагнітної сумісності та багато інших аспектів. В Україні функції регулятора виконує Національна комісія, що здійснює державне регулювання в сфері зв'язку та інформатизації (НКРЗІ). У запропонованій моделі, регулятор відповідає за встановлення високорівневих політик та програмних обмежень для смарт-контрактів, які оператори не можуть порушити.

*Власниками радіочастот* є оператори мобільного зв'язку, які отримали ліцензію від регулятора у певних частотних смугах для використання в національному або регіональному масштабі. Власники радіочастот можуть використовувати свої смуги самостійно, або здавати їх в оренду іншим операторам на основі смарт-контрактів. Наприклад, оператор може здати в оренду свої надлишкові радіочастотні ресурси іншим операторам, які їх

потребують, отримавши таким чином додатковий дохід.

**Власниками інфраструктури** є оператори або сторонні стейкхолдери, які приватно володіють фізичною мережною інфраструктурою (макрокомірки, мікрокомірки, комутаційні вузли, сервери, тощо). Власники інфраструктури можуть надавати іншим операторам права на використання фізичної інфраструктури на основі смарт-контрактів. Крім того, абоненти можуть бути власниками інфраструктури, надаючи свої ресурси іншим абонентам на основі технології D2D. Таким чином, відкриваються можливості для нової бізнес-моделі, в якій сторонні стейкхолдери (наприклад будівельні компанії) мають можливість інвестувати у розвиток мережної інфраструктури з метою подальшої здачі її в оренду операторам.

**Абоненти**, які можуть адаптивно перемикатися між мережами різних операторів в режимі реального часу, або одночасно обслуговуватись у мережах різних операторів узгоджуючи угоди SLA на основі смарт-контрактів.

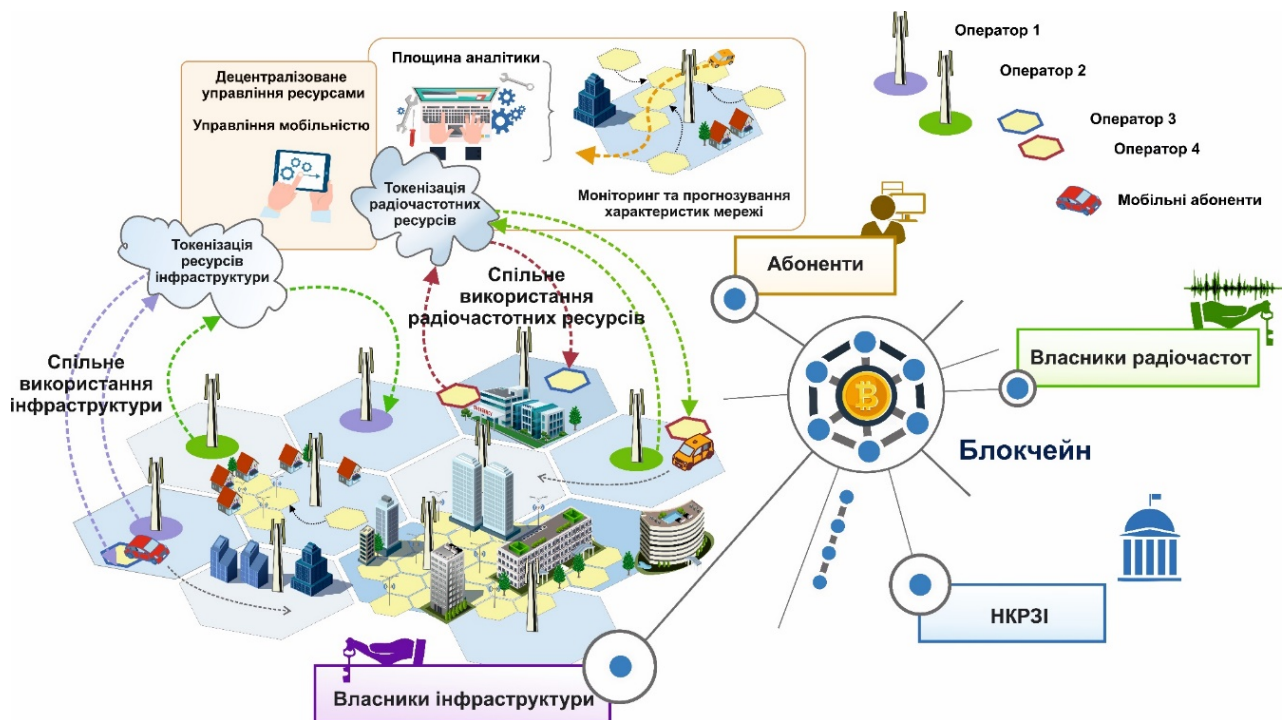


Рис. 2.5. Техніко-економічна модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку [219].

Основою для запропонованої техніко-економічної моделі мережі мобільного зв'язку є інфраструктура блокчейн, яка дає змогу обійтись без



центрального координаційного пункту управління мережною інфраструктурою. Процес взаємодії між усіма сторонами в даній моделі забезпечується на основі інфраструктури розподілених реєстрів, які відповідають за окремі параметри в мережі. Таке рішення потенційно знижує складність мережі та значно зменшує експлуатаційні витрати операторів. Крім того, усі транзакції в мережі контролюються всіма вузлами мережі блокчейн, які є рівноправними між собою. Можливість використання обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв є ще однією перевагою, яку може забезпечити запропонована модель для спрощення управління мережею та підвищення її ефективності, особливо у складних гетерогенних сценаріях розгортання майбутніх мереж 6G [170].

Враховуючи, що немає жодних обмежень щодо інформації про стан мережі мобільного зв'язку, яку можна зберігати у розподілених реєстрах блокчейн, запропонований підхід теоретично можна використати для багатьох питань управління, зокрема і аспектів які детально розглянуті у розділі 1.5. Проте, варто виділити основні реєстри даних, які є важливими для розробленої системи автоматизованого управління децентралізованими мережами мобільного зв'язку [219].

**Реєстр абонентів** містить інформацію про кожного абонента, таку як персональний публічний ідентифікатор у мережі блокчейн, стан рахунку, область відстеження, а також інші дані, які можуть бути необхідними для ефективного обслуговування абонента. Варто зазначити, що персональна інформація абонентів не є відкритою, публічно, проте може бути доступною для державних органів та спецслужб. В свою чергу, оператори можуть бачити лише інформацію про типові сервіси абонента та їх статистику, для забезпечення більш ефективного та персоналізованого обслуговування абонентів.

**Реєстр радіочастотного ресурсу** містить інформацію про кожен частотний діапазон, враховуючи його тип дуплексу, регіон ліцензування, оператора, який є основним власником ліцензії, оператора, який є тимчасовим

орендарем ліцензії, а також ряд інших параметрів. Приклад такого реєстру для частотних діапазонів 5G наведено в таблиці 2.4.

*Реєстр інфраструктури* містить інформацію про усі елементи мережної інфраструктури, такі як gNB, RU, DU, CU та інші. До основної інформації про мережну інфраструктуру належить місцезнаходження (широта, довгота), поточний частотний діапазон, основний власник, тимчасовий орендар, підтримувані технології радіодоступу (обчислювальні ресурси), обмеження потужності передавання та інші параметри.

*Реєстр операторів* містить інформацію про кожного оператора, таку як зона функціонування, наявні власні або орендовані ліцензії на радіочастотні діапазони та підтримувані типи сервісів.

*Реєстр SLA* містить інформацію про минулі, поточні та майбутні SLA між абонентами та операторами. Кожен рівень SLA визначається для зазначеного строку виконання та ціни в токенах NC.

Таблиця 2.4.

Приклад реєстру радіочастотного ресурсу

#	Дуплекс	$f$ (МГц)	UL(МГц)	DL (МГц)	Власник ліцензії	Тимчасовий орендар
n1	FDD	2100	1920 – 1980	2110 – 2170	MNC **	MNC **
n2	FDD	1900	1850 – 1910	1930 – 1990	MNC **	MNC **
n3	FDD	1800	1710 – 1785	1805 – 1880	MNC **	MNC **
n5	FDD	850	824 – 849	869 – 894	MNC **	MNC **
n7	FDD	2600	2500 – 2570	2620 – 2690	MNC **	MNC **
n8	FDD	900	880 – 915	925 – 960	MNC **	MNC **
n12	FDD	700	699 – 716	729 – 746	MNC **	MNC **
n14	FDD	700	788 – 798	758 – 768	MNC **	MNC **
n18	FDD	850	815 – 830	860 – 875	MNC **	MNC **
n20	FDD	800	832 – 862	791 – 821	MNC **	MNC **
n25	FDD	1900	1850 – 1915	1930 – 1995	MNC **	MNC **
n28	FDD	700	703 – 748	758 – 803	MNC **	MNC **

#	Дуплекс	$f$ (МГц)	UL(МГц)	DL (МГц)	Власник ліцензії	Тимчасовий орендар
n29	SDL	700	N/A	717 – 728	MNC **	MNC **
n30	FDD	2300	2305 – 2315	2350 – 2360	MNC **	MNC **
n34	TDD	2100	2010 – 2025	-	MNC **	MNC **
n38	TDD	2600	2570 – 2620	-	MNC **	MNC **
n39	TDD	1900	1880 – 1920	-	MNC **	MNC **
n40	TDD	2300	2300 – 2400	-	MNC **	MNC **
n41	TDD	2500	2496 – 2690	-	MNC **	MNC **
n48	TDD	3500	3550 – 3700	-	MNC **	MNC **
n50	TDD	1500	1432 – 1517	-	MNC **	MNC **
n51	TDD	1500	1427 – 1432	-	MNC **	MNC **
n65	FDD	2100	1920 – 2010	2110 – 2200	MNC **	MNC **
n66	FDD	1700	1710 – 1780	2110 – 2200	MNC **	MNC **
n70	FDD	2000	1695 – 1710	1995 – 2020	MNC **	MNC **
n71	FDD	600	663 – 698	617 – 652	MNC **	MNC **
n74	FDD	1500	1427 – 1470	1475 – 1518	MNC **	MNC **
n75	SDL	1500	-	1432 – 1517	MNC **	MNC **
n76	SDL	1500	-	1427 – 1432	MNC **	MNC **
n77	TDD	3700	3300 – 4200	-	MNC **	MNC **
n78	TDD	3500	3300 – 3800	-	MNC **	MNC **
n79	TDD	4700	4400 – 5000	-	MNC **	MNC **
n80	SUL	1800	1710 – 1785	-	MNC **	MNC **
n81	SUL	900	880 – 915	-	MNC **	MNC **
n82	SUL	800	832 – 862	-	MNC **	MNC **
n83	SUL	700	703 – 748	-	MNC **	MNC **
n84	SUL	2100	1920 – 1980	-	MNC **	MNC **
n86	SUL	1700	1710 – 1780	-	MNC **	MNC **
n89	SUL	850	824 – 849	-	MNC **	MNC **
n90	TDD	2500	2496 – 2690	-	MNC **	MNC **

### 2.2.3. Розроблення моделі токенизації радіочастотних та інфраструктурних ресурсів мережі

Для підтримки вищенаведених взаємодій між учасниками ринку у роботі пропонується модель токенизації радіочастотних та інфраструктурних ресурсів на основі стандарту ERC (Ethereum Request for Comments) 721, для їх цифрового представлення у мережі блокчейн. ERC 721 – це стандарт невзаємозамінних токенів, які є унікальними цифровими еквівалентами реальних активів [240]. Невзаємозамінні токени NFT (Non-Fungible Token) є особливим класом активів у мережі блокчейн, які мають властивість штучно створеного дефіциту [240,241].

На рис. 2.6 представлено приклад токенизації права власності доменного імені <https://ethereum.eth.link/> до 04 травня 2030 року з використанням токена NFT.

The screenshot displays the tokenization details for the domain 'ethereum.eth.link'. It includes the following information:

- PARENT:** eth
- REGISTRANT:** 0x0ABa55c93cF7292f71067B0Ba0D8b464592895cA
- CONTROLLER:** 0x809FA673fe2ab515FaA168259cB14E2BeDeBF68e
- EXPIRATION DATE:** 2030.05.04 at 13:12 (UTC+03:00)
- RESOLVER:** 0x4976fb03C32e5B8cfe2b6cCB31c09Ba78E8aBa41

The **RECORDS** section is divided into three parts:

- ADDRESSES:** A table with columns for the address type and its status.

ADDRESS	STATUS
ETH	Not set
BTC	Not set
LTC	Not set
DOGE	Not set
- CONTENT:** ipfs://bafybeidoodypolrlzuffnng5swfpotyhu7cdjh5vs6sc6jbuz47lprw6wfi (https://ethereum.eth.link)
- TEXT RECORD:** A table with columns for the record type and its status.

TEXT RECORD	STATUS
vnd.twitter	Not set
vnd.github	Not set
url	Not set
email	Not set
avatar	Not set

Рис. 2.6. Приклад токенизації доменного імені з використанням токена стандарту ERC 721.

Традиційні криптовалюти, такі як BTC (Bitcoin), ETH (Ethereum), XRP (Ripple) та багато інших, є взаємозамінними. Це означає, що як і у випадку із звичайними грошима, завжди можна обміняти  $n$  BTC, на будь які інші  $n$  BTC. На

відміну від традиційних криптовалют, токени NFT мають можливість бути унікальними та існувати в єдиному екземплярі, що робить їх придатними для представлення різноманітних фізичних об'єктів та активів у цифровому еквіваленті.

Як приклад можна навести токенизацію будівлі, яка дає змогу представити право власності на неї у цифровому світі. Передаючи свій токен будівлі в мережі блокчейн до іншої особи, власник автоматично передаватиме даній особі право власності на дану будівлю, і зможе одразу отримати еквівалентну суму коштів у криптовалюті, при укладенні відповідного смарт-контракту купівлі-продажу. В даній роботі, пропонується адаптація такої моделі токенизації до умов функціонування децентралізованої мережі мобільного зв'язку із спільним використанням радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури.

Основними властивостями токенів стандарту ERC 721 є [240,241]:

1. *Неподільність*. Токени NFT повинні представляти собою цілісний об'єкт з реального світу, який можна купити або продати. У випадку токенизації радіочастотного ресурсу або мережної інфраструктури, токени повинні бути еквівалентом такого обсягу ресурсу, який може використовуватись оператором (ресурсний блок, довжина хвилі в оптоволоконному кабелі, передавач базової станції, тощо).

2. *Унікальність*. Кожен токен NFT є унікальним, і не може бути замінений на інший. У випадку мереж мобільного зв'язку, метадані токена можуть містити незмінний запис, який підтверджує його унікальність. Наприклад: «gNB 1, довгота, широта, радіус дії...».

3. *Право власності*. Токени NFT створюються в межах приватного облікового запису початкового власника, який його створює. Наприклад, НКРЗІ, як початковий власник має право передати токенизовану ліцензію на смугу радіочастотного спектру будь-якому оператору.

4. *Прозорість*. Враховуючи, що реєстри блокчейн є децентралізованими та незмінними, усі записи про створення та передачу токенів можна перевірити у будь-який час. Таким чином, при вторинній передачі ліцензії на смугу

радіочастот, оператор отримувач може перевірити чи дійсно передаваний NFT токен був початково придбаний першим оператором у НКРЗІ.

5. *Інтероперабельність*. Токени NFT можуть бути куплені або продані операторами мобільного зв'язку через будь-яку блокчейн інфраструктуру або кастодіальний сервіс.

Розглянемо більш детально особливості запропонованої моделі токенизації [219].

Токен ліцензійного радіочастотного ресурсу (*LRRT – Licensed Radio Resource Token*) – це цифровий еквівалент мінімального радіочастотного ресурсу в ліцензійному діапазоні, який може торгуватись операторами [219]. LRRT формується як хеш-функція:

$$LRRT_{i,j} = f(PRB_{ij}), \quad (2.20)$$

де  $PRB_{ij}$  - індекс  $j$ -го ресурсного блоку в  $i$ -му частотному діапазоні згідно із стандартизованою таблицею 3GPP (3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project) (табл. 2.4).

Приклад токенизації радіочастотного ресурсу наведено на рис. 2.7.

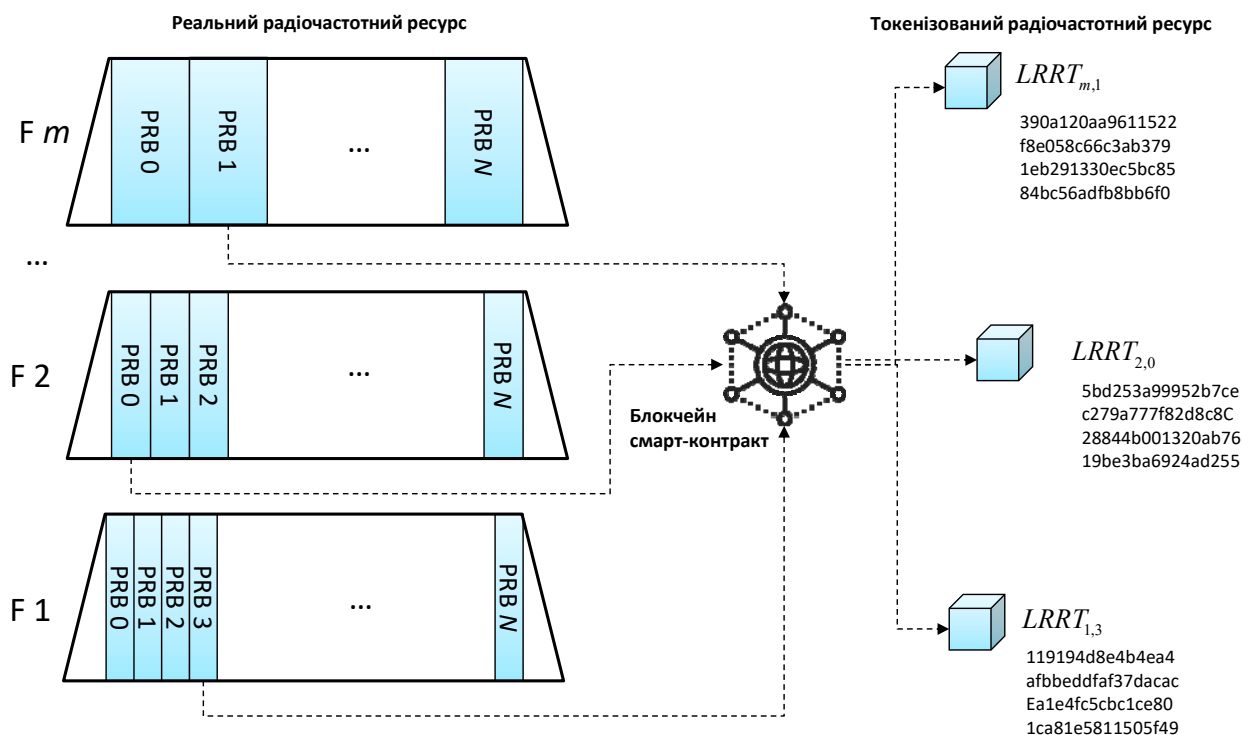


Рис. 2.7. Приклад токенизації радіочастотного ресурсу.

Оператор, який орендує LRRT, отримує тимчасову ексклюзивну ліцензію на використання відповідного радіочастотного ресурсу в межах визначеної множини базових станцій, яка встановлюється смарт-контрактом. Еквівалентна грошова вартість оренди LRRT за одиницю часу встановлюється регулятором з урахуванням особливостей зони обслуговування (міста, села, гірські райони, тощо) та розміру комірок (макрокомірки, фемтокомірки, тощо) [219].

*Токен неліцензійного радіочастотного ресурсу (URRT – Unlicensed Radio Resource Token)* – це мінімальний цифровий еквівалент радіочастотного ресурсу в неліцензійному діапазоні який може торгуватись операторами [219]. Оскільки немає законодавчих передумов для встановлення грошової вартості оренди неліцензійного радіочастотного ресурсу, URRT орендується операторами за квотним принципом на обмежений час в межах визначеної множини базових станцій. Аналогічно до LRRT, URRT формується як хеш-функція:

$$URRT_{i,j} = f(PRB_{ij}). \quad (2.21)$$

Основною метою токенизації радіочастотного ресурсу (рис. 2.7) є створення механізму автоматизованого контролю за спільним використанням радіочастотного ресурсу в мережах мобільного зв'язку забезпечуючи при цьому уникнення взаємних інтерференційних завад. Для цього перед тим як здійснювати планування радіочастотного ресурсу для передавання даних абонентів, планувальник на базовій станції gNB або вузлі DU здійснює програмну перевірку наявності у оператора токенів з відповідними значеннями хеш-функцій  $f(PRB_{ij})$  [219].

*Токен інфраструктурного ресурсу (IRT – Infrastructure Resource Token)* – це мінімальний еквівалент ресурсу мережної інфраструктури (передавач базової станції, віртуальна машина, довжина хвилі в оптичних каналах зв'язку, тощо), який може бути орендованим операторами. Вартість IRT є договірною при укладанні смарт-контракту в залежності від типу інфраструктури, місця розташування, вартості електроенергії тощо (рис. 2.8) [219].

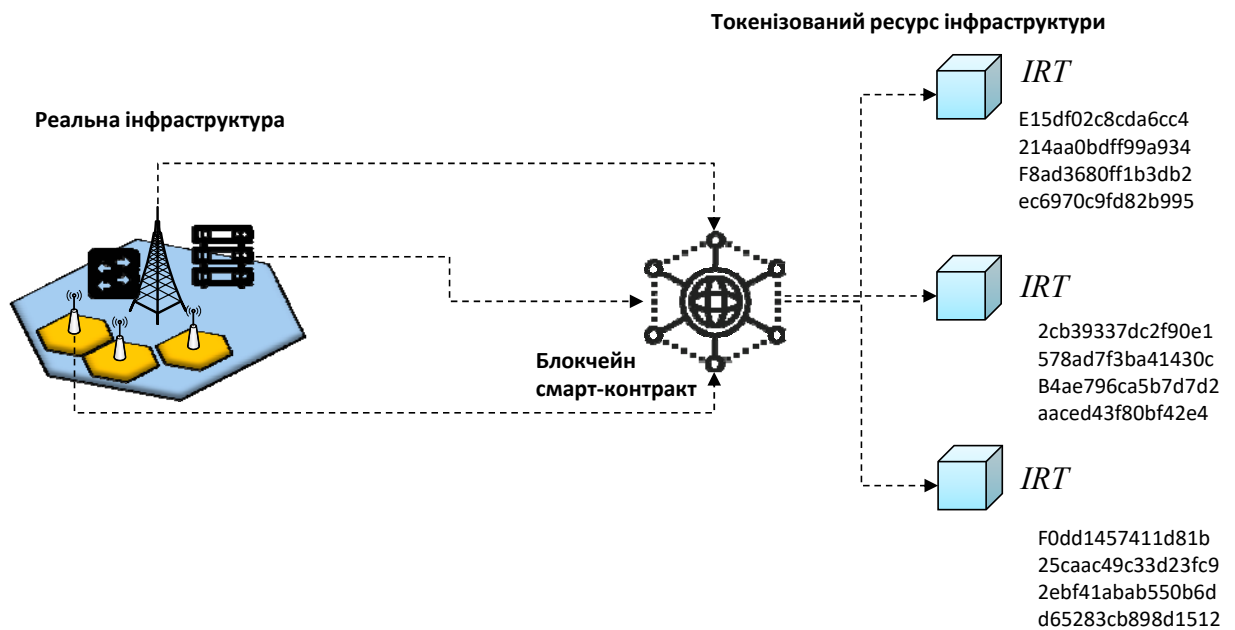


Рис. 2.8. Приклад токенизації мережної інфраструктури.

*Національна криптовалюта (CBDC – Central Bank Digital Currency)* - це офіційна криптовалюта, яка емітується центральним банком як еквівалент фіатної валюти країни. Абоненти використовують CBDC для оплати послуг зв'язку через мережу блокчейн. В свою чергу оператори використовують CBDC для купівлі LRRT або IRT в рамках спільного використання ресурсів [219].

## 2.3. Методи автоматизованого управління децентралізованою мережною інфраструктурою мережі мобільного зв'язку з використанням смарт-контрактів

### 2.3.1. Розроблення платформи для управління смарт-контрактами в мережах мобільного зв'язку

Як вже зазначалось вище, технологія блокчейн функціонує на основі інфраструктури розподілених реєстрів, записи у яких постійно синхронізуються та верифікуються усіма вузлами. Модифікація будь-якого запису в розподіленому реєстрі називається транзакцією. Враховуючи складність процесу функціонування децентралізованої мультиоператорної мережі мобільного зв'язку та значну кількість реєстрів, які потребують частих модифікацій найдоцільнішим варіантом управління є використання смарт-



контрактів. Смарт-контракт – фрагмент програми, який виконує певну послідовність транзакцій зі зміни блокчейн реєстрів, при виконанні певних зовнішніх вхідних умов [162,163].

Процес спільного використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури в децентралізованих мережах мобільного зв'язку потребує кількох тисяч транзакцій за секунду, в залежності від активності абонентів, їх переміщення, а також частоти обміну радіоресурсами та мережною інфраструктурою. Тому, важливим аспектом побудови платформи для управління смарт-контрактами в децентралізованих мережах мобільного зв'язку є тип використовуваної інфраструктури блокчейн. Враховуючи різноманіття протоколів консенсусу, які відомі на сьогоднішній час та їх відмінності з точки зору швидкодії, захищеності та масштабованості, можна припустити, що ефективність розроблених смарт-контрактів значною мірою буде залежати від вибору блокчейн інфраструктури.

Смарт-контракт – це комп'ютерна програма, яка зберігається та виконується в інфраструктурі блокчейн, із гарантією коректності виконання на основі протоколів консенсусу між валідаторами (майнерами) у мережі. Смарт-контракти можуть містити довільні комбінації угод між двома і більше сторонами, які описуються за допомогою високорівневих мов програмування. Наприклад, набір смарт-контрактів контрактів на хмарні послуги [163].

Смарт-контракти виконуються у блокчейні у вигляді байт-коду і можуть зініціюватися за допомогою 160-бітної ідентифікаційної адреси. Для розгортання смарт-контракту в інфраструктурі блокчейн необхідно здійснити відповідну транзакцію створення контракту [163]. Після того, як транзакція створення контракту буде прийнята та збережена в блокчейні, відповідний смарт-контракт та його функції можна буде викликати з будь-якого облікового запису в мережі, шляхом надсилання транзакції на його адресу. Тобто, коли нова транзакція з адресою контракту в якості одержувача буде прийнята блокчейном, відповідний смарт-контракт буде виконаний усіма валідаторами (майнерами), враховуючи поточний стан блокчейну. Відповідно, усі результати

виконання транзакцій, таких як обмін радіочастотним ресурсом або мережною інфраструктурою між операторами постійно реєструються в блокчейні забезпечуючи прозорість та справедливість даних угод [163,219].

Детальний розгляд усіх відомих на сьогоднішній день інфраструктур блокчейн, які підтримують розгортання смарт-контрактів є недоцільним в рамках даної дисертаційної роботи. Тому, для подальшого опису запропонованих рішень для управління децентралізованою мережною інфраструктурою на основі смарт-контрактів у роботі буде використано блокчейн-платформу Ethereum [241].

Розглянемо основні моделі управління в децентралізованій мережі мобільного зв'язку, які реалізовано в рамках розробленої платформи на основі смарт-контрактів [216,219,233,236]. Перша модель передбачає взаємодію безпосередньо між операторами мобільного зв'язку через прикладний інтерфейс API та блокчейн-платформу (рис. 2.9).

Крім того, як вже зазначалось вище, усі зареєстровані оператори аналогічно мають змогу обмінюватись, як радіочастотним ресурсом, так і мережною інфраструктурою, шляхом обміну відповідними токенами LRRT та URRT [216,219,236]. Для цього передбачені спеціальні програмні блоки в яких формуються відповідні транзакції. Наприклад, оператор 1 може ініціювати смарт-контракт на оренду одного токена LRRT за фіксовану вартість 1 ETH на період 10 днів. В такому випадку, ініційований смарт-контракт буде очікувати поки на його адресу не буде перераховано 1 ETH від будь-якого зацікавленого оператора 2. При здійсненні оператором 2 транзакції обсягом 1 ETH на адресу смарт-контракту, відповідний токен LRRT автоматично буде переданий на адресу оператора 2. Після закінчення 10 денного терміну оренди токена оператором 2, смарт-контракт автоматично передасть його оператору 1. Більш детально, техніко-економічні аспекти спільного використання радіочастотного ресурсу ліцензійного та неліцензійного діапазону у децентралізованих мережах мобільного зв'язку розглянуті у четвертому розділі дисертаційної роботи.

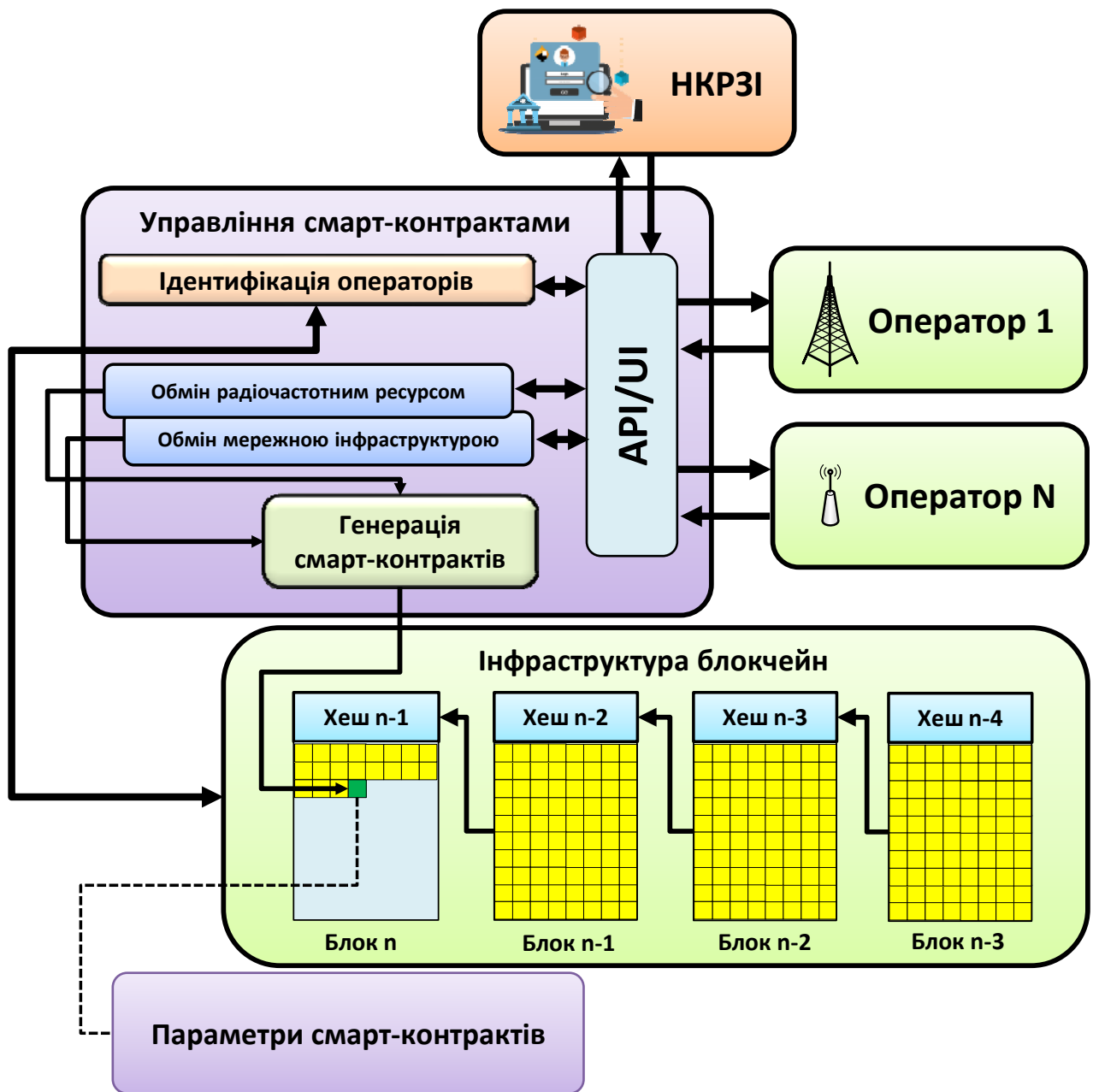


Рис. 2.9. Структурно-функціональна схема платформи для управління смарт-контрактами між операторами.

Друга модель реалізації платформи для смарт-контрактів передбачає взаємодію між операторами та абонентами (рис. 2.10) [219,233,236]. Як вже зазначалось раніше, кожен абонент у децентралізованій мережі повинен мати свій власний обліковий запис, який дає змогу ідентифікувати його у розподіленому реєстрі абонентів. Такий підхід дає змогу абоненту бути незалежним від сервісів лише одного оператора, як це притаманно існуючій централізованій моделі функціонування мереж мобільного зв'язку. При цьому

дані абонента знаходяться в розподіленій базі даних UDR, а блокчейн виконує роль контролю доступу до цих даних для операторів [216]. Таким чином, ми забезпечуємо наскрізну автентифікацію абонента у децентралізованій мережі, що дає йому змогу укласти угоди про надання послуг зв'язку з будь-яким оператором. Крім того, сусідні оператори, мають змогу обмінюватись контекстними даними про абонентів, для забезпечення їх хендоверу або роумінгу між своїми мережами, без розриву обслуговування [219].

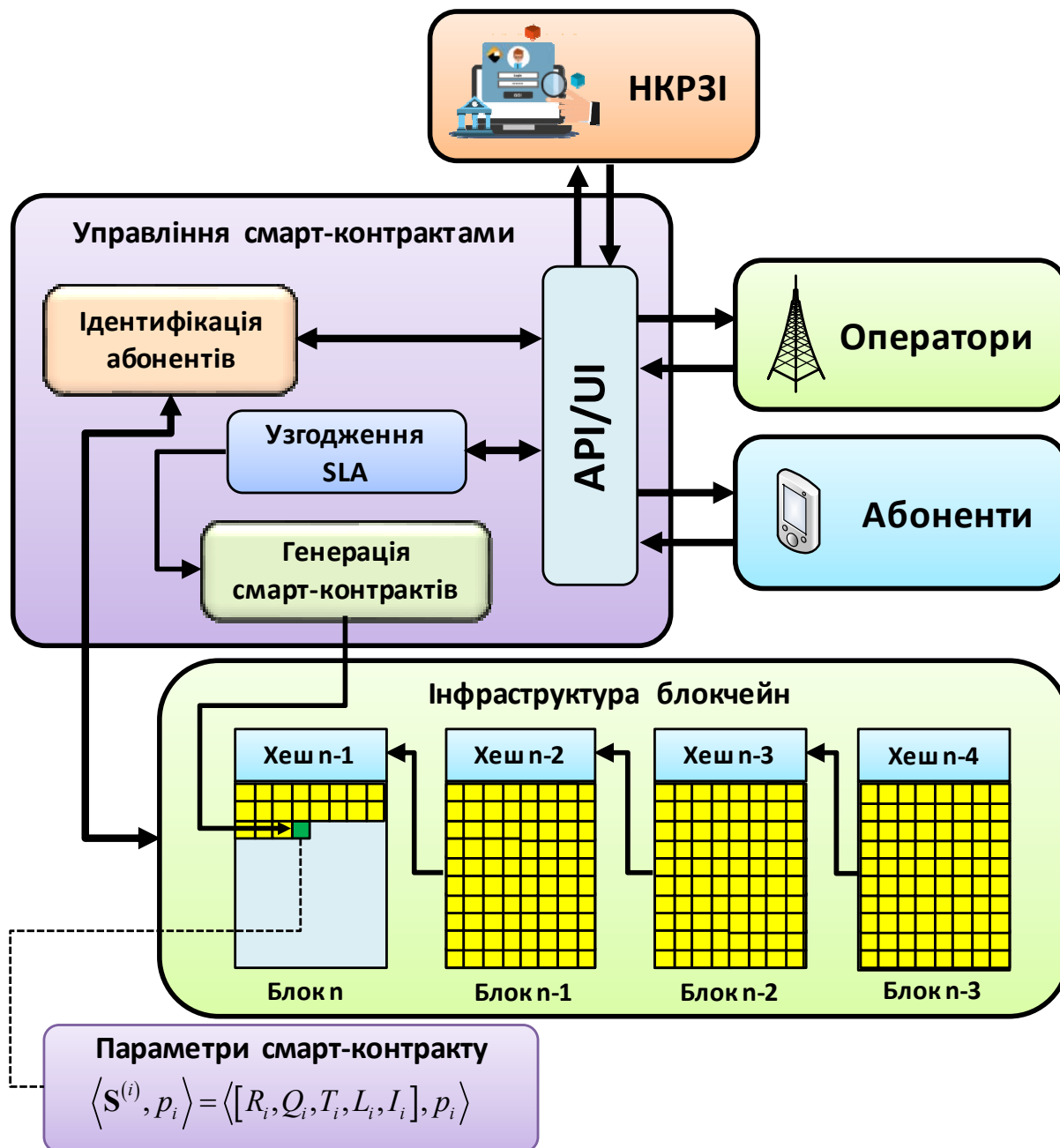


Рис. 2.10. Структурно-функціональна схема платформи для управління смарт-контрактами між абонентами та операторами.

### **2.3.2. Розроблення спеціалізованих смарт-контрактів для реалізації функцій децентралізованого управління в мережах мобільного зв'язку**

Для реалізації повного спектру основних потенційних переваг децентралізованих мереж мобільного зв'язку, в даній роботі пропонується кілька алгоритмів для смарт-контрактів, які спрямовані на підвищення ефективності функціонування мережі. Опис запропонованих алгоритмів представлений нижче [216,219,233,236].

1. *Обмін радіочастотним ресурсом.* Існуючі процедури розподілу радіочастотного ресурсу не підтримують автоматизацію, оскільки регулятори (наприклад НКРЗІ) не можуть відстежувати використання радіочастотного спектру в режимі реального часу та запобігати егоїстичній або несправедливій поведінці операторів. Додаткова складність полягає у великій кількості різних діапазонів частот, які є або неліцензованими, або ліцензованими для різних операторів та стандартів безпроводного зв'язку. Крім того, існуючі економічні механізми для управління фінансовими операціями та угодами про розподіл спектру між операторами не можуть працювати в режимі реального часу. Використовуючи децентралізовані програми на основі засобів технології блокчейн у роботі розробляється автоматизована система торгівлі радіочастотним ресурсом, яка дає змогу дозволяти або забороняти використання спектру оператором на рівні програмного забезпечення для управління базовими станціями. Це необхідно для узгодженого використання радіочастотного ресурсу та обмеження потужності передавання певних базових станцій для уникнення інтерференційних завад [219,233,236].

Крім того, іншою важливою функцією запропонованої моделі, є можливість токенизації радіочастотного ресурсу з прив'язкою до зони обслуговування, що дає змогу регулятору видавати ліцензії на використання одного і того ж радіочастотного ресурсу операторам, які надають сервіси у територіально рознесених зонах покриття, наприклад різні міста, області, тощо (кроки 1-6 на рис. 2.11) [219]. Альтернативним варіантом, є безпосередня

оренда радіочастотного ресурсу між операторами, без участі регулятора (кроки 7-12 на рис. 2.11).

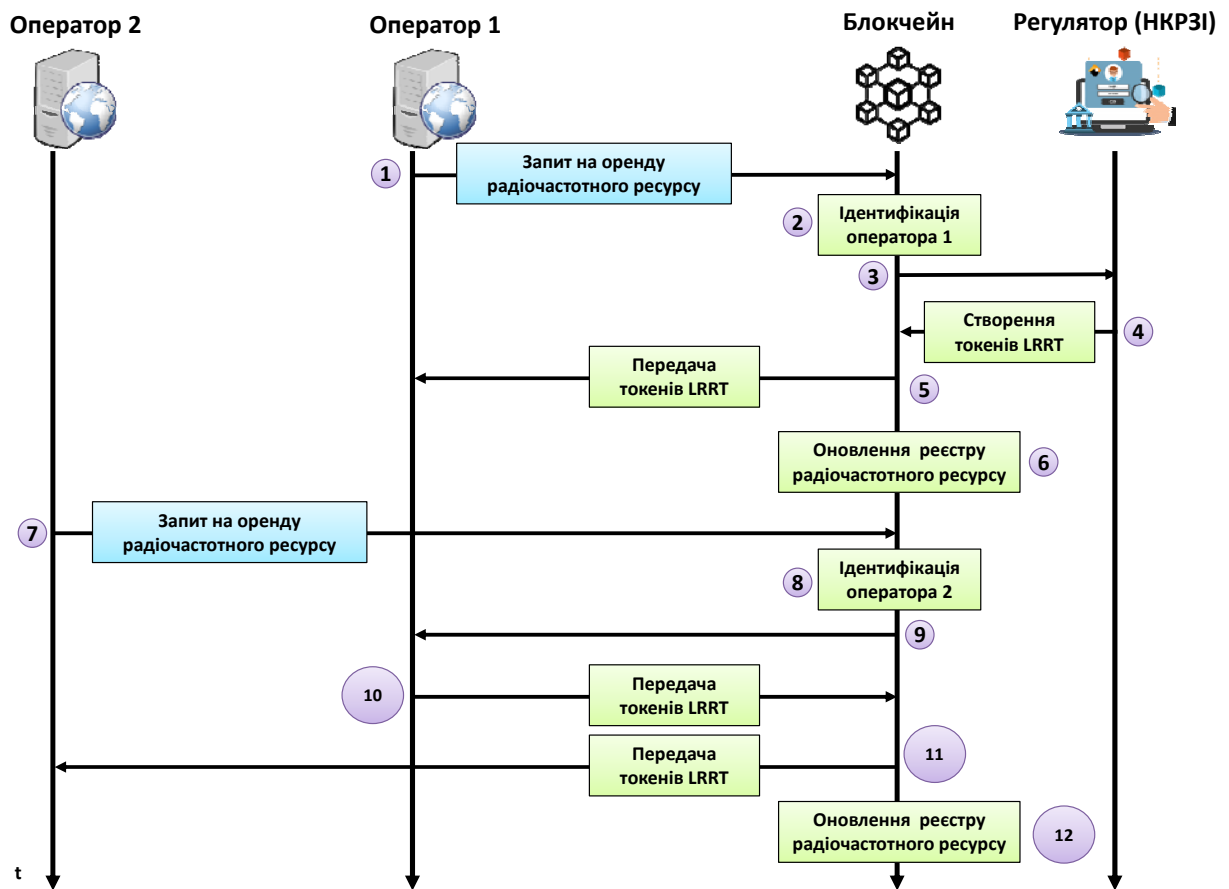


Рис. 2.11. Функціональна діаграма процесу оренди радіочастотного ресурсу між операторами та регулятором.

Це дає змогу приватним мікрооператорам розгортати власну мережну інфраструктуру в локальній місцевості не купуючи при цьому дорогі загальнодержавні ліцензії. Такий механізм сприяє децентралізації та відкритості систем мобільного зв'язку, забезпечуючи операторам можливість працювати на основі гнучких та конкурентоспроможних бізнес-моделей [238,239]. Більш детально, приклад такої моделі буде розглянуто у четвертому розділі дисертаційної роботи.

2. **Спільне використання інфраструктури.** Незважаючи на відносно просту концепцію, спільне використання інфраструктури між багатьма операторами має ряд важливих проблем, які можна вирішити за допомогою

технології блокчейн. По-перше, блокчейн дає змогу відстежувати використання інфраструктури кожним оператором та автоматизовано здійснювати оплату між операторами, використовуючи криптовалюти. По-друге, використання смарт-контрактів дає змогу заздалегідь забронювати ресурси мережної інфраструктури для їх використання оператором у певний проміжок часу. По-третє, блокчейн підтримує інтеграцію сторонніх осіб у систему управління мережною інфраструктурою, що дає змогу розділити додаткові витрати між операторами (електроенергія, вартість оренди, тощо) пропорційно до їхнього використання інфраструктури [219].

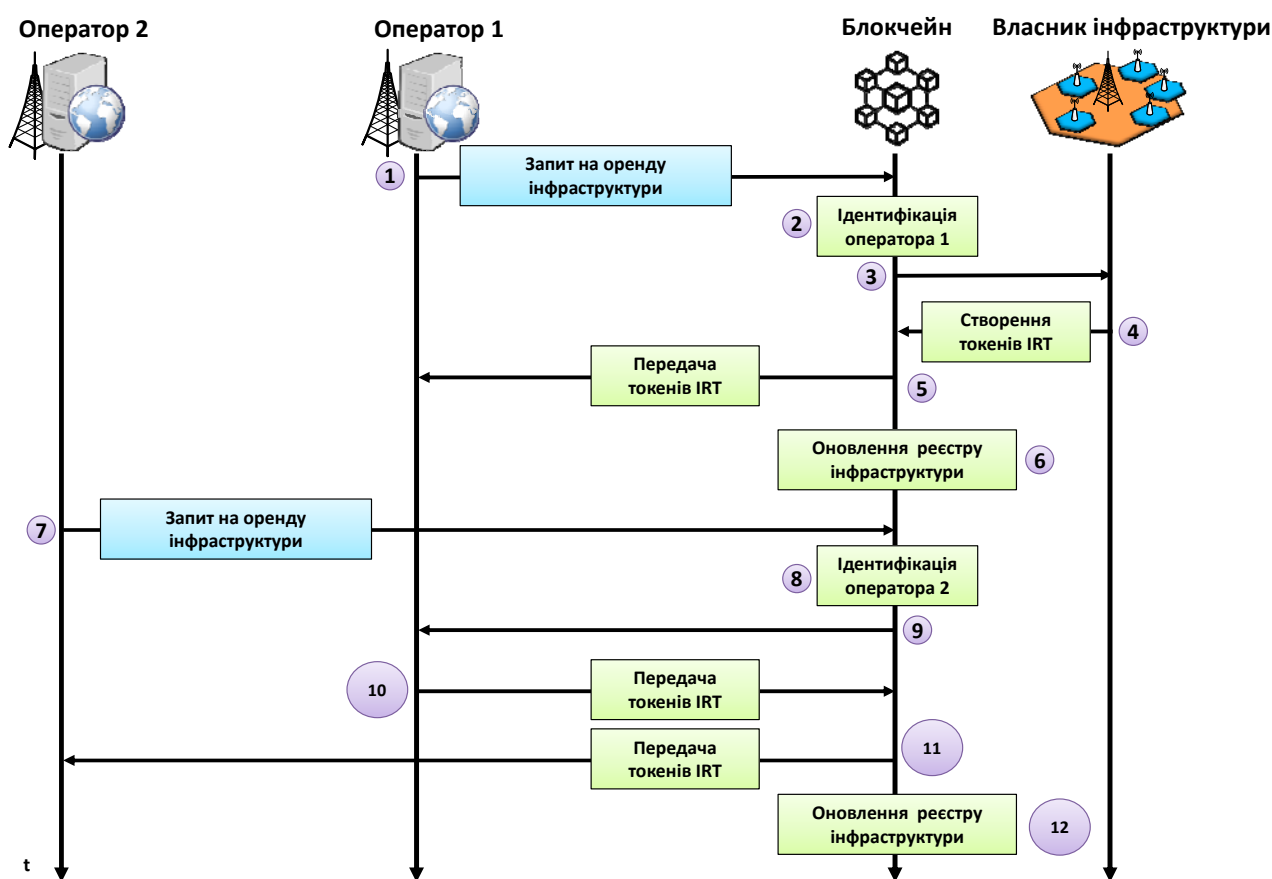


Рис. 2.12. Функціональна діаграма процесу оренди інфраструктури між власниками та операторами.

Ключовою особливістю запропонованої моделі спільного використання мережної інфраструктури є можливість залучення сторонніх стейкхолдерів до безпосередньої участі у ринку мобільного зв'язку [219]. Як приклад, можна навести будівельні компанії, які при зведенні житлових будівель, офісних або

торгових центрів мають змогу більш ефективно закласти необхідну кабельну та безпроводну інфраструктуру для мережі мобільного зв'язку. Проте, такі компанії не стануть безпосередньо операторами мобільного зв'язку, а будуть лише надавати інфраструктуру в оренду іншим операторам, використовуючи при цьому смарт-контракти, як показано на рис. 2.12 [219].

3. **Контроль з боку регулюючих органів.** Як показано на рис. 2.11, запропонована платформа може надавати повноваження регуляторним органам, таким як Національна комісія що здійснює державне регулювання в сфері зв'язку та інформатизації (НКРЗІ) та іншим державним органам. Це дає змогу створювати високорівневі політики та обмеження стосовно використання радіочастотного ресурсу, який має спеціалізоване призначення для військових цілей та інших питань, які стосуються національної безпеки держави. Таким чином, поєднуються аспекти децентралізованого обміну радіочастотним ресурсом між операторами, при забезпеченні централізованого регулювання ринку мобільного зв'язку з боку держави. Це дозволяє створити гібридний ринок спектру, де частина радіочастотного ресурсу відкрито торгуються операторами, а частина є забороненою для використання в деяких територіальних зонах, щоб уникнути інтерференційних завад із мережами військового та спецзв'язку. Ще однією перевагою є можливість простого аудиту ринку мобільного зв'язку з використанням відкритих реєстрів блокчейн, для виявлення економічних зловживань, таких як картельні угоди між операторами [219].

4. **Автентифікація, авторизація та облік.** Існуючі мережі мобільного зв'язку використовують універсальні модулі ідентифікації абонентів SIM (Subscriber Identification Module), які мають прив'язку до одного оператора. Таким чином, при необхідності зміни оператора, абонент повинен змінити активну SIM-карту (фізичну або електронну). У роботі пропонується єдиний уніфікований ідентифікатор абонента у мережі блокчейн, який розпізнається усіма операторами в мережі, що дає змогу абонентам обслуговуватись незалежно від оператора мобільного зв'язку (крок 2 на рис. 2.13) [219,233].



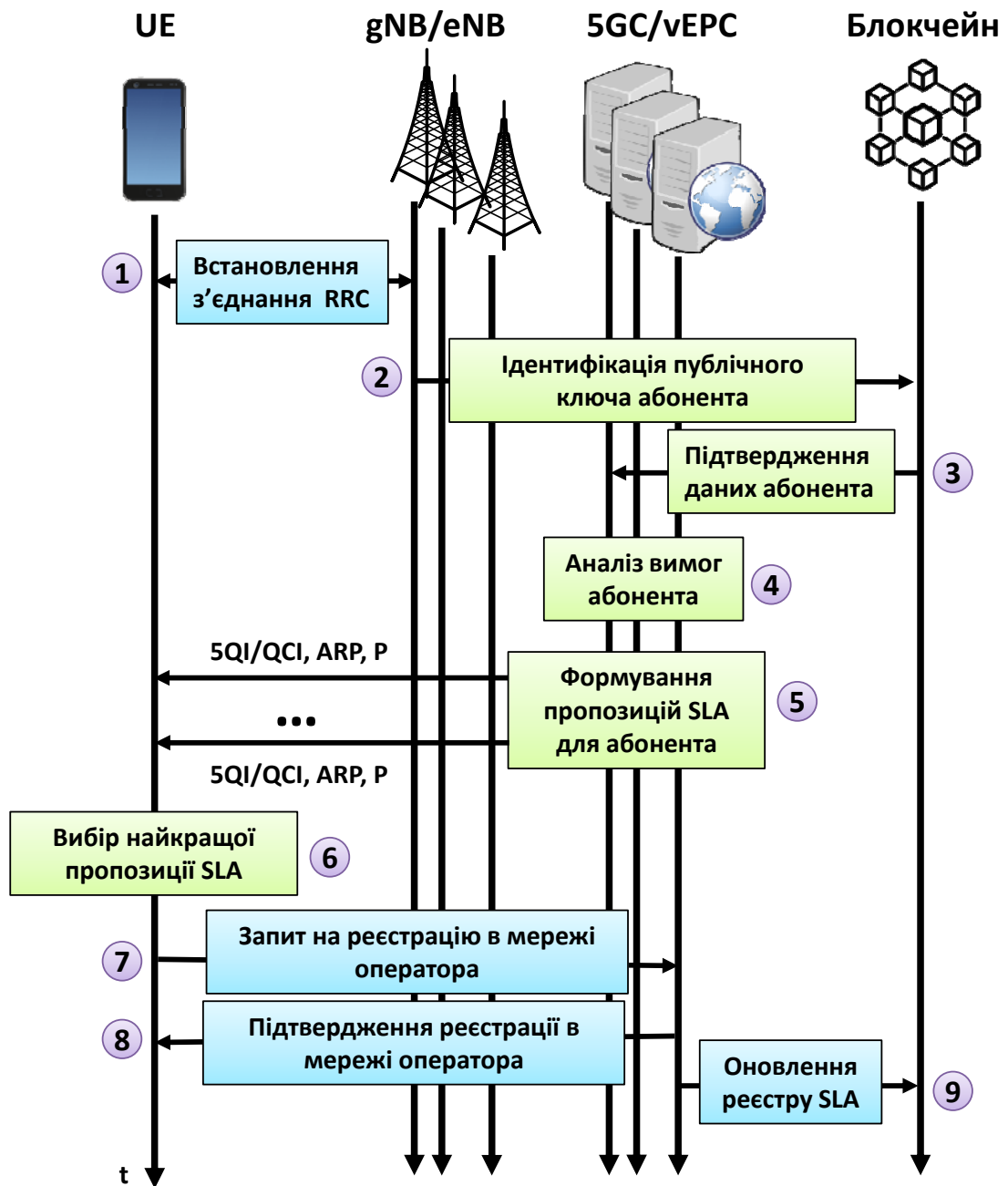


Рис. 2.13. Функціональна діаграма процесу адаптивного обслуговування абонента.

5. *Угоди про рівень обслуговування (SLA)*. На даний момент SLA є однією з найбільш складних процедур у сучасних мережах мобільного зв'язку. Вибір оператора та відповідного тарифного плану для обслуговування часто передбачає компроміс між зоною покриття, вартістю, якістю послуг та багатьма іншими аспектами. У даній роботі дана проблема вирішується з використанням гнучких смарт-контрактів SLA між операторами та абонентами, які

узгоджуються та виконуються в квазі-реальному часі [219,233]. Більш детально дана процедура описується у наступному підрозділі.

**6. Міжнародний роумінг.** Для використання запропонованої платформи операторам та абонентам потрібне лише підключення до Інтернету, яке не залежить від адміністративних кордонів між країнами. Таким чином, на відміну від складної та дорогої системи міжнародних платежів (Swift), транзакції з передавання криптовалют можуть здійснюватися по всьому світу за порівняно невеликий проміжок часу та з незначними комісіями (еквівалент кількох центів). Така властивість, дає змогу усунути адміністративні кордони між мережами мобільного зв'язку, оскільки технічно абоненти мають змогу реєструватися у мережі будь-якого оператора незалежно від країни його реєстрації, і укласти відповідні SLA на основі смарт-контрактів. Таким чином, усувається складна процедура міжнародного роумінгу, яка передбачає укладання угод між операторами мобільного зв'язку в різних країнах про взаємне обслуговування своїх абонентів [219].

**7. Інтелектуальне управління.** Як згадувалось у попередніх підрозділах, сучасні мережі мобільного зв'язку значною мірою функціонують з використанням технологій програмно-конфігурованих мереж SDN, віртуалізації мережних функцій NFV та логічного розділення інфраструктури (Network Slicing). Враховуючи складну гетерогенну інфраструктуру децентралізованих мереж мобільного зв'язку, частину функцій управління у мережі реалізується з використанням методів та засобів штучного інтелекту. Методи штучного інтелекту в свою чергу використовують чітко структуровані та перевірені дані для самонавчання, достовірність яких забезпечується розподіленими реєстрами блокчейн. Крім того, використання децентралізованого консенсусу дає змогу забезпечити верифікацію навчених моделей штучного інтелекту, забезпечуючи можливість їх використання будь-яким оператором мобільного зв'язку із збереження довіри до системи управління [216,219].

#### **2.4. Розроблення методу адаптивного вибору оператора в режимі реального часу в децентралізованих мережах мобільного зв'язку**

Для підтримки процесу адаптивного обслуговування абонентів у децентралізованих мережах мобільного зв'язку запропоновано *метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу шляхом інтегрального оцінювання якості та вартості послуг* на основі смарт-контрактів у мережі блокчейн [219,233].

У класичних мережах мобільного зв'язку, зокрема стандартів LTE, процес з'єднання абонента із базовою станцією здійснюється на основі вимірних значень потужності (RSRP – Reference Signal Received Power) або якості (RSRQ – Reference Signal Received Quality) прийнятого пілотного сигналу [242-245]. Проте, дані критерії є ефективними лише у випадку, коли користувачі мають статичний контракт з одним оператором. Для випадку адаптивного та мультиоператорного режимів роботи, критерії RSRP/RSRQ є актуальними лише при першому під'єднанні абонента [219,233]. Основною метою запропонованого методу є врахування не лише технічних, але і економічних аспектів ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку. Тому, окрім врахування параметру RSRP, запропонований метод враховує вартість послуги для кінцевих абонентів [219].

Однчасне врахування технічних та економічних аспектів є складним завданням, яке вимагає виведення функції корисності абонента, яку можна використовувати як метрику для підтримки процесу прийняття рішень (2.1) [233]. Важливим критерієм для функції корисності є встановлення компромісу між вартістю та якістю сервісу таким чином, щоб значення функції корисності було прямо пропорційним до якості та обернено пропорційним до вартості сервісу. Проте, дана оцінка ускладнюється тим, що у деяких випадках, абсолютно протилежні за змістом параметри, можуть мати однакове значення функції корисності. Наприклад, сервіс з високою якістю за високу ціну матиме таке ж значення функції корисності, як сервіс з низькою якістю за пропорційно нижчу ціну. Для вирішення даного протиріччя, пропонується функція

корисності з додатковим параметром пріоритетності критеріїв, який визначатиме побажання окремого абонента [233]. Таким чином, користувачі безпосередньо можуть виставити власні пріоритети з точки зору максимізації якості зв'язку або мінімізації його вартості.

В запропонованому методі адаптивного вибору оператора, функція корисності абонента (2.1), аналітично виведена на основі інтегрального параметру якості сервісу –  $q$ , параметру вартості сервісу нормованого по часу –  $p$  та компромісного коефіцієнту між вартістю та якістю сервісу –  $\mu \in (0,1)$ , з урахуванням порогових критеріїв мінімальної якості та максимальної вартості [233]:

$$u(q^k, p^k) = \left[ \mu(q^k - q_{\min}) + (1 - \mu)(p_{\max} - p^k) \right] \Theta(p_{\max} - p^k) \Theta(q^k - q_{\min}), \quad (2.22)$$

де  $k$  – індекс оператора,  $q_{\min}$  – мінімальна якість сервісу, яка задовольняє абонента,  $p_{\max}$  – максимальна вартість, яку кінцевий користувач готовий сплатити за відповідний сервіс,  $\Theta(x)$  – функція Хевісайда, яка забезпечує відкидання усіх пропозицій SLA, які не задовольняють порогові вимоги абонента:

$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}. \quad (2.23)$$

Критерій  $\mu \in (0,1)$  у виразі (2.22) є важливим для уникнення протиріччя, при якому сервіс з високою вартістю та якістю матиме таке ж значення функції корисності, як і сервіс з пропорційно нижчою вартістю та якістю. Це дає змогу абоненту заплатити вищу ціну при важливій відео-конференції, і водночас мінімізувати свої витрати та знизити навантаження на мережну інфраструктуру, при використанні менш критичних сервісів або при фоновому завантаженні оновлень. Алгоритм функціонування запропонованого методу адаптивного вибору оператора представлений на функціональній схемі на рис. 2.13 [233].

**Етап 1.** Початково, абонент  $i$  встановлює з'єднання з довільною базовою станцією, і надсилає власні вимоги  $q_{\min}$  та  $p_{\max}$ , а також виміряні значення

RSRP (Reference Signal Received Power) для усіх видимих gNB.

**Етап 2.** Базова станція надсилає запит сервісу абонента разом з його публічним ключем у блокчейн для перевірки смарт-контрактом.

**Етап 3.** Якщо інформація про абонента підтверджена у розподіленому реєстрі, смарт-контракт оголошує тендер між операторами, які є у зоні видимості абонента.

**Етап 4.** Оператори аналізують усі запити абонентів, визначають наявні можливості для обслуговування абонентів, враховуючи значення RSRP, доступний обсяг радіочастотного ресурсу в ліцензійному та неліцензійному діапазоні та здійснюють планування ресурсів згідно специфікації 3GPP TS 38.306.

**Етап 5.** Кожен оператор формує пропозицію SLA для абонента, яка складається із множини показників якості та вартості сервісу:

$$\langle \mathbf{S}^{(i)}, p_i \rangle = \langle [R_i, Q_i, T_i, L_i, I_i], p_i \rangle, \quad (2.24)$$

де  $R_i, Q_i, T_i, L_i$  – нормовані параметри швидкості передавання даних, пріоритету сервісу, затримки та втрат, які визначаються ідентифікатором 5QI (5G Quality Identifier),  $I_i$  – пріоритет абонента,  $p_i$  – вартість сервісу нормована по часу,  $i$  – індекс абонента.

**Етап 6.** Абонент розраховує значення функції корисності для кожного оператора. Функції корисності можна розписати як часткові компоненти окремих складових:

$$\begin{cases} u_i^{(k)}(R_i^{(k)}) = [\mu^{(R)}(R_i^{(k)} - R_i^{(\min)}) + (1 - \mu^{(R)})(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)})] \Theta(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)}) \Theta(R_i^{(k)} - R_i^{(\min)}) \\ u_i^{(k)}(Q_i^{(k)}) = [\mu^{(Q)}(Q_i^{(k)} - Q_i^{(\min)}) + (1 - \mu^{(Q)})(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)})] \Theta(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)}) \Theta(Q_i^{(k)} - Q_i^{(\min)}) \\ u_i^{(k)}(T_i^{(k)}) = [\mu^{(T)}(T_i^{(k)} - T_i^{(\min)}) + (1 - \mu^{(T)})(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)})] \Theta(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)}) \Theta(T_i^{(k)} - T_i^{(\min)}) \\ u_i^{(k)}(L_i^{(k)}) = [\mu^{(L)}(L_i^{(k)} - L_i^{(\min)}) + (1 - \mu^{(L)})(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)})] \Theta(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)}) \Theta(L_i^{(k)} - L_i^{(\min)}) \\ u_i^{(k)}(I_i^{(k)}) = [\mu^{(I)}(I_i^{(k)} - I_i^{(\min)}) + (1 - \mu^{(I)})(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)})] \Theta(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)}) \Theta(I_i^{(k)} - I_i^{(\min)}) \end{cases} \quad (2.25)$$

Проте, для спрощення, представимо множину пропозицій SLA операторів у вигляді матриці  $\mathbf{X} \in [J \times K]$ , де  $x_{j,k} = \mathbf{X}(j, k)$  – значення параметру якості  $\mathbf{S}_j^{(k)}$ ,

яке пропонується абоненту оператором  $k$ , з вартістю  $p$ . Тоді, часткові функції корисності для абонента, записуються у вигляді матриці  $\underline{U} \in [J \times K]$ , де:

$$u_{jk} = \left[ \mu^{(S_j^{(k)})} (x_{j,k} - S_j^{(\min)}) + \left( 1 - \mu^{(S_j^{(k)})} \right) (p^{(\max)} - p^{(k)}) \right] \Theta(p^{(\max)} - p^{(k)}) \Theta(x_{j,k} - S_j^{(\min)}). \quad (2.26)$$

Серед усіх пропозицій операторів, абонент вибирає пропозицію з найвищим значенням інтегральної функції корисності:

$$f^{(i)} = \max_{\forall k} \sum_j \underline{U}(j, k) \quad (2.27)$$

**Етап 7.** Абонент надсилає запит на реєстрацію у мережі обраного оператора.

**Етап 8.** Оператор підтверджує реєстрацію абонента в мережі.

**Етап 9.** Оператор оновлює реєстр SLA в мережі блокчейн для запуску процесу тарифікації зв'язку для абонента.

Для порівняння обрано два сценарії обслуговування абонентів у мережі мобільного зв'язку [219]. Перший варіант – класичне обслуговування при якому абоненти пропорційно розподіляються між операторами мобільного зв'язку, які в свою чергу мають фіксовані смуги радіочастотного ресурсу. Кожен оператор купує тимчасову ліцензію на конкретний діапазон радіочастот та зону покриття, передаючи певну кількість криптовалюти CBDC власнику або регулятору спектру. Ця інформація зберігається у розподіленому реєстрі та перевіряється усіма іншими вузлами в блокчейні. Таким чином, будь-який інший оператор не зможе використовувати цей конкретний діапазон радіочастот, поки не завершиться термін оренди поточного оператора.

Оператор використовує наявний радіочастотний ресурс для надання послуг абонентам, використовуючи процедуру планування ресурсів, яка є визначеною у специфікації 3GPP TS 38.912 [85]. У цьому випадку оператор використовує напів-постійне резервування ресурсів, тобто планування абонентів проводиться як зазвичай. З точки зору абонента, процедура також здійснюється згідно 3GPP TS 38.912 [85]. Варто зазначити, що для моделювання обрано еталонний метод планування ресурсів Round-robin, який

на практиці операторами не використовується. Таке обмеження необхідне для того, щоб оцінити чистий вплив методу адаптивного вибору оператора на техніко-економічну ефективність мережі, який важко було б визначити використовуючи планування за методом ePF (enhanced Proportional Fair).

Другий варіант, передбачає, що абоненти мають змогу адаптивно вибирати оператора, при тому, що розподіл спектру між операторами здійснюється динамічно [219]. Спочатку абонент підключається до доступної базової станції будь-якого оператора та реєструється в мережі, використовуючи свій власний ідентифікатор у блокчейні. Після того, як абонент зареєстрований у мережі оператора, для нього встановлюється QoS Flow (EPS bearer для мереж LTE) за замовчуванням з мінімальними вимогами, яких достатньо для того щоб взаємодіяти у мережі блокчейн [49-57]. Після цього запускається механізм адаптивного вибору оператора, який описаний вище. Після вибору найкращої пропозиції абонентом, «оператор-переможець» встановлює виділений інформаційний канал QoS Flow з параметрами QoS, які узгоджені в смарт-контракті, в той час як абонент надсилає відповідну суму у криптовалюті на адресу смарт-контракту [219,233]. При дотриманні всіх умов обслуговування, смарт-контракт надішле відповідну суму на гаманець оператора. У випадку умисного порушення оператором умов обслуговування, кошти будуть повернуті абоненту. Слід зазначити, що запропонований варіант обраний лише для моделювання, і на практиці існує численна кількість варіантів оплати послуг між абонентом та оператором, включаючи пакетні та безлімітні тарифні плани. Проте, порівняння усіх комбінацій потребує фундаментального економічного аналізу, який виходить за рамки даної дисертаційної роботи. Тим не менш, усі відомі на сьогоднішній день практики можуть бути реалізовані з використанням криптовалют та технології блокчейн.

Для моделювання, обрано топологію мережі мобільного зв'язку, яка складається із 100 мікрокомірок, які рівномірно розподілені в рамках досліджуваної території, і розділені між 10 операторами мобільного зв'язку, по 10 мікрокомірок для кожного оператора. Моделювання в проводилось для

періоду однієї доби. При моделюванні переміщення, абоненти розділені на два типи. Перший тип - це пішоходи, а другий тип – пасажери автомобілів. При чому кожен імітований автомобіль одночасно перевозить 4-х активних абонентів мережі мобільного зв'язку. Переміщення абонентів здійснюється із поточного місцезнаходження у випадково згенеровану точку на карті, за найкоротшим маршрутом відповідно до Манхеттенської відстані [219]. При цьому, швидкість переміщення абонентів в автомобілях (30 км/год) є суттєво вищою, ніж пішоходів (5 км/год). Після досягнення місця призначення, абонент затримується там на деякий випадковий період часу, після чого генерується новий пункт призначення, і алгоритм повторюється знову. Параметри імітаційної моделі, які були використані для моделювання методу адаптивного вибору оператора, представлені у табл. 2.3 [219].

Усереднені результати експериментальних досліджень на основі ряду моделювань показали, що метод адаптивного вибору оператора дає змогу на 11% підвищити пропускну здатність для абонентів при незмінній вартості сервісу (рис. 2.14,а), а також на 27% збільшити прибутки операторів (рис. 2.14,б), у порівнянні із статичним розподілом абонентів. Це можна пояснити тим, що при переміщенні абонентів між комірками, змінюється їх завантаженість, що призводить до моментів, коли одна комірка може бути перевантаженою, в той час як сусідня комірка може мати надлишок невикористаного радіочастотного ресурсу [219]. Враховуючи довгу тривалість моделювання та невелику частоту зміни оператора абонентом, вплив затримки у блокчейн в даному випадку є несуттєвим та не впливає на характеристики мережі. Проте, при зростанні кількості транзакцій даний аспект необхідно враховувати. Більш детально різні типи блокчейнів будуть розглянуті у шостому розділі роботи.

В класичних централізованих мережах мобільного зв'язку LTE та 5G для боротьби з перевантаженнями використовується алгоритм MLB (Mobility Load Balancing), який здійснює примусовий хендовер абонента між комірками оператора для балансування навантаження між ними. Проте, у випадку



децентралізованих мереж мобільного зв'язку, оператор не має змоги здійснити примусовий хендовер абонента у мережу іншого оператора, що призводить до зниження його економічної ефективності при простоях радіочастотного ресурсу, або зниження пропускної здатності для абонентів, при перевантаженні комірок, що спостерігається на рис. 2.14.

Таблиця 2.3.

Параметри імітаційної моделі [219]

Параметр	Значення
<b>Параметри мережі радіодоступу</b>	
Розмір	1 км <sup>2</sup>
Потужність передавання gNB TX	6.3 Вт
Смуга частот	20 МГц
Частота несучої	2.1 ГГц
Смуга одного ресурсного блоку	180 кГц
Коефіцієнт підсилення антени	0 дБі (ізотропна)
Висота антени	3 м
Кількість базових станцій gNBs	100
Топологія розташування gNBs	Відповідно до алгоритму з [15]
Модель поширення хвиль	NLOS
Метод планування радіоресурсів	Round-robin
<b>Абоненти</b>	
Кількість абонентів	Від 50 до 500
Висота антени	1 м
Швидкість переміщення	5 км/г – пішоходи 30 км/г – автомобілі
Модель мобільності	Відповідно до алгоритму з [13]
Значення параметра $\mu$	0.5
Мінімальна пропускна здатність	300 кбіт/с
<b>Інфраструктура блокчейн</b>	
Мережа	Ethereum
Алгоритм консенсусу	Proof of Work
Алгоритм майнінгу	Ethash
Середовище для обчислень	Віртуальна машина Ethereum (EVM)
Час блоку	15.00 с
Хеш-рейт	0.1 Хеш/с
Обмеження Gas	21000 Gas
Вартість Gas	0.01 умовних одиниць

При використанні адаптивного вибору оператора та динамічного розподілу ресурсів, абоненти мають змогу обирати операторів, які забезпечують кращі умови обслуговування, забезпечуючи вищу пропускну здатність за одиницю вартості, як можна побачити з рис. 2.14.а. В свою чергу, оператори динамічно змінюють розподіл радіочастотного ресурсу між собою в залежності від кількості обслуговуваних абонентів, що дає їм змогу оптимізувати витрати на оплату радіочастотного ресурсу, забезпечуючи тим самим вищий чистий дохід від обслуговування абонентів, що спостерігається на рис. 2.14.б [219].

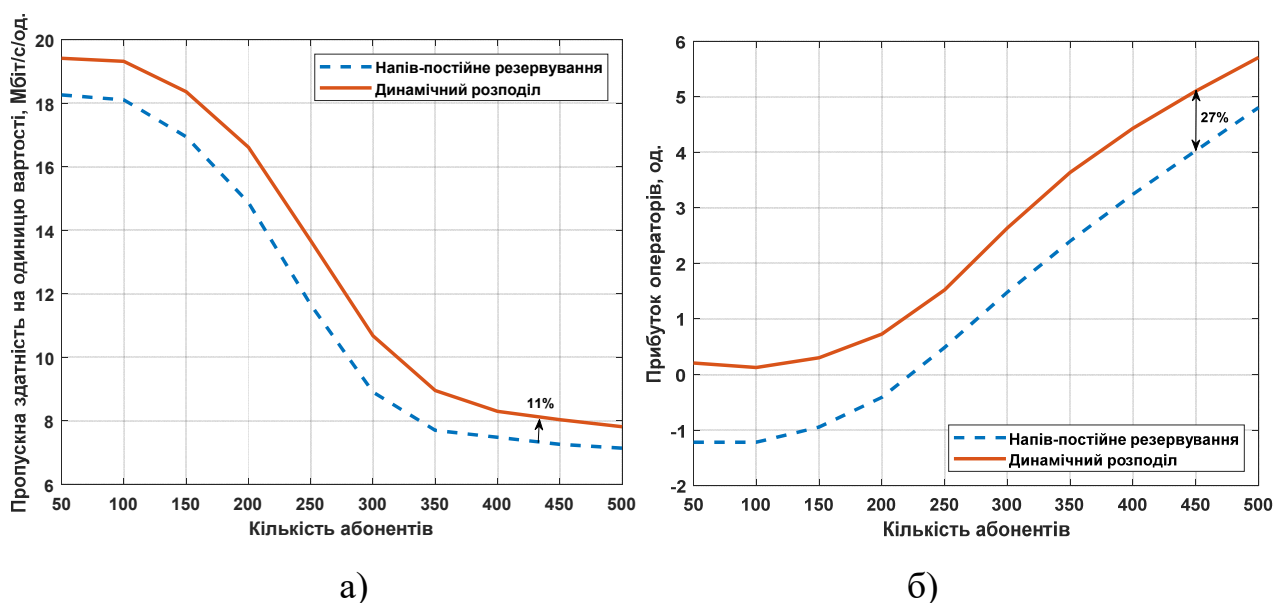


Рис. 2.14. Результати моделювання запропонованого методу адаптивного вибору оператора з точки зору пропускну здатності абонента за одиницю вартості – а) та прибутку операторів – б).

## 2.5. Моделі функціонування децентралізованої мережі мобільного зв'язку в площині інтелектуального управління

### 2.5.1. Модель системи інтелектуального управління мережею мобільного зв'язку

Площина інтелектуального управління відповідає за процес функціонування розподіленої мультиоператорної інфраструктури мережі мобільного зв'язку в національному або транснаціональному масштабі для забезпечення якісного зв'язку для абонентів незалежно від їх адміністративно-

територіального розташування. В даній площині безпосередньо формується інтелект системи управління, який формується шляхом машинного навчання на даних про параметри функціонування мережі [216-218,220,221].

В роботі пропонується новий підхід до організації процесу інтелектуального управління мережною інфраструктурою з урахуванням особливостей її децентралізації та мультиоператорної. Функціональні аспекти реалізації окремих методів інтелектуального управління розглядаються у наступних розділах дисертаційної роботи. В даному розділі ми зосереджуємо увагу на загальній архітектурі процесу навчання інтелектуальних алгоритмів, з точки зору забезпечення ефективних механізмів збору та попередньої обробки даних (рис. 2.15) [216,218].

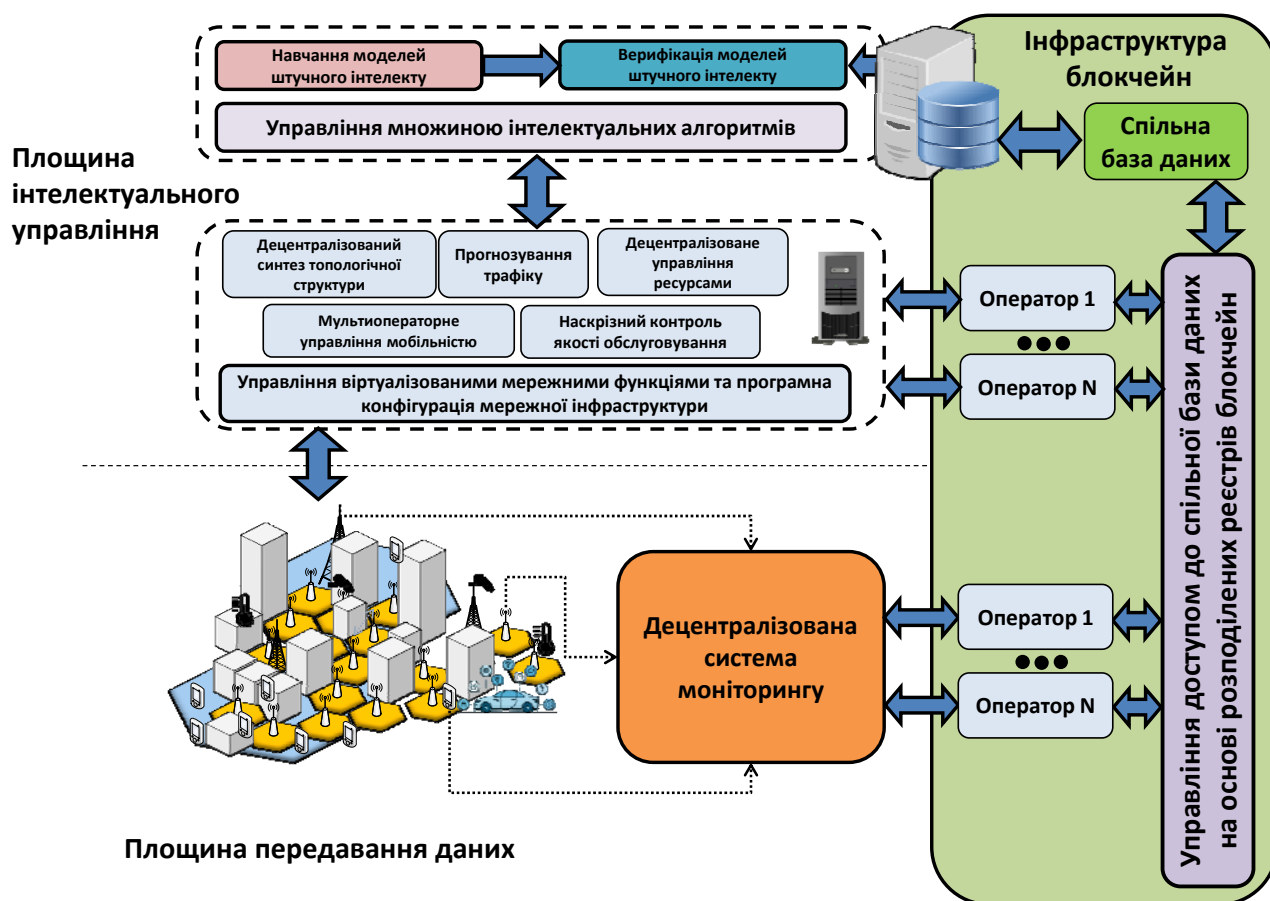


Рис. 2.15. Загальна архітектура системи інтелектуального управління децентралізованими мережами мобільного зв'язку.

Процес інтелектуального управління мережною інфраструктурою зазвичай визначає певний набір цільових критеріїв, які приймаються в якості метрик



мережі при зміні її конфігурацій в процесі управління, що дає змогу прийняти рішення про ефективність навчених моделей, і виявляти моменти коли дані моделі потребують оновлення [216,219]. Безпосередньо, моделі штучного інтелекту, які розглядаються в даній роботі, присвячені для вирішення завдання прогнозування екзогенних факторів, до яких відноситься поведінка абонентів у мережі мобільного зв'язку та їх просторове переміщення, а також для адаптації ендогенних факторів, до яких відноситься процес синтезу ефективної топологічної структури, процес адаптивного вибору оператора, процес управління радіочастотним ресурсом та процес наскрізного управління інформаційними потоками [216,219].

В умовах децентралізації мережної інфраструктури система інтелектуального управління, яка представлена на рис. 2.15, повинна мати наступні властивості [216,218].

1. Моніторинг мережі повинен бути спільним для всіх операторів, враховуючи можливість спільного використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури, а також адаптивне обслуговування абонентів у мережі будь-якого оператора.
2. Моделі штучного інтелекту поділяються на персональні, які належать окремим операторам і використовуються для підвищення ефективності власних сервісів для абонентів та спільні, які використовуються для підвищення ефективності мережної інфраструктури в цілому.
3. Доступ до бази даних абонентів повинен бути спільним для операторів, з метою забезпечення їх ефективного обслуговування незалежно від адміністративно-територіального розташування та поточного оператора.

Для забезпечення вищенаведених властивостей у роботі розробляється інформаційна система управління мережною інфраструктурою, яка складається із ядра, яке відповідає за основні функції управління моделями штучного інтелекту та передавання керуючої інформації до елементів мережної інфраструктури та системи моніторингу (рис. 2.16). Взаємодія системи із фізичною інфраструктурою здійснюється за допомогою стандартизованих

протоколів HTTP (HyperText Transfer Protocol), CoAP (Constrained Application Protocol) та MQTT (Message Queue Telemetry Transport) [218,246]. Варто зазначити, що для інтеграції інформаційної системи та системи збору даних необхідно забезпечити ефективні механізми управління даними, які дають змогу гарантувати високий рівень безпеки усіх мережних сервісів, захищеність реєстрів даних абонентів, а також повноцінну інтеграцію усіх операторів мобільного зв'язку в національному масштабі на основі технології блокчейн [216].

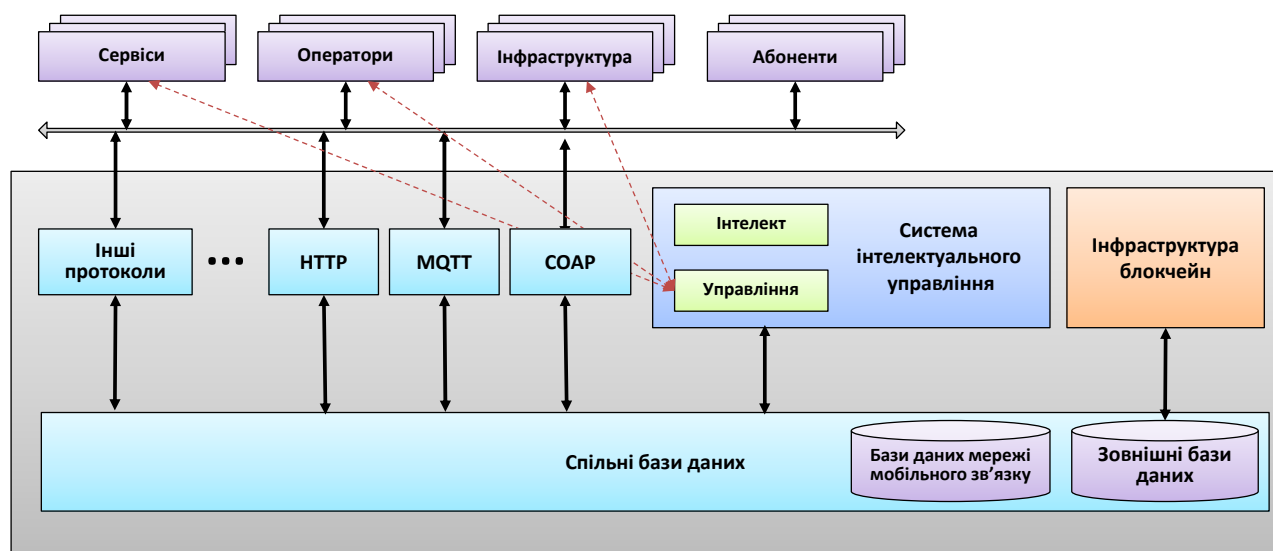


Рис. 2.16. Структурно-функціональна модель інформаційної системи управління децентралізованою мережною інфраструктурою.

### 2.5.2. Система децентралізованого краудсорсингового моніторингу параметрів мережі мобільного зв'язку

Збір даних про основні параметри функціонування мережної інфраструктури здійснюється з використанням розробленої системи краудсорсингового моніторингу [218,246]. Дана система відповідає за збір даних в текстовому або числовому вигляді та пересилання їх у відповідні бази даних. Ключовою відмінністю даної системи від традиційних методів, які використовуються операторами є те, що в основі процесу моніторингу є кінцеві абоненти, які здійснюють збір даних про показники ефективності функціонування мережі, включаючи інформацію про рівень задоволеності

якістю сервісу. Такий підхід неможливо реалізувати існуючими засобами моніторингу, які передбачені у стандарті 5G, оскільки вони передбачають централізоване функціонування в межах домену одного оператора, що суттєво ускладнить процес узгодження результатів моніторингу між операторами для формування консенсусної бази даних.

Розроблена система базується на використанні протоколу MQTT для телеметрії даних безпосередньо на пристроях абонентів [251]. MQTT – це адаптований протокол TCP (Transmission Control Protocol – протокол управління передачею), який спеціально розроблений для систем Інтернет речей [251]. Переваги протоколу MQTT полягають у простоті реалізації, гарантованій доставці даних та інваріантності до типу інформації. У запропонованій системі всі мережні вузли можуть бути джерелами даних MQTT та надсилати свої параметри до MQTT брокера, розділяючи їх по відповідних тематиках. MQTT брокер, в свою чергу, пересилає дані лише до тих вузлів, які безпосередньо підписані на певні тематики [251]. Така схема підтримує надзвичайно велику кількість клієнтів, що дає змогу використовувати її для децентралізованих мультиоператорних мереж 5G [218,251]. Ще однією перевагою запропонованої системи моніторингу є невеликий розмір переданих блоків даних, що дає змогу передавати дані з швидкістю менше 200 кбіт/с [218,251]. Враховуючи, що існуючі мережі 5G підтримують швидкість передавання даних від десятків Мбіт/с до кількох Гбіт/с, надлишок передавання даних при використанні запропонованої системи моніторингу буде незначним для мережі радіодоступу та транспортної мережі. Тим не менш, загальний обсяг даних, який буде отримуватися в процесі функціонування системи буде достатній для формування навчальних вибірок для моделей штучного інтелекту. Такий підхід дає змогу операторам у децентралізованій мережі гнучко налаштовувати конфігурацію системи моніторингу вибираючи лише дані, які є безпосередньо важливими для поточних умов обслуговування в мережі [216,218]. Іншим важливим аспектом запропонованої системи є її асинхронність, що дає змогу відокремити процеси

моніторингу від процесів обслуговування абонентів в децентралізованих системах мобільного зв'язку.

Враховуючи високу вартість збереження великих обсягів даних у розподілених реєстрах блокчейн, при реалізації системи моніторингу використано гібридну архітектуру, в якій блокчейн використовується лише для автентифікації абонентів та операторів, у той час як передавання даних моніторингу безпосередньо здійснюється напряму в базу даних, яка знаходиться в розподіленому хмарному середовищі (рис. 2.17) [216-218].

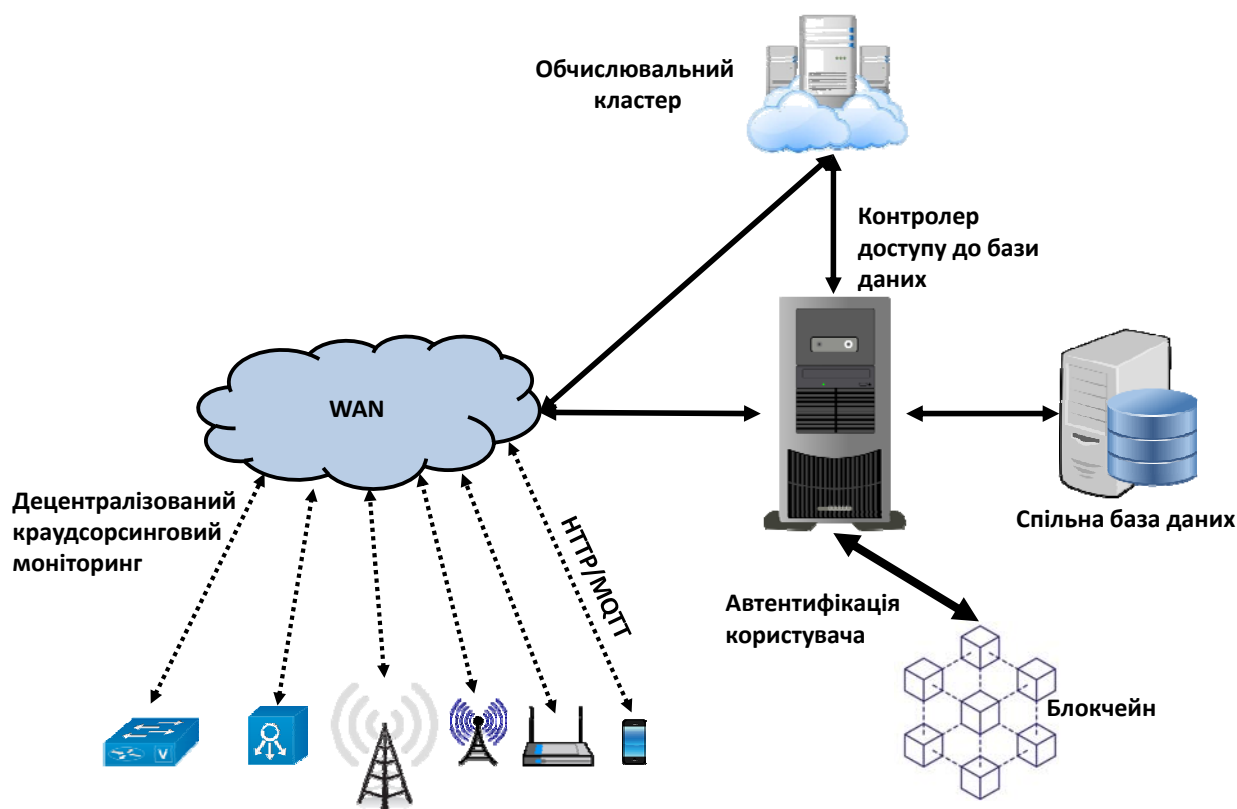


Рис. 2.17. Архітектура розробленої системи децентралізованого краудсорсингового моніторингу мережі мобільного зв'язку.

Представлена на рис. 2.17 архітектура, дає змогу водночас забезпечити ефективність процесу збереження великих обсягів даних з використанням існуючих технічних рішень, а з іншого забезпечити гарантію, що передавати дані в систему зможуть лише абоненти або оператори, які є ідентифікованими та довіреними у розподіленому реєстрі блокчейн [216].



Експериментальний приклад процесу краудсорсингового моніторингу параметрів мережі мобільного зв'язку представлено на рис. 2.18-2.20. Експеримент проводився в LTE мережі оператора SK Telecom, на території студентського містечка Korea University Sejong Campus (м. Седжон, Південна Корея). Система обробки, збереження даних та MQTT брокер, розгорталась на базі серверів у лабораторії «Інтернету речей та Штучного Інтелекту», даного університету [218]. В процесі досліджень, вимірювались параметри сигналів макро та мікрокомірок, враховуючи зону розташування абонента. Приклад таблиці отриманих даних на сервері показано на рис. 2.18.

Дата і час	Оператор	Мережа МСС	Мережа МНС	Широта	Довгота	Точність позиціонування (м)	Рівень сигналу (дБм)	ASU	RxQual	LTE RSRQ
2017-01-03 09:19:10	SKTelecom	450	05	36.6110904	127.2868834	19.014	-100	40	99	-8
2017-01-03 09:19:00	SKTelecom	450	05	36.6110904	127.2868834	19.014	-94	46	99	-7
2017-01-03 09:18:50	SKTelecom	450	05	36.6110481	127.2867999	19.106	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:40	SKTelecom	450	05	36.6110481	127.2867999	19.106	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:30	SKTelecom	450	05	36.6110904	127.2868834	19.118	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:20	SKTelecom	450	05	36.6110904	127.2868834	19.118	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:10	SKTelecom	450	05	36.611297	127.2867163	22.279	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:18:00	SKTelecom	450	05	36.611297	127.2867163	22.279	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:50	SKTelecom	450	05	36.611566	127.2873013	28.12	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:40	SKTelecom	450	05	36.611566	127.2873013	28.12	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:30	SKTelecom	450	05	36.611566	127.2873013	28.12	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:20	SKTelecom	450	05	36.6101805	127.2886803	1800	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:10	SKTelecom	450	05	36.6113988	127.2876356	19.756	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:17:00	SKTelecom	450	05	36.6113988	127.2876356	19.756	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:50	SKTelecom	450	05	36.6114226	127.2879699	20.73	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:40	SKTelecom	450	05	36.6114226	127.2879699	20.73	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:30	SKTelecom	450	05	36.6114593	127.2897668	50	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:20	SKTelecom	450	05	36.6114593	127.2897668	50	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:10	SKTelecom	450	05	36.6114593	127.2897668	50	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:16:01	SKTelecom	450	05	36.6116157	127.2886385	19.038	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:15:50	SKTelecom	450	05	36.6116209	127.2892235	21.16	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:15:40	SKTelecom	450	05	36.6116209	127.2892235	21.16	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:15:30	SKTelecom	450	05	36.6114965	127.2892653	19.637	-74	66	99	-7
2017-01-03 09:15:20	SKTelecom	450	05	36.6114965	127.2892653	19.637	-74	66	99	-7
2017-01-03 09:15:10	SKTelecom	450	05	36.6114965	127.2892653	19.637	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:15:00	SKTelecom	450	05	36.6114939	127.2889728	23.691	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:14:50	SKTelecom	450	05	36.6114939	127.2889728	23.691	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:14:28	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-83	57	99	-7
2017-01-03 09:14:20	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:14:00	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:13:21	SKTelecom	450	05	36.6133835	127.2887961	48	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:13:10	SKTelecom	450	05	36.6133835	127.2887961	48	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:13:00	SKTelecom	450	05	36.6131449	127.2886385	29.683	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:12:50	SKTelecom	450	05	36.6131449	127.2886385	29.683	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:12:40	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:12:30	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-80	60	99	-7
2017-01-03 09:10:58	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:10:40	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-75	65	99	-8
2017-01-03 09:10:34	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-74	66	99	-8
2017-01-03 09:10:20	SKTelecom	450	05	36.6134527	127.2916889	2100	-74	66	99	-8

Рис. 2.18. Приклад фрагменту отриманої таблиці статистичних даних в розробленій системі моніторингу.

На рис. 2.19-2.20 представлені часові та просторові залежності параметрів сигналу для певних фрагментів моніторингу, з яких можна побачити яким

чином оператор має змогу аналізувати характеристики власної мережної інфраструктури.

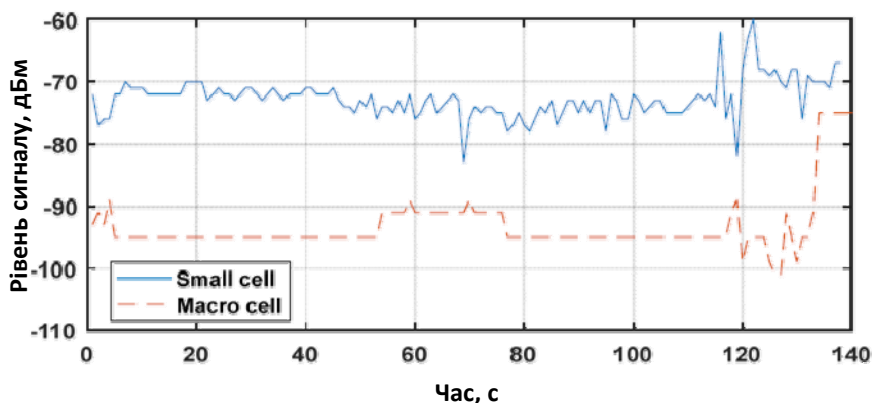


Рис. 2.19. Простий експериментальний приклад результатів вимірювання запропонованої системи моніторингу IoT.

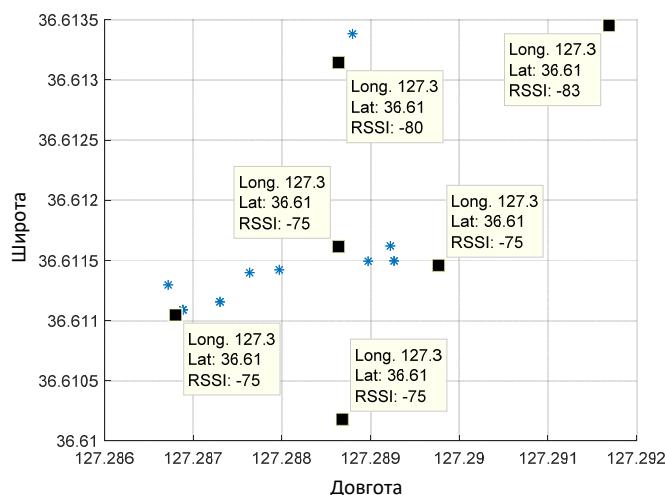


Рис. 2.20. Приклад результатів вимірювання параметрів гетерогенної мережі з прив'язкою до географічних координат.

Таким чином, розроблена система краудсорсингового моніторингу забезпечує операторам неперервний потік даних про характеристики функціонування децентралізованої мережі мобільного зв'язку для довільної зони обслуговування, які можуть бути використані для усунення вузьких місць та підвищення ефективності функціонування мережі [216-218]. Наприклад, розглядаючи процес інтелектуального управління, оператори мають змогу в режимі квазі-реального часу оцінювати стан завантаженості мережної

інфраструктури та приймати відповідні рішення про оренду базових станцій або радіочастотного ресурсу. Крім того, використовуючи статистику переміщення абонентів, можна оптимізувати процеси проектування мережної інфраструктури та використання радіочастотного ресурсу, що буде детальніше розглянуто у наступних розділах дисертаційної роботи [253].

## **2.6. Удосконалений алгоритм аналізу просторових характеристик мережі мобільного зв'язку**

### **2.6.1. Алгоритм декомпозиції зон моніторингу мережі мобільного зв'язку для підвищення ефективності просторового аналізу даних**

Особливістю запропонованої системи моніторингу характеристик мережі є її орієнтованість на краудсорсинг, що визначає певні обмеження з точки зору якості даних для подальшої аналітики. Зокрема, наявність даних часто залежить від місця знаходження абонентів та можливостей їх пристроїв провести відповідні вимірювання. Це в свою чергу, призводить до того, що весь масив даних у просторі представляється у вигляді розрідженої матриці, в якій для значної частини території покриття немає вимірних значень параметрів мережі мобільного зв'язку (рівень сигналу, співвідношення сигнал/шум, пропускна здатність, тощо). Для зменшення складності аналітичної обробки таких масивів даних, досліджувана територія покриття розбивається на окремі зони. Для цього використовується метод кластеризації на основі K-середніх, який дає змогу розподілити результати моніторингу на окремі групи за критерієм мінімальної географічної відстані між вимірювальними параметрами [246,249]. Нижче описано покрокову реалізацію даного алгоритму.

1. Визначення масиву  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$  як вхідного набору  $N$  точок вимірювань, і масиву з  $K$  цільових центрів кластерів  $C = \{c_1, c_2, \dots, c_K\}$ .
2. Кожній точці з масиву  $X$ , присвоюється відповідний кластер з масиву  $C$  за критеріями найменшої відстані:

$$X^{(c_k)} = \arg \min_{1 \leq k \leq K} \|x_i - c_k\|^2, i = 1, \dots, N$$

$$X^{\{C_k\}} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, n \in [1, N], C_k \in C \quad (2.28)$$

3. Обчислення середнього значення для кожного кластера  $X^{\{C_k\}}$ :

$$m_k = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}, k = 1, \dots, K. \quad (2.29)$$

4. Перепризначення нових центрів кластерів  $C$  відповідно до значень, отриманих за виразом (2.29):

$$\{C \rightarrow C'\} = \{c_1 = m_1, c_2 = m_2, \dots, c_K = m_K\} \quad (2.30)$$

5. Обчислення різниці між отриманими з (2.30) центрами кластерів та попередніми центрами кластерів:

$$\Delta C = C' - C = \sum_{i=1}^K m_i - c_i \quad (2.31)$$

6. Повторення кроків 2, 3, 4 та 5, поки не буде досягнута умова конвергенції (збіжності) алгоритму:

$$\Delta C = 0 \quad (2.32)$$

На рис 2.21 представлено приклад однієї ітерації алгоритму кластеризації.

Окремі кластери виділені різними кольорами точок [246,249].

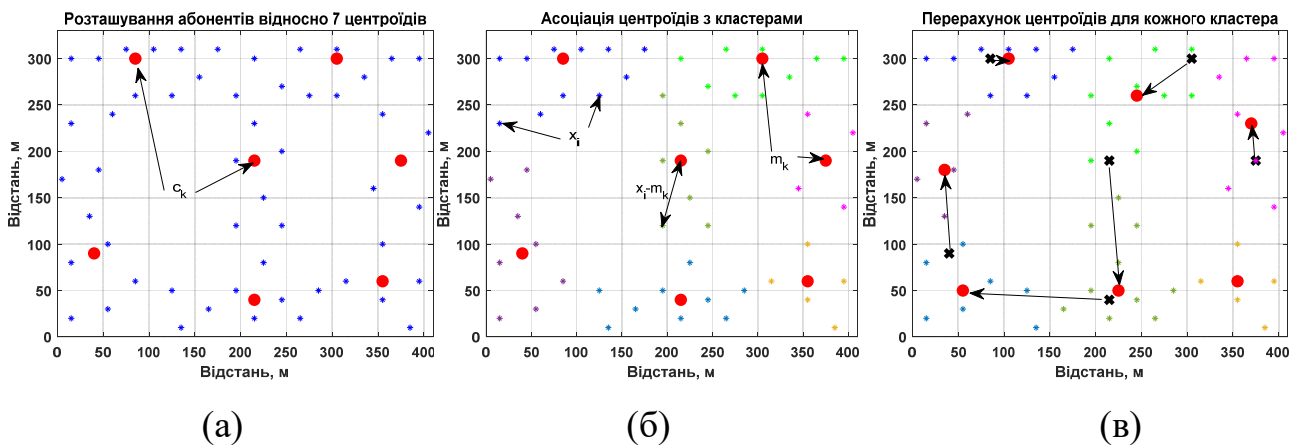


Рис.2.21. Процес кластеризації за методом К-середніх протягом одної ітерації:  
 крок 1 – а), кроки 2, 3 – б), кроки 4, 5 – в)

Таким чином, здійснюється декомпозиція результатів моніторингу на цільові зони для подальшого аналізу та прийняття рішень стосовно зміни конфігурацій мережних вузлів [246,248,249].

## 2.6.2. Алгоритм відновлення даних із розріджених масивів результатів моніторингу

Наступний етап запропонованого алгоритму аналізу полягає у відновленні повної матриці даних із вхідної розрідженої матриці даних моніторингу. Для цього розроблено алгоритм на основі ймовірнісної декомпозиції матриць (PMF – Probabilistic Matrix Factorization) [248,254]. Детально, запропонований алгоритм описаний нижче [248,254].

1. Вхідний набір даних представляється у вигляді матриці  $R$  розміром  $[N \times M]$ :

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} R_{11} & \cdots & R_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{N1} & \cdots & R_{NM} \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

2. Генерація випадкових матриць  $U$   $[N \times K]$  і  $V$   $[K \times M]$  з дотриманням умови:

$$\mathbf{R}' = \mathbf{U} \cdot \mathbf{V}^T = \begin{pmatrix} R'_{11} & \cdots & R'_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R'_{N1} & \cdots & R'_{NM} \end{pmatrix}, \quad (2.34)$$

де  $K$  – кількість стовпців в  $U$  і  $V$ , яка визначає точність алгоритму PMF. Причому,  $K$  може приймати довільне ціле значення, оскільки отримана матриця  $R'$  є інваріантною до кількості стовпців у векторі  $U$  та кількості рядків у векторі  $V$  [248,254].

3. Визначення індексів елементів, для яких відсутні виміри та формування матриці ідентичності  $\mathbf{I}$ , яка має розмірність ідентичну до матриці  $R$  [248]:

$$\mathbf{I} = \begin{pmatrix} I_{11} & \cdots & I_{1M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ I_{N1} & \cdots & I_{NM} \end{pmatrix} \quad (2.35)$$

Матриця  $\mathbf{I}$  є бінарною, а її елементи визначаються відповідно до наступного правила [248]:

$$I_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{if } R_{ij} \text{ якщо значення відоме} \\ 0, & \text{if } R_{ij} \text{ якщо значення невідоме} \end{cases} \quad (2.36)$$

4. Обчислення середньоквадратичного відхилення RMSE між вхідною матрицею R та відновленою матрицею R' [248,254]:

$$RMSE = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I_{ij} (R_{ij} - U_i V_j^T)^2 \quad (2.37)$$

5. Визначення чи значення помилки задовольняє умову [248,254]:

$$RMSE \leq RMSE_{\max} \quad (2.38)$$

Якщо умова (2.38) є виконаною, алгоритм завершується. Якщо ні, то алгоритм переходить до кроку 6.

6. Коригування векторів U та V:

$$\begin{aligned} U_i &\leftarrow U_i + \eta \cdot \alpha \cdot U_i \\ V_j &\leftarrow V_j + \eta \cdot \alpha \cdot V_j \end{aligned} \quad (2.39)$$

де  $\alpha$  – визначає крок зміни значень U та V,  $\eta$  – коефіцієнт, який визначає додатній або від'ємний напрямок зміни значень U та V, в залежності від динаміки значення RMSE. Порівняння швидкості збіжності алгоритму для різних значень кроку  $\alpha$ , представлено на рис. 2.22 [248,254].

Як можна побачити на рис. 2.22, при  $\alpha = 0,001$ , RMSE прямує до нуля за менш ніж 200 ітерацій; при  $\alpha = 0.0001$ , – 1400 ітерацій, а при  $\alpha = 0.00001$  – навіть після 2000 ітерацій, значення RMSE все ще не досягає нуля. Отримані результати показують важливість правильного вибору значення кроку  $\alpha$  для отримання належної ефективності алгоритму PMF. Аналогічні результати отримані для визначення впливу кількості прихованих властивостей на час конвергенції PMF [248].

Як показано на рис. 2.23, при збільшенні кількості прихованих властивостей, час конвергенції цільового значення RMSE зменшується. Але, якщо значення K перевищує розміри M та N, подальше нарощування кількості прихованих властивостей не дає жодних переваг з точки зору часу конвергенції алгоритму [248].

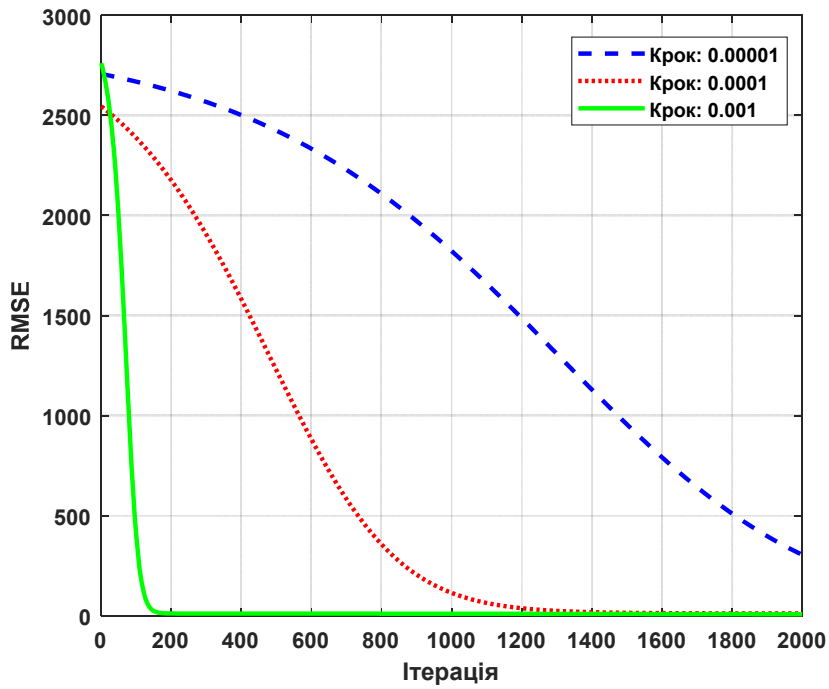


Рис. 2.22. Порівняння часу конвергенції алгоритму PMF для різних значень кроку.

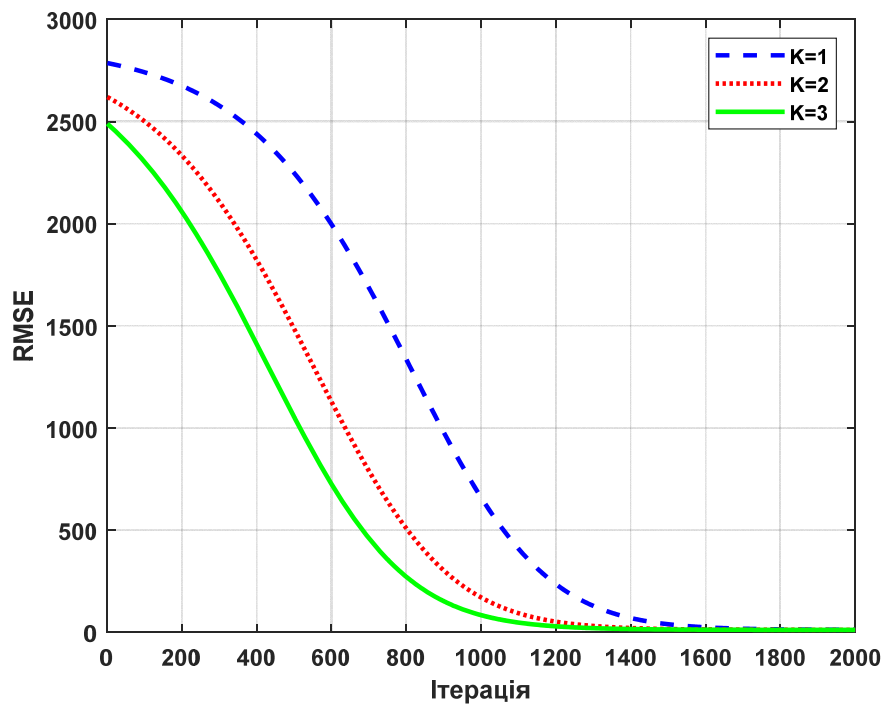


Рис. 2.23. Порівняння часу конвергенції алгоритму PMF для різної кількості прихованих властивостей  $K$ .

Для підвищення точності відновлення цілісності результатів моніторингу необхідно використати нормалізацію вхідних даних. Для нормалізації даних,

потрібно представити їх чисельні еквіваленти в діапазоні від 0 до 1. Шляхом нормалізації можна спростити алгоритм PMF за рахунок обмеження діапазону можливих вимірних значень. Це дозволяє знизити час збіжності алгоритму PMF, за рахунок уніфікації вагових коефіцієнтів для всіх вимірюваних параметрів [248,254].

Після нормалізації, дані в матриці  $R$  розподіляються за нормальним законом із середнім значенням  $\mu$  та стандартним відхиленням  $\sigma$ :

$$N(\mu, \sigma) \quad (2.40)$$

В такому випадку, кожен рядок  $U$  та  $V$  представляється гаусівським розподілом із середнім значенням  $\mu = 0$ . Ці множини є  $\sigma_U$  для  $U$  та  $\sigma_V$  для  $V$  [248,254].

$$P(U | \sigma_U^2) = \prod_{i=1}^N N(U_i | 0, \sigma_U^2 I) \quad (2.41)$$

$$P(V | \sigma_V^2) = \prod_{i=1}^N N(V_i | 0, \sigma_V^2 I) \quad (2.42)$$

Вирази (2.41) та (2.42) необхідні для того щоб впевнитись, що параметри  $U$  та  $V$  не будуть надто сильно відхилятися від нульового значення. Таким чином, алгоритм уникає надмірно великих значень в матрицях  $U$  і  $V$ , для того щоб обмежити час конвергенції до прийняттого значення середньоквадратичного відхилення.

Відповідно, розподіл значень представляється наступним чином [248,254]:

$$P(R | U, V, \sigma^2) = \prod_{i=1}^N \left( \prod_{j=1}^M [N(R_{ij} | U_i V_j^T, \sigma^2)]^{I_{ij}} \right) \quad (2.43)$$

Мінімізація RMSE, відповідає попередньому розподілу значень вихідної матриці  $R$ . Причому, відсутні вимірні значення не впливають на розподіли даних у виразі (2.42), оскільки вони виключені шляхом перемноження з матрицею ідентичності  $I$ . Для уникнення перевищення вимірних значень, фіксуємо дисперсії  $\sigma$ ,  $\sigma_U$  та  $\sigma_V$  як константи, і зводимо таким чином завдання оптимізації до класичної мінімізації значення RMSE:



$$\min(RMSE) = \min \left( \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M I_{ij} (R_{ij} - U_i V_j^T)^2 + \lambda_U \sum_{i=1}^N \|U\|^2 + \lambda_V \sum_{i=1}^M \|V\|^2 \right),$$

при:  $P(U | \sigma_U^2) = \prod_{i=1}^N N(U_i | 0, \sigma_U^2 I),$

$$P(V | \sigma_V^2) = \prod_{i=1}^M N(V_i | 0, \sigma_V^2 I),$$

$$\lambda_U = \frac{\sigma_U}{\sigma}, \lambda_V = \frac{\sigma_V}{\sigma}, \sigma_V, \sigma_U, \sigma = const,$$

де значення  $\|U\|$  та  $\|V\|$  – норми Фробеніуса:

$$\|U\| = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^K |U_{ij}|^2}, \quad \|V\| = \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^K |V_{ij}|^2} \quad (2.45)$$

Послідовність математичних обчислень, схематично представлена на рис. 2.24 [248].

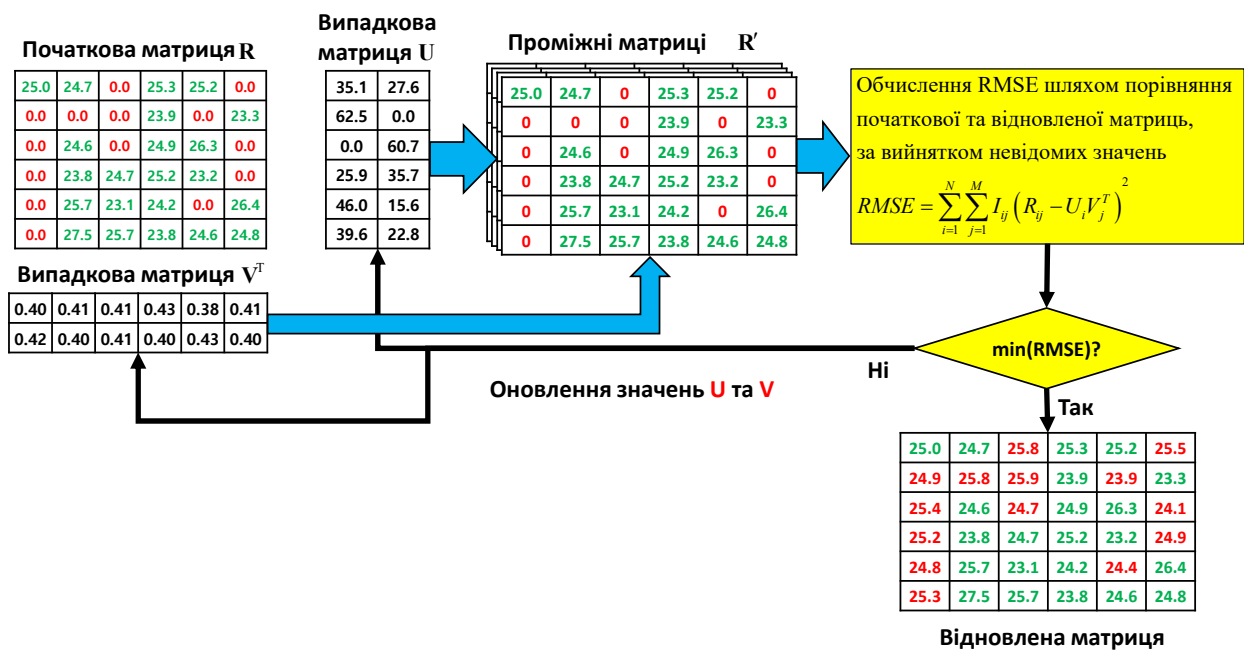


Рис. 2.24. Схема алгоритму відновлення даних з використанням PMF.

Блок-схема запропонованого алгоритму відновлення відсутніх даних моніторингу представлена на рис. 2.25 [248].

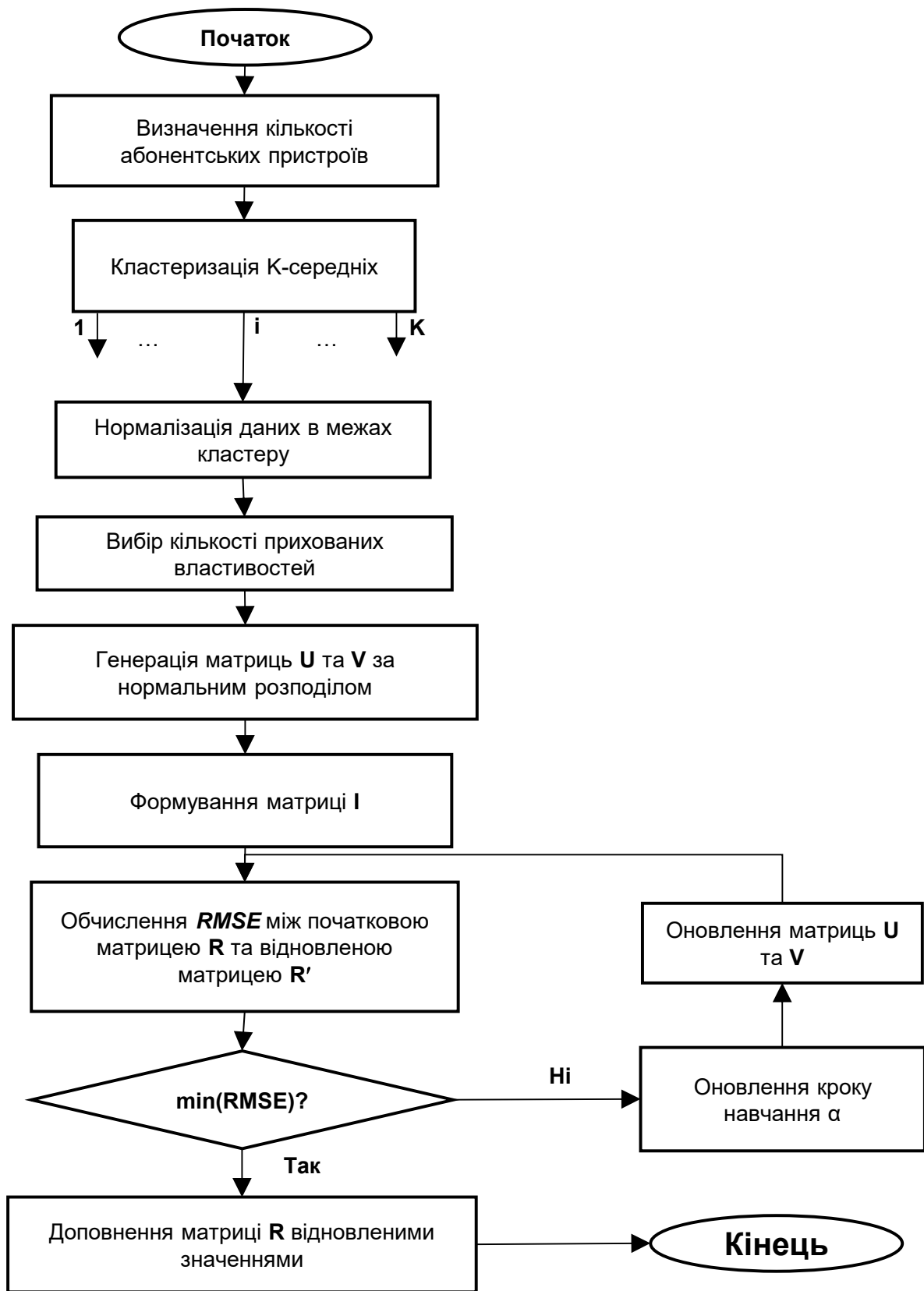


Рис. 2.25. Графічне представлення алгоритму відновлення відсутніх даних.

### 2.6.3. Імітаційне моделювання процесу відновлення даних моніторингу

Для моделювання процесу відновлення втрачених даних, ми імітуємо, що 10% від загального обсягу даних є нулями. Таким чином, буде здійснюватися перевірка точності запропонованого алгоритму з точки зору відновлення втрачених елементів масиву даних. При такій реалізації 90% відомих даних використовуються як тренувальна вибірка для навчання алгоритму. RMF використовується для генерації прихованих властивостей векторів для кожного обраного кластера. Після того як вектори будуть обчислені з прийнятним значенням RMSE, вхідні дані можна буде відновити із необхідною точністю.

На рис 2.26 представлено дані процесу моделювання пікових значень похибки відновлення втрачених даних для різних варіантів кластеризації даних. Як можна побачити з результатів, при збільшенні кількості кластерів значення похибки зменшується. Це корелюється із теоретичними прогнозами, оскільки при збільшенні кількості кластерів, зменшується дисперсія вимірюваних значень в межах одного кластеру [248].

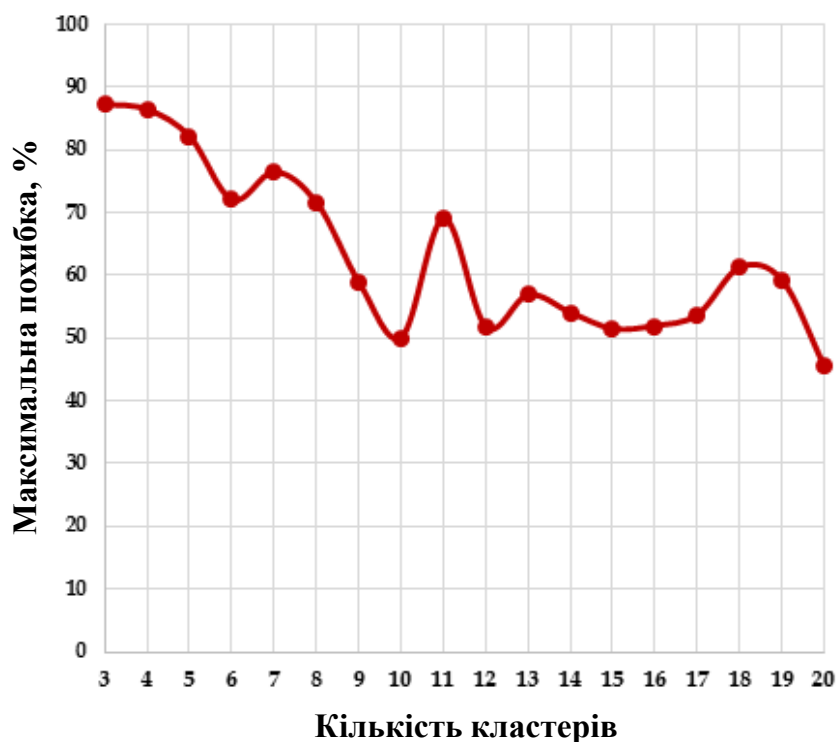


Рис. 2.26. Залежність пікової похибки відновлення втрачених даних для різної кількості кластерів.

Таким чином, алгоритм на основі ймовірнісної декомпозиції матриць дає змогу підвищити ефективність систем моніторингу шляхом забезпечення цілісності результуючих наборів даних, що в свою чергу дає змогу підвищити ефективність мережної аналітики з точки зору прогнозування параметрів мережі та прийняття рішень стосовно програмної зміни конфігурації мережі. Порівняння ефективності розробленого алгоритму відновлення цілісності даних з методом опорних векторів SVM та глибокими нейронними мережами DNN представлено на рис. 2.27 [248].

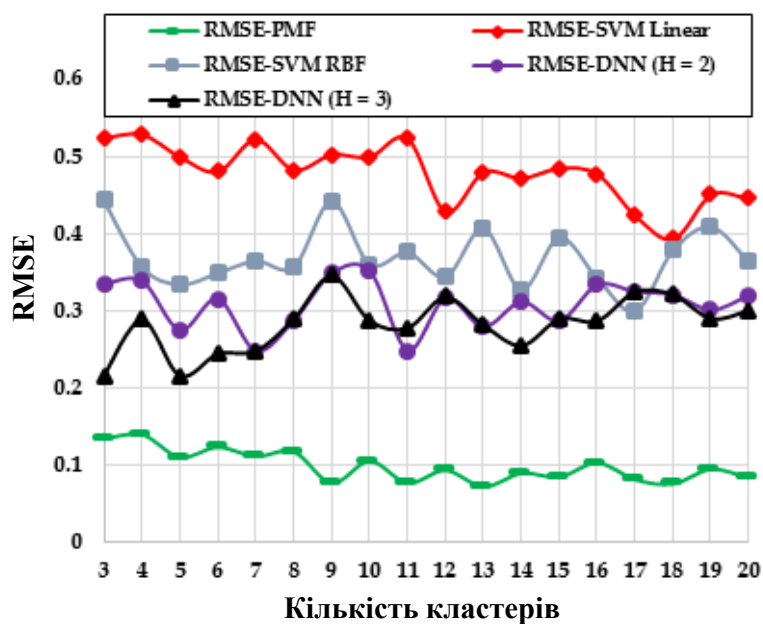


Рис. 2.27. Результати порівняння значень RMSE при навчанні моделі.

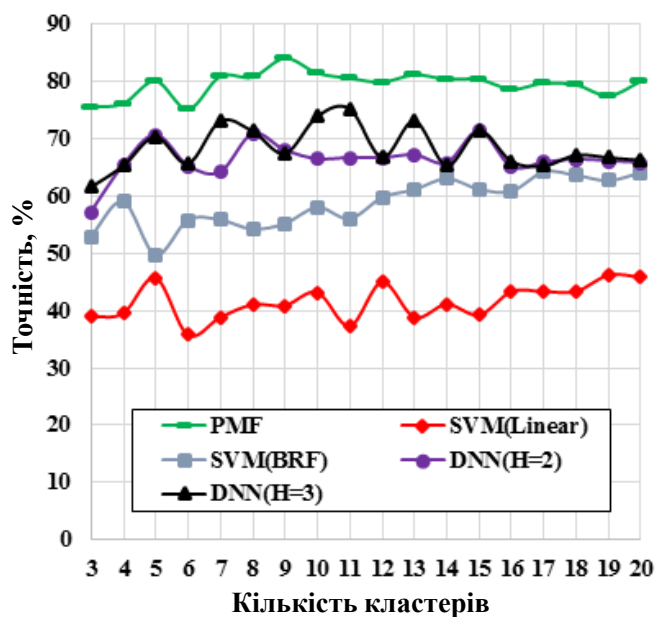


Рис. 2.28. Результати порівняння значень точності відновлення даних.

## 2.7. Висновки до 2-го розділу

1. Запропоновано структурно-функціональну модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка базується на відокремленні площини абонентів, площини мережної інфраструктури, площини операторів, площини децентралізації та площини інтелектуального управління, що дало змогу операторам автоматизовано координувати процес спільного використання мережної інфраструктури, на основі смарт-контрактів, токенизації активів та методів штучного інтелекту. В рамках моделі визначено основних учасників ринку мобільного зв'язку, які взаємодіють між собою, а саме: регулятор, власники радіочастот, власники інфраструктури та абоненти. Запропонований підхід дає змогу реалізувати парадигму децентралізованого управління мережною інфраструктурою, використовуючи при цьому єдину платформу для взаємодії та обміну даними між операторами на основі технології блокчейн. Така архітектура дає змогу обслуговувати абонентів без прив'язки до оператора шляхом використання унікальних ідентифікаторів у платформі блокчейн, що усуває вузькі місця процедури роумінгу як в національному, так і в транснаціональному масштабі. Крім того, дана модель є ключовим елементом в контексті забезпечення децентралізованого доступу операторів до спільної бази даних та попередньо навчених методів управління на основі штучного інтелекту.

2. Розроблено систему децентралізованого краудсорсингового моніторингу просторових характеристик мережі мобільного зв'язку на основі протоколів HTTP та MQTT, що дає змогу передавати будь-яку мережну інформацію як від абонентів, так і від операторів із заданою періодичністю. Розроблена система дає змогу передавати важливу статистичну інформацію, не перевантажуючи при цьому мережу та забезпечує операторам гнучкий процес збору даних із статистичною повнотою інформації для аналітичних засобів машинного навчання. Такий підхід дає змогу операторам гнучко налаштовувати систему моніторингу відповідно до їх вимог у цільовій області розгортання мережі, з

метою забезпечення неперервності процесу самонавчання алгоритмів штучного інтелекту в умовах високої динаміки екзогенних та ендогенних змін в мережі.

3. Запропоновано модель токенизації радіочастотного та інфраструктурного ресурсу на основі стандарту невзаємозамінних токенів ERC 721, що дало змогу оцифрувати мережні активи операторів та сторонніх стейкхолдерів, для їх подальшого обміну шляхом фінансових транзакцій у мережі блокчейн. Зокрема, запропоновано токен LRRT – як цифровий еквівалент мінімального ліцензійного радіочастотного ресурсу, токен URRT – як цифровий еквівалент неліцензійного радіочастотного ресурсу, токен IRT – як цифровий еквівалент ресурсів мережної інфраструктури, таких як базова станція, віртуальна машина, довжина хвилі у волоконно-оптичних каналах зв'язку, тощо. Для торгівлі токенами використовується національна криптовалюта CBDC, яка емітується центральним банком як еквівалент фіатної валюти. Таким чином, завдання децентралізованого розподілу ресурсів, розв'язується шляхом використання криптовалютних транзакцій між операторами та регулятором, на основі смарт-контрактів у мережі блокчейн.

4. Розроблено метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу на основі смарт-контрактів у мережі блокчейн. Ключовою особливістю запропонованого методу є унікальна функція корисності абонента, яка аналітично виведена на основі інтегрального параметру якості сервісу, параметру вартості сервісу та компромісного коефіцієнту між ними. Розроблений метод функціонує на основі децентралізованої блокчейн-платформи управління смарт-контрактами, що забезпечує повсюдне обслуговування абонентів з використанням їх публічних ключів у мережі блокчейн. Такий підхід дав змогу підвищити пропускну здатність для абонентів до 11% при незмінній вартості сервісу, а також збільшити прибутки операторів до 27%.

### **РОЗДІЛ 3. МЕТОДИ СИНТЕЗУ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ФІЗИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛГОРИТМІВ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ**

#### **3.1. Проблема структурно-функціонального синтезу площини рівня радіодоступу**

Для повноти процесу структурно-функціонального синтезу необхідно виокремити множину стандартів радіодоступу та технічних рішень, які в комплексі складатимуть площину радіодоступу на фізичному та каналному рівні. Структура площини радіодоступу складається із основних інфраструктурних елементів, які забезпечують зв'язок «останньої милі» до кінцевих абонентів. Впродовж останніх років, структура мережі радіодоступу стає все більше гетерогенною, що потребує нових підходів до її синтезу [1,3,237]. На сьогоднішній час, можна виокремити два типи інфраструктури радіодоступу: статичний та динамічний.

До статичного відносяться усі варіанти коміркових структур мереж мобільного зв'язку, статичні точки доступу Wi-Fi, радіорелейні та супутникові канали зв'язку, а також шлюзи для підключення кінцевих пристроїв IoT. Крім того, коміркові структури окремо класифікуються за розміром зони покриття на макрокомірки, мікрокомірки, пікокомірки, фемтокомірки та аттокомірки [1,3,24-30].

Макрокомірки характеризуються великим радіусом від одного до кількох десятків кілометрів. Для забезпечення відповідної дальності зв'язку, дані комірки працюють у частотних діапазонах не вище 2 ГГц з потужністю передавання до 2 Вт.

Мікрокомірки характеризуються радіусом від 200 м до 500 м. Працюють у частотних діапазонах не вище 6 ГГц, з потужністю передавання до 500 мВт.

Пікокомірки характеризуються радіусом від 50 до 100 м. Працюють у частотних діапазонах не нижче 2 ГГц з потужністю передавання до 300 мВт. Часто використовуються для покриття всередині великих приміщень.

Фемтокомірки характеризуються радіусом від 10 до 30 м. Працюють у частотних діапазонах від 3 до 60 ГГц з потужністю передавання до 100 мВт. Переважно використовуються для покриття всередині офісних приміщень.

Аттокомірки характеризуються радіусом від 1 до 5 м. Працюють у частотних діапазонах вище 100 ГГц.

Точки доступу Wi-Fi характеризуються радіусом від 10 до 50 м. Працюють у неліцензованому частотному діапазоні 2.4 ГГц та 5 ГГц.

До динамічної інфраструктури відносяться канали зв'язку типу пристрій-пристрій (D2D – Device-to-Device), автомобіль-автомобіль (V2V – Vehicle-to-Vehicle), дрон-пристрій, дрон-дрон, а також інші комбінації зв'язку, які включають рухомі пристрої [170,215,255].

### **3.2. Розроблення алгоритму моделювання мобільності абонентів з використанням генеративно-змагальних нейронних мереж**

Оптимізація мережі зазвичай пов'язана з пошуком економічно ефективних рішень для забезпечення повсюдного покриття та послуг для кінцевих абонентів [255-258]. Хоча традиційні підходи до оптимізації мережі покладались здебільшого на аналітичні методи, сьогодні ми спостерігаємо чітку парадигму переходу до стратегій машинного навчання. Однією з очевидних цілей підходу до оптимізації мережі є визначення місцеположень кінцевих абонентів у заданому часовому інтервалі з високою точністю та відповідні статистичні закономірності переміщення абонентів [259]. З розвитком можливостей машинного (глибокого) навчання ми припускаємо, що дані методи можуть бути ефективно застосовані в процесі планування мережі.

Використання машинного навчання в даному контексті спрямоване на пошук конкретних прихованих закономірностей розподілу трафіку кінцевих абонентів, з метою визначення їх просторово-часових залежностей [253,259-266]. Використовуючи дані закономірності, кожен оператор матиме змогу знизити обсяги капітальних затрат на розбудову інфраструктури мережі мобільного зв'язку та відповідати парадигмі децентралізованого синтезу



мережі. Таким чином, одна із основних гіпотез даного дисертаційного дослідження полягає у синтезі реалістичних траєкторій переміщення абонентів, з метою врахування їх часових та просторових характеристик, що дасть змогу операторам децентралізовано оптимізувати свої мережі радіодоступу в процесі розгортання інфраструктури (рис. 3.1).

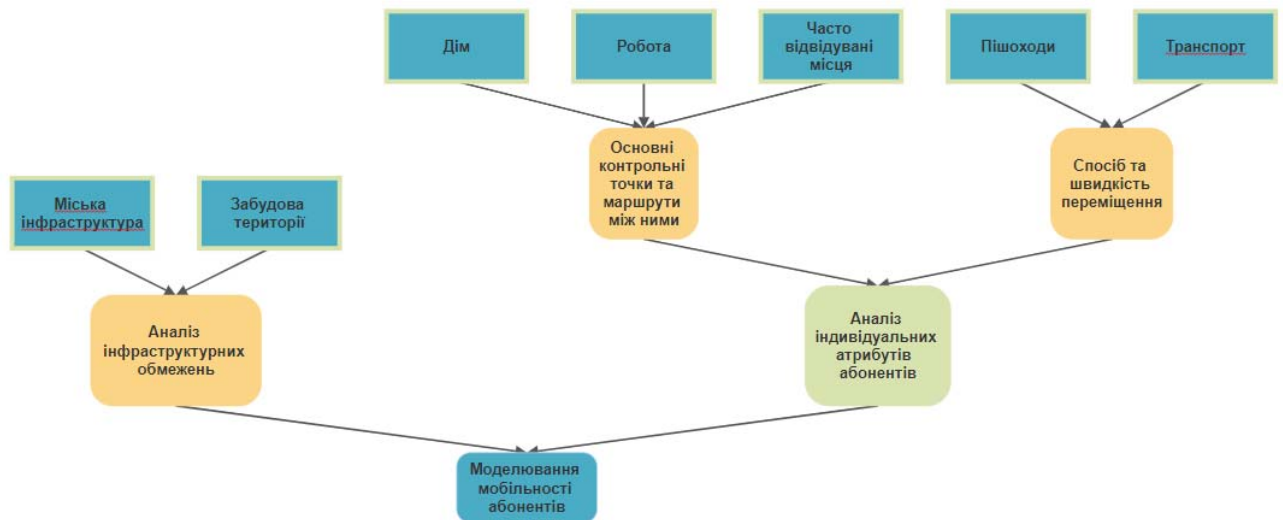


Рис. 3.1. Структурно-логічна схема процесу інтелектуального моделювання мобільності абонентів.

Запропонований алгоритм використовує архітектуру генеративно-змагальних нейронних мереж GAN (Generative Adversarial Networks), яка складається із двох частин: рекурентного генератора на основі архітектури LSTM (Long-Short Term Memory) та згорткового дискримінатора на основі архітектури CNN (Convolutional Neural Network) [253,260-262]. Генератор (G) відповідає за генерацію траєкторій, які повинні бути схожими на реальні траєкторії переміщення абонентів у відповідній місцевості. В свою чергу, дискримінатор (D) відповідає за класифікацію траєкторій на реальні траєкторії та траєкторії згенеровані дискримінатором (рис. 3.2).

Переважно, у моделях GAN дані представлені у вигляді 2D-зображення. Однак для випадку моделювання переміщення абонентів необхідно змінити тип навчальних даних, щоб врахувати часові та просторові закономірності мобільності кінцевих абонентів в межах 24-годинного циклу.

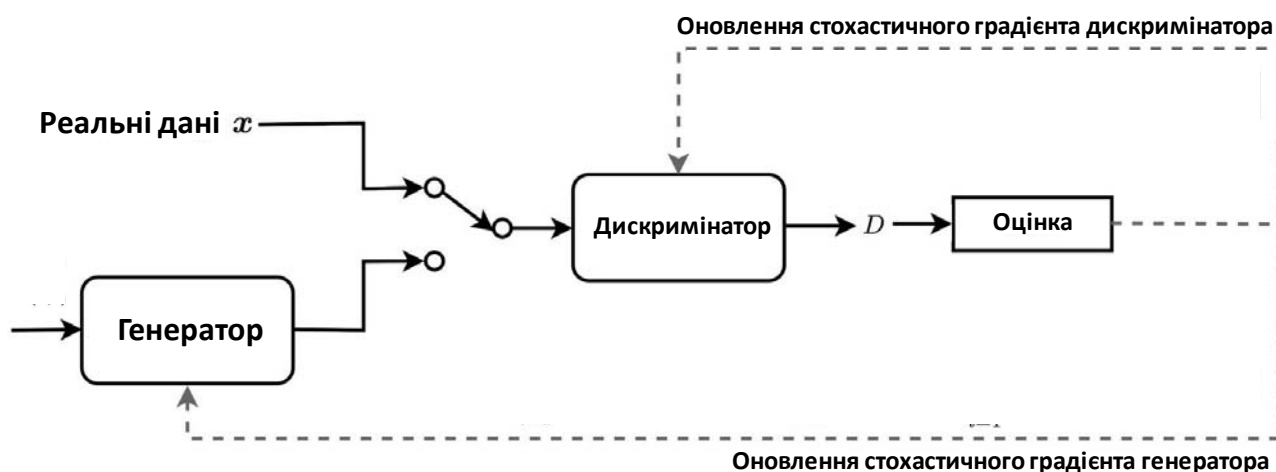


Рис. 3.2. Архітектура генеративно-змагальних нейронних мереж.

Для цього, у запропонованому методі навчальні дані формуються як одновимірні послідовності GPS координат. Серед найближчих аналогів розробленої моделі GAN, варто відзначити роботу [267], де представлено модель GAN для формування соціально прийнятних траєкторій для пішоходів у натовпі. Однак недоліком моделі [267] є її короткостроковий прогноз лише на декілька часових інтервалів. Натомість, завдання поставлене у даній роботі є більш складним, оскільки має на меті синтезувати повні траєкторії масового переміщення абонентів з урахуванням реальної часової та просторової статистики мережі мобільного зв'язку.

Запропонований алгоритм покроково описаний нижче [260-262].

**Етап 1.** Аналіз даних геоінформаційних систем для цільової території моделювання з використанням відкритої бібліотеки OpenStreetMaps.

**Етап 2.** Генерація навчальної вибірки шляхом моделювання періодичних та випадкових траєкторій переміщення абонентів в межах графу пішохідних та автомобільних маршрутів, який отримується із геоінформаційної системи Open Street Maps. Такий підхід, дає змогу врахувати особливості цільової зони покриття території з точки зору не лише маршрутів переміщення абонентів, але й типу району (спальний, бізнес, індустріальний або туристичний), що в свою чергу забезпечує адекватність моделі з точки зору просторово-часової локалізації абонентів.

**Етап 3.** Навчання моделі на основі генеративно-змагальних нейронних мереж з використанням згенерованого датасету [260-263].

**Крок 3.1.** Генератор формує вектор випадкових даних за нормальним законом розподілу.

**Крок 3.2.** Дискримінатор випадковим чином вибирає або вектор реальних даних із датасету, або вектор сформований генератором.

**Крок 3.3.** Дискримінатор здійснює класифікацію вхідних даних та приймає рішення про приналежність вхідного вектору до реальних або згенерованих даних.

**Крок 3.4.** Після класифікації обчислюється функція втрат дискримінатора на основі бінарної перехресної ентропії:

$$L = \log D(x) + [1 - \log(D(G(z)))], \quad (3.1)$$

де  $G(x)$ ,  $D(x)$  – функції втрат генератора та дискримінатора, відповідно.

Таким чином, генератор має на меті мінімізувати відхилення згенерованих траєкторій переміщення абонентів, від тих траєкторій, які притаманні досліджуваній територіальній зоні покриття мережі. У свою чергу, дискримінатор повинен відрізнити реальні та згенеровані траєкторії [260-262].

**Крок 3.5.** В залежності від результатів дискримінатора, здійснюється обчислення функції втрат та коригування ваг  $G$  і  $D$  методом зворотного поширення помилки.

$$\begin{aligned} & \nabla_{\theta_g} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \log(1 - D(G(z_i))) \\ & \nabla_{\theta_d} \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m [\log D(x_i) + \log(1 - D(G(z_i)))] \end{aligned}, \quad (3.2)$$

де  $\nabla_{\theta_g}, \nabla_{\theta_d}$  - операції градієнта для оновлення вагових коефіцієнтів для генератора та дискримінатора, відповідно.

**Крок 3.6.** Кроки 3.1-3.5 повторюються до досягнення мінімаксного стану рівноваги, при якому дискримінатор не зможе відрізнити згенеровані траєкторії переміщення абонентів, від реальних. Аналітично дана модель може бути представлена у формі мінімаксної задачі оптимізації [260-263]:

$$\min_G \max_D \left( E_{x \sim p(x)} [\log D(x)] + E_{z \sim p(z)} [1 - \log(D(G(z)))] \right), \quad (3.3)$$

де  $x$  – реальна траєкторія, отримана шляхом моніторингу мережі, яка відповідає ймовірнісному розподілу  $p(x)$ ;  $z$  – траєкторія згенерована генератором, яка відповідає ймовірнісному розподілу  $p(z)$ .

**Крок 4.** Дискримінатор класифікує вектори генератора, як вектори реальних даних.

Ефективність GAN оцінюється за допомогою метрики бінарної перехресної ентропії, яка інтерпретується як логарифмічна функція втрат і визначається як [262]:

$$H_p(q) = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [y_i \log(p(y_i)) + \log(1-p(y_i))(1-y_i)] \quad (3.4)$$

де  $y$  позначає істинне або хибне твердження (1 або 0),  $p(y)$  - ймовірність істинності твердження для всіх  $N$  точок спостереження.

Таким чином, інтуїтивно зрозуміло, що чим менша точність прогнозування, тим вище значення функції втрат. У випадку GAN визначаються дві функції втрат, окремо для  $D$  і для  $G$ . У випадку  $D$ , значення бінарної перехресної ентропії для згенерованих зразків повинне бути близьким до нуля ( $D(G(z)), 1) \rightarrow 0$ . З іншого боку, для  $G$  значення бінарної перехресної ентропії повинно бути близьким до 1 ( $D(G(z)), 1) \rightarrow 1$ . На практиці хорошим орієнтиром правильного навчання GAN є те, що логарифмічні втрати повинні знизитися близько до 0 для  $D$  і відповідно зрости для  $G$  [262].

Загалом і генератор, і дискримінатор належать до класу глибоких згорткових нейронних мереж. Процес згортки, виконаний у  $D$ , можна описати як відображення набору послідовностей позицій абонента у послідовність масивів. Аналогічно,  $G$  здійснює зворотній процес, який відображає послідовність масивів у масив послідовностей.

Через відсутність доступних наборів даних із відкритим доступом, які відповідали б критеріям для підготовки нашої моделі, було проведено моделювання для створення єдиного набору даних, що містить файли з постійним інтервалом вибірки в одну хвилину для ділянки розміром 1 км<sup>2</sup> у м.

Кошице (Словаччина). Межами для цього набору даних були координати 48.7027684, 48.7171252 для значень широти та 21.228062, 21.2497423 для значень довготи. Тренувальна вибірка містить 24 годинні записи переміщення абонентів, розділені на блоки по 4 години.

За останні роки було розроблено велику кількість методів моделювання мобільності людей в різноманітних умовах. Основна ідея застосування моделей мобільності полягає в тому, що їх результати (тобто траєкторії переміщення) відображають синтетичні дані, які відповідають реальним переміщенням. Одним із ключових аспектів синтезу навчальної вибірки є формальний розклад переміщень на регулярну (періодичну) та випадкову складові [257].

Для досягнення хорошої якості навчання алгоритму генеративних змагальних мереж, важливо досягти довготривалої стаціонарності навчальної вибірки, забезпечуючи при цьому стохастичність процесу та випадковість траєкторій. Тому, для генерації даних для навчання використовується регулярні переміщення груп абонентів, що мають типову періодичність. Такі регулярні траєкторії параметризуються набором функцій, що складається з кривих Безье та гармонічних функцій [257]. Для імітації непередбачуваних та випадкових переміщень абонентів використовується модель польотів Леві [257].

Для опису періодичних регулярних рухів використовується моделювання плавних шляхів між контрольними точками за допомогою кривих Безье. Застосування траєкторій Безье є вигідним при описі схеми руху з обмеженнями без колізій та перешкод [257]. Основна мета полягає у створенні набору плавних траєкторій, які складаються з системи регулярних відвідувань заздалегідь визначених стартових, цільових та проміжних пунктів. Причому, проміжні точки (лише для кривих Безье другого і вище порядків) використовуються для управління кривизною даної траєкторії.

Нехай  $M$  – кількість напів-динамічних абонентських груп  $j = 1, 2, \dots, M$  які розкидані в межах двовимірного простору.

Спрощене припущення полягає в тому, що кожна група складається з однакової кількості абонентів. Введемо часовий крок  $\Delta t$ , який використовується для формування даних про мобільність.

Доля довільного часового інтервалу  $[0, T_{\text{sim}} \Delta t]$ , який є більшим, ніж період переміщення  $T$  (і.e.,  $T_{\text{sim}} \Delta t \gg T$ ), система траєкторій може бути згенерована на основі модульованих квадратичних кривих Безьє [257].:

$$\{\mathbf{x}_j(t) \in \mathbb{R}^2; t \in [0, T_{\text{sim}} \Delta t]; j = 1, 2, \dots, M\} \quad (3.5)$$

де окрема траєкторія виражається як:

$$\mathbf{x}_j(t) = (1 - \Phi_j(t))^2 \mathbf{x}_{\text{init},j} + 2(1 - \Phi_j(t))\Phi_j(t) \mathbf{x}_{\text{interm},j} + \Phi_j^2(t) \mathbf{x}_{\text{tar},j} \quad (3.6)$$

Загальна структура періодичної мобільності залежить від часової модуляції на основі періодичної функції активації [257]:

$$\{\Phi_j(t) \in [0, 1]; t \in [0, T_{\text{sim}}]; j = 1, 2, \dots, M\}, \quad (3.7)$$

де

$$\Phi_j(t) = \frac{1}{1 + \exp\left[-a_1 - a_2 \sin\left(\frac{2\pi(t + t_j)}{T}\right)\right]} \quad (3.8)$$

Стаціонарні властивості групи абонентів, можна охарактеризувати як систему з чотирьох масивів [257].:

$$\{\langle \mathbf{x}_{\text{init},j}, \mathbf{x}_{\text{interm},j}, \mathbf{x}_{\text{tar},j}, t_j \rangle; j = 1, 2, \dots, M\}, \quad (3.9)$$

де  $\mathbf{x}_{\text{init},j} \in \mathbb{R}^2$  визначає стартову точку  $j$ -ї траєкторії,  $\mathbf{x}_{\text{interm},j} \in \mathbb{R}^2$ ,  $\mathbf{x}_{\text{interm},j} \in \mathbb{R}^2$  проміжна точка, яка визначає кривизну траєкторії  $\mathbf{x}_j(t)$ ,  $\mathbf{x}_{\text{tar},j} \in \mathbb{R}^2$  – точка, яка визначає кінець траєкторії.

Кожна  $\Phi_j(t)$  визначається часовим параметром  $t_j$ , який характеризується додатними цілими числами  $T, a_1, a_2$ .

Параметри  $(a_1, a_2)$  визначають наскільки логістична форма налаштовує періодичну активність. З формули легко побачити, що  $a_2 \gg a_1$  спрямовує  $\Phi_j$  до

околиць асимптотичних (граничних) значень нуль і одиниця, що означає, що граничні точки  $\mathbf{x}_j |_{\Phi_j \rightarrow 0} = \mathbf{x}_{\text{init},j}$  and  $\mathbf{x}_j |_{\Phi_j \rightarrow 1} = \mathbf{x}_{\text{tar},j}$  ніколи не досяжні [257].

Для проміжної ситуації  $\Phi_j = 1/2$ , отримується усереднене значення  $\mathbf{x}_j |_{\Phi \rightarrow 1/2} = (\mathbf{x}_{\text{init},j} + 2\mathbf{x}_{\text{interm},j} + \mathbf{x}_{\text{tar},j}) / 4$ , що підкреслює відомий факт, що  $\mathbf{x}_{\text{interm},j}$  не обов'язково лежить на траєкторії  $\mathbf{x}_j(t)$ .

Варіант випадкових переміщень забезпечується моделлю польотів Леві [257]. Цей комбінований рух базується на наступній інтерпретації. Якщо абонент переміщується до певного віддаленого пункту призначення, найкращим напрямком руху є пряма лінія [257]. Проте, наближення до цільової точки призводить до того, що інформація щодо точного розташування абонента стає розмитою, що, в свою чергу, потребує локального випадкового пошуку.

Поєднання цих двох процесів узагальнюється в моделі польотів Леві [257]. Оскільки переміщення абонентів описується непередбачуваними суб'єктивними факторами, ми представляємо їх через польоти Леві.

За умови припущення, що кутові рішення розподіляються рівномірно хаотично, на кожному етапі моделювання випадковий кут  $j$ -го UE генерується як:

$$\theta_j^{\text{LF}}(t) = 2\pi r_{\text{ang},j}(t), \quad (3.10)$$

де  $r_{\text{ang},j}(t)$  випадково вибирається за рівномірним розподілом в межах  $[0,1]$ .

Миттєва довжина кожного ітераційного кроку отримується як добуток просторових довжин  $\ell_u$  та випадкового множника  $r_{\text{stp},j}^{-1/\alpha_{\text{LF}}}$ , де  $\alpha_{\text{LF}}$  є параметр стабілізації  $r_{\text{stp},j}(t) \in [0,1]$ , який незалежно генерується за рівномірним розподілом [257].

Позиція  $\mathbf{x}_j^{\text{LF}}(t) \in \mathbb{R}^2$   $j$ -го абонента оновлюється ітераційно відповідно до виразу:

$$\theta_j^{\text{LF}}(t) \leftarrow 2\pi r_{\text{ang},j}(t), \mathbf{x}_j^{\text{LF}}(t + \Delta t) = \mathbf{x}_j^{\text{LF}}(t) + \ell_u \frac{(\cos(\theta_j^{\text{LF}}(t)), \sin(\theta_j^{\text{LF}}(t)))_{2D}}{[r_{\text{stp},j}(t)]^{1/\alpha_{\text{LF}}}}, \quad (3.11)$$

де  $(\cdot, \cdot)_{2D}$  використовується для відображення вектора у двовимірному просторі.

Додатковою особливістю моделювання є те, що абонентам, які рухаються за моделлю польотів Леві не можна вибрати крок, який перемітить їх за прямокутні межі зони моделювання. Це призводить до незначного збільшення концентрації абонентів по краях зони моделювання. Однак, дане явище не суттєво впливає на результати просторового розподілу абонентів в процесі генерації датасету для навчання генеративно-змагальних нейронних мереж [257].

Для спрощення процесу навчання, траєкторії представляються як часові ряди широти і довготи. Кожна точка масиву містить координати GPS, з інтервалом  $\Delta t = 1$  хвилина. За рахунок цього, вдалося спростити процес навчання із двомірних матриць до одномірних масивів.

Однією із особливостей GAN є те, що процес навчання в дискримінаторі збігається швидше, ніж у генераторі. Для усунення негативного впливу даного ефекту, використано правило подвійного масштабу часу (TTUR – two-timescale learning rule) [262]. Згідно із цього правила, для оптимізації генератора та дискримінатора використовуються різні кроки навчання. Зокрема, навчання D здійснюється з в 4 рази більшим кроком, ніж G ( $\alpha = 0.0004$  для D та  $\alpha = 0.0001$  для G). Таким чином, досягається зниження ефекту перенавчання на ранніх етапах [262].

Для навчання моделі згенеровано датасет, імітації реальних переміщень абонентів. Датасет містить 363000 файлів траєкторій переміщення абонентів у межах ділянки площею  $1 \text{ км}^2$  [260,262]. Приклад однієї траєкторії з датасету представлено на рис. 3.3.

У запропонованій моделі, використовується стандартна функція втрат на основі бінарної перехресної ентропії. Проте, дана функція втрат не показує візуальну статистику, за якою можна оцінити наскільки близька створена траєкторія абонента до статистики реальних траєкторій.





Рис. 3.3. Приклад траєкторії з навчальної вибірки.

З метою вирішення даної проблеми, використано бібліотеку OSMNX для побудови графіків згенерованих траєкторій через найближчі графічні вузли на карті. Крім того, оцінювалась середня та максимальна відстань між 2 сусідніми вузлами. Спостерігаючи за вибіркою навчальних даних, ми можемо стверджувати, що середня відстань між 2 сусідніми вузлами становила приблизно 15 метрів, а максимально допустима відстань не перевищувала 150 метрів. Різниця в часі між двома записами рівна 1 хвилині, що відповідає максимальній швидкості переміщення абонента 9 км/год (середня швидкість бігу). Навчання моделі проводилось протягом 80 епох. Точність отриманих результатів досягає середньої відстані 10 метрів між двома найближчими вузлами на графі вулиць. Крім того, здійснено оцінку відстані між генерованими точками та їх найближчими точками з OSMNX. В середньому ця відстань становить близько 20 метрів, що є прийнятним для досліджуваного сценарію моделювання [262].

Для візуального калібрування параметрів моделі, використано імітаційне модель GAN Lab, яка розроблена компанією Google (рис. 3.4) [268].

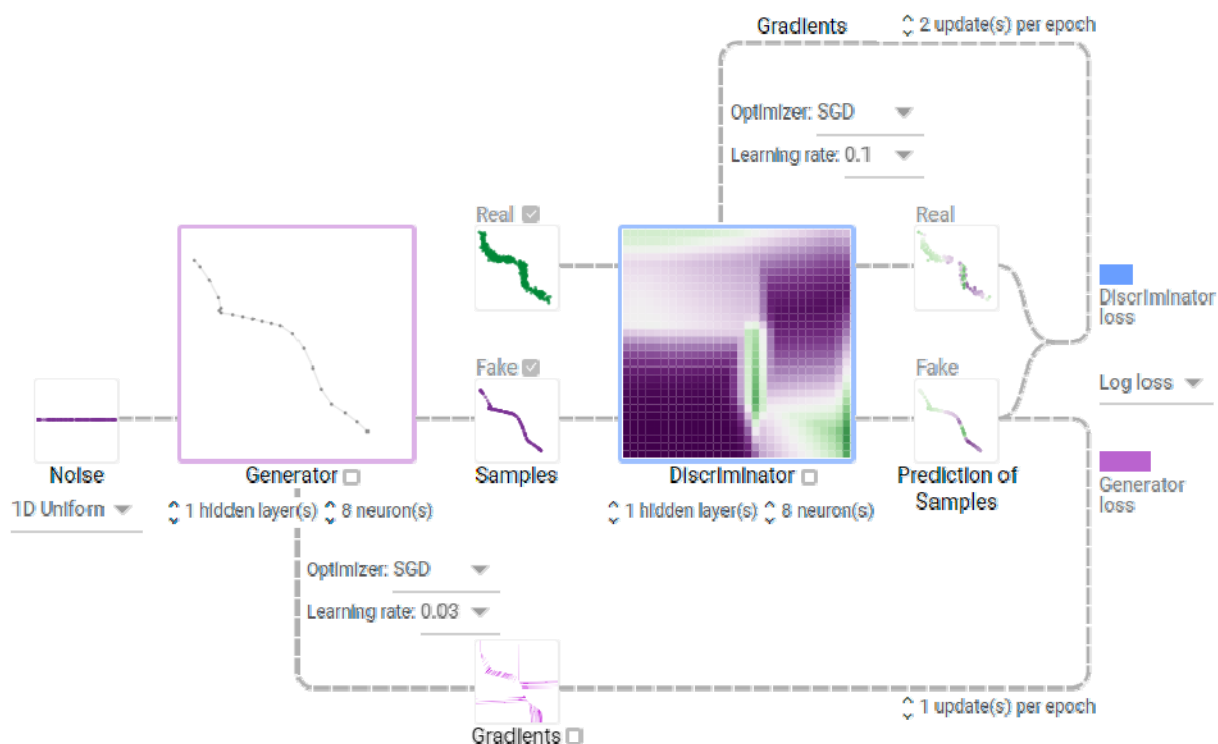


Рис. 3.4. Імітаційна модель генеративно-змагальної мережі.

Для ілюстрації принципу навчання розробленої моделі на основі генеративно-змагальної нейронної мережі, на рис. 3.5 наведено фрагмент траєкторії переміщення абонентів та порівняно результати наближення згенерованих траєкторій до цільових навчальних вибірок. Зелені точки на рисунках відображають розподіл навчальної вибірки, а фіолетові – результат згенерований моделлю генеративно-змагальної нейронної мережі після навчання.

На рис. 3.7-3.11 представлено згенеровані траєкторії для перших десяти епох навчання. Очевидно, що результатом першої епохи є повністю випадковий розподіл. В процесі навчання, з кожною наступною епохою точність моделі вдосконалюється, і з часом результуючі траєкторії мережі нагадують реальні траєкторії з навчальної вибірки.

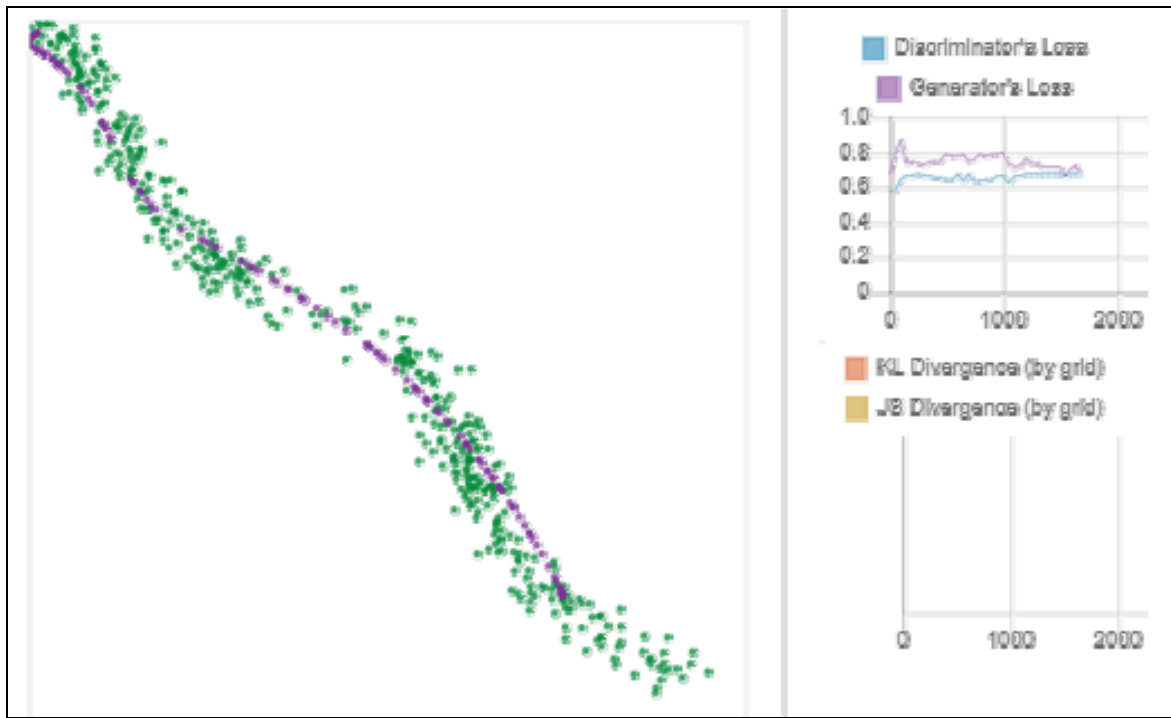


Рис. 3.5. Приклад успішної генерації фрагменту траєкторії за цільовим розподілом.

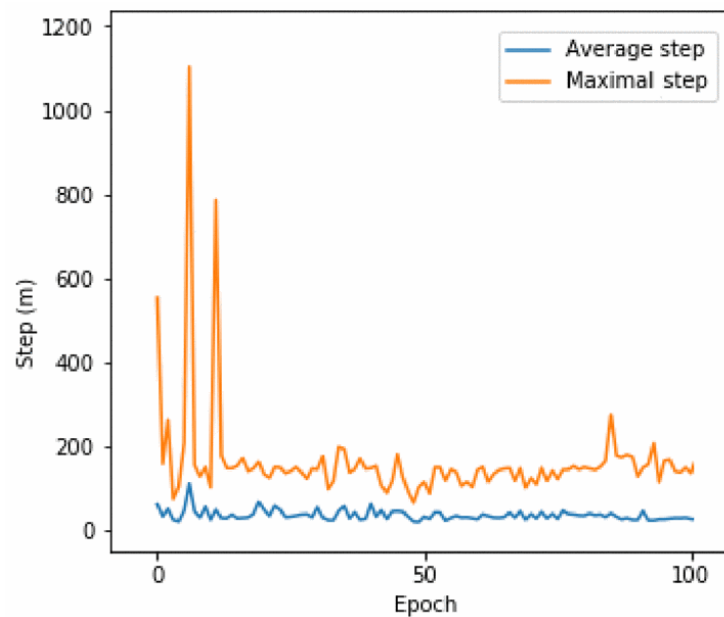


Рис. 3.6. Результати процесу навчання генеративно-змагальної нейронної мережі.

На рис. 3.12. представлено порівняння результатів генерації просторового розподілу абонентів після повного навчання моделі генеративно-загальних нейронних мереж протягом 80 епох [262].



а) б)

Рис. 3.7. Результати генерації траєкторій переміщення абонентів для першої –а) та другої епохи – б).



а) б)

Рис. 3.8. Результати генерації траєкторій переміщення абонентів для третьої –а) та четвертої епохи – б).



а) б)

Рис. 3.9. Результати генерації траєкторій переміщення абонентів для п'ятої –а) та шостої епохи – б).



а) б)

Рис. 3.10. Результати генерації траєкторій переміщення абонентів для сьомої – а) та восьмої епохи – б).



а) б)

Рис. 3.11. Результати генерації траєкторій переміщення абонентів для дев'ятої – а) та десятої епохи – б).

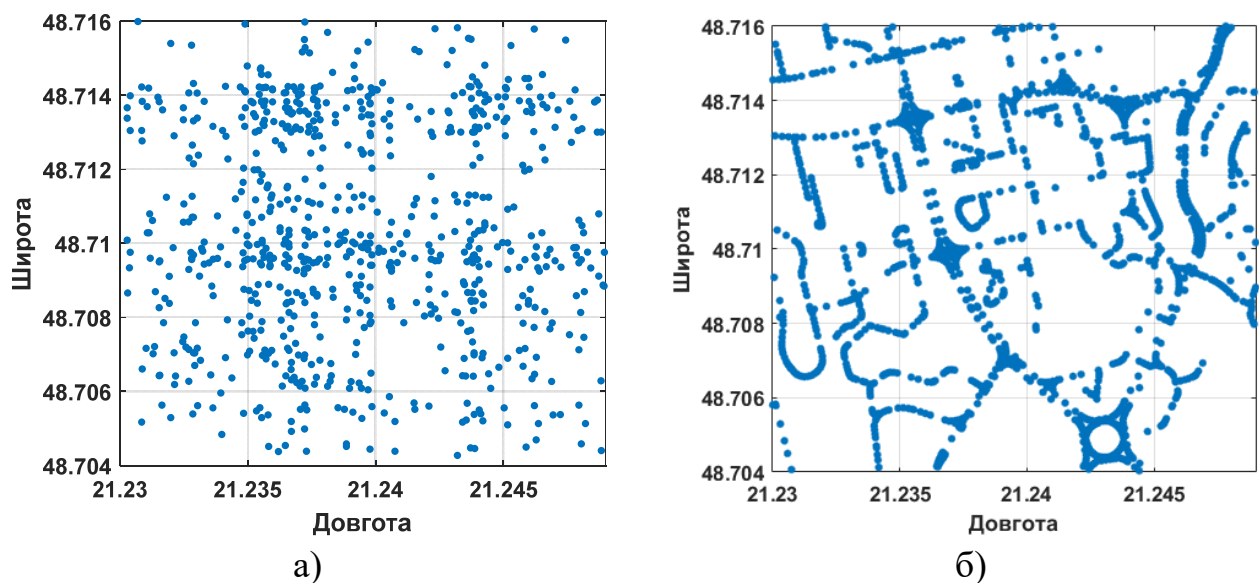


Рис. 3.12. Порівняння генерації розташування абонентів мобільного зв'язку з використанням Пуасонівського точкового процесу – а) та запропонованого методу на основі нейронних мереж GAN [262].



### **3.3.Метод інтелектуального децентралізованого синтезу покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена**

#### **3.3.1. Проблема синтезу коміркових структур з урахуванням територіальних та інфраструктурних обмежень**

Синтез та оптимізація коміркової структури мереж мобільного зв'язку є одним із найважливіших аспектів, які впливають на подальшу ефективність функціонування мережі мобільного зв'язку. Із зростанням трафіку у мережах мобільного зв'язку спостерігається чітка тенденція до більш щільного розташування комірок, і як наслідок, зменшення їх радіусу дії. Зокрема, концепція мереж 5G передбачає, що близько 80% усього трафіку передаватиметься з використанням інфраструктури малих комірок (мікро, піко та фемтокомірки) [257,258]. Це в свою чергу ставить перед операторами ряд викликів, таких як оптимальне розташування комірок, ефективне планування радіочастотних ресурсів з уникненням інтерференційних завад, управління мобільністю та балансування навантаження в мережі. Зменшення розміру комірок, робить мережу дуже чутливою до переміщень абонентів, що потребує нових підходів до оптимізації її структури.

Іншим важливим фактором є децентралізація процесу розгортання мережної інфраструктури, що потребує координованого планування оптимальної топології між усіма операторами. Проте, при зростанні кількості операторів, неможливо синхронізувати усі зацікавлені сторони для одночасної побудови мережної інфраструктури. Тому, потрібен альтернативний підхід до децентралізованого еволюційного синтезу коміркової структури, при якому кожен наступний оператор буде розбудовувати мережу з урахуванням вже існуючої інфраструктури, щоб досягти максимальної ефективності нових встановлених базових станцій [257,258]. При використанні методів детермінованої геометрії, такий підхід можна було б реалізувати шляхом примітивних обчислень відстані між базовими станціями [29]. Проте, в умовах квазіхаотичної динаміки переміщення абонентів мережі мобільного зв'язку

такий підхід не буде ефективним. У поєднанні із вищезазначеними викликами, відсутність адекватних математичних моделей, які описують динаміку переміщення абонентів у мережах мобільного зв'язку не дає змоги реалізувати детермінований алгоритм оптимізації коміркової структури мережі мобільного зв'язку. При використанні альтернативних методів планування на основі стохастичної геометрії, складність даного завдання експоненційно зростає пропорційно до збільшення кількості комірок, оскільки існує ймовірність накладання нових базових станцій з уже існуючими, що потребує додаткових етапів перевірки синтезованої структури [26,27].

Тому, в даній роботі пропонується використання машинного навчання для синтезу коміркової структури мережі для довільної території. Мета запропонованого методу полягає у тому, щоб забезпечити можливість адаптивного структурного синтезу коміркових мереж мобільного зв'язку в залежності від цільової зони покриття та характеру просторово-часових переміщень абонентів мобільного зв'язку [257,258]. Для визначення позицій малих комірок використовується алгоритм самоорганізованих карт Кохонена (SOM – Self-Organizing Maps) [269]. Самоорганізована карта Кохонена представляє собою нейронну мережу без вчителя, яка використовується для конструювання багатовимірного простору в простір з нижчою розмірністю. Даний алгоритм створює дискретне представлення вхідного простору навчальної вибірки для зниження розмірності. Самоорганізовані карти відрізняються від нейронних мереж, тим, що вони використовують функцію сусідства, що дає змогу зберегти топологічні властивості вхідного простору. [269].

При проектуванні коміркової структури вводиться обмеження висоти розташування антен малих комірок, оскільки вони переважно розміщуються на освітлювальних стовпах, стінах будівель, або інших об'єктах міської інфраструктури, висота яких не суттєво відрізняється [257,258]. Таким чином, розташування малих комірок у горизонтальній площині визначаються вагами нейронів самоорганізованої мережі, представленими векторами у двовимірному

просторі. Після цього, ітераційно здійснюється оцінка показників ефективності функціонування мережі для кожної нової топології та відповідне прийняття рішення для її модифікації.

Враховуючи те, що проектування здійснюється поверх вже існуючої інфраструктури, в запропонованому методі, існуючі макро та мікрокомірки інших операторів мають статус спеціальних нейронів із незмінними вагами, які не змінюють свого фізичного розташування [257,258]. Проте, існуючі базові станції враховуються як обслуговуючі вузли мережі мобільного зв'язку, впливаючи тим самим на процес оцінювання ефективності синтезованої структури. Структурно-логічна схема процесу інтелектуального децентралізованого синтезу коміркової структури мережі представлена на рис. 3.13.

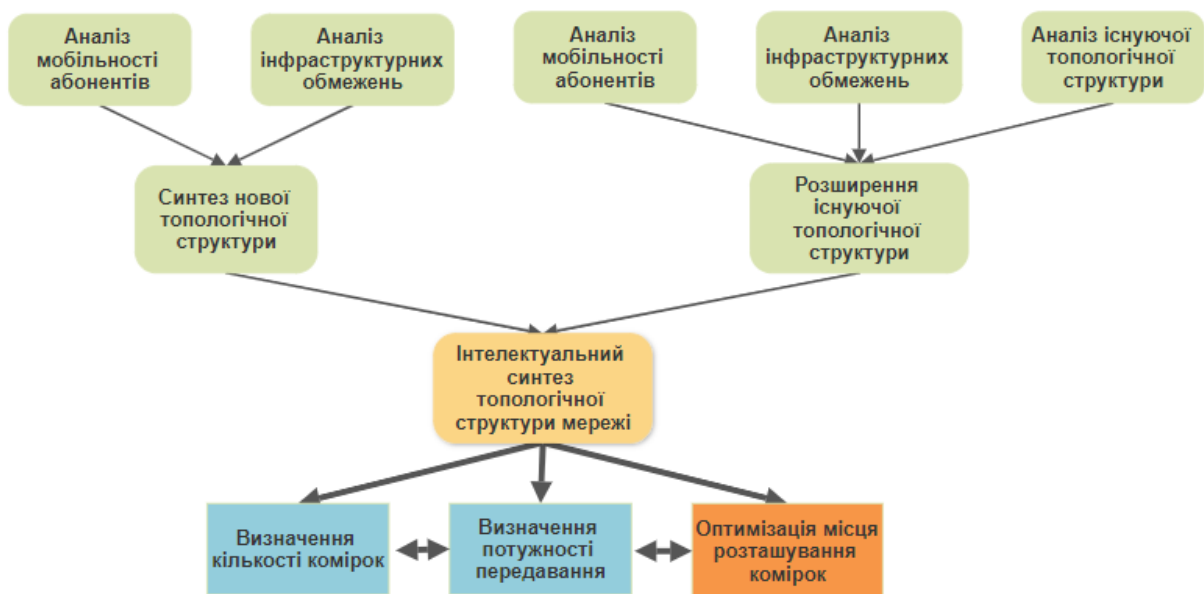


Рис. 3.13. Структурно-логічна схема процесу інтелектуального децентралізованого синтезу коміркової мережі мобільного зв'язку.

### 3.3.2. Алгоритм синтезу коміркової структури на основі самоорганізованих карт

Ключовою особливістю методу є його адаптація до децентралізованого синтезу інфраструктури багатьма операторами у середовищах з щільною забудовою та великою густиною абонентів, що має важливе значення для



майбутніх бізнес-моделей операторів у мережах 6G. Нижче наведено покрокове формалізоване представлення запропонованого методу [257,258].

**Етап 1.** Аналіз даних геоінформаційної системи OpenStreetMaps та визначення інфраструктурних обмежень цільової території синтезу топологічної структури.

**Етап 2.** Перевірка існуючої топологічної структури базових станцій та їх параметрів у межах цільової території синтезу покриття на основі інформації розподілених реєстрів блокчейн.

**Етап 3.** Навчання моделі мобільності абонентів для цільової території покриття на основі *розробленого алгоритму GAN [262]*.

**Етап 4.** Ініціалізація алгоритму SOM на основі вхідних обмежень. На даному етапі здійснюється фіксація ваг нейронів, які відповідають за позиції існуючих макро та мікрокомірок у мережі та виключення їх з множини ваг SOM, які оновлюються в процесі навчання. Запропонований, алгоритм самоорганізованих карт використовує принцип конкурентного навчання в якому для кожного нейрону обчислюється його метрика співвідношення SINR (Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio) для вектору вхідних даних. Нейрони, які мають максимальне значення метрики SINR для вектора вхідних даних вибираються як найкращі вузли відповідності [257,258]. Проте, на відміну від класичної реалізації алгоритму самоорганізованих карт, запропонований метод вибирає найкращий вузол відповідності лише серед тих малих комірок, які мають достатньо ресурсів для того щоб обслуговувати хоча б одного додаткового абонента. Відповідно, базові станції, які перевантажені, не можуть бути вибрані як найкращі вузли відповідності, навіть якщо вони відповідають даному критерію за метрикою SINR.

**Крок 4.1.** Запуск алгоритму синтезу топологічної структури.

**Крок 4.2.** Генерація множини точок розташування абонентів для цільової території, з використанням навченої моделі GAN (*див. Етап 3*).

$$\{x_i, y_i\} \in \mathbb{R}^2, i \in (1, N_{UE}), \quad (3.12)$$

де  $N_{UE}$  - кількість абонентів.

**Крок 4.3.** Оптимізація топологічної структури мережі за алгоритмом SOM у відповідності до множини розташування абонентів.

**Крок 4.3.1.** Визначення підмножини базових станцій, які мають достатньо ресурсів для обслуговування як мінімум одного абонента [257,258]:

$$\mathcal{N}_{\blacktriangleright}(t) \equiv \{\forall u; N_{RB,u}(t) > N_{UE,u}(t)\}. \quad (3.13)$$

де  $N_{RB,u}(t)$  – кількість ресурсних блоків, які є доступними для базової станції  $u$  у дискретний момент часу  $t$ ,  $N_{UE,u}(t)$  – кількість абонентів, які асоціюються з базовою станцією  $u$  у дискретний момент часу  $t$ . Крім того, приймається, що кількість абонентів, які обслуговуються однією базовою станцією не може перевищувати сумарну кількість ресурсних блоків, які виділені для відповідної базової станції. При цьому, виконуються наступні умови [257,258]:

$$\sum_{u' \in \mathcal{N}_{\blacktriangleright}} N_{UE,u'} = N_{UE} \quad (3.13.1)$$

$$\sum_{u' \in \mathcal{N}_{\blacktriangleright}} N_{RB,u'} = N_{RB} \quad (3.13.2)$$

Для опису часової динаміки процесу навчання введемо змінну  $t$ , яка визначає час, протягом якого триває процес навчання самоорганізованої карти. Відповідно, зміна розташування абонентів (динаміка мобільності) здійснюється у дискретні моменти часу з інтервалом  $\Delta t = 0.03$  год. Таким чином, оновлення карти здійснюється лише у дискретні моменти часу при зміні розташування абонентів. Кожен момент оновлення векторів розташування абонентів визначається як:

$$t_{step} = \lceil t / \Delta t \rceil. \quad (3.14)$$

Якщо припустити, що сумарний час навчання алгоритму рівний  $T$ , то кількість відповідних оновлень карти обчислюється за наступною формулою:

$$(T_{steps} + 1) = \lceil T / \Delta t \rceil + 1. \quad (3.15)$$

**Крок 4.3.2.** Визначення позицій розташування базових станцій для підмножини нейронів SOM (4) в просторі  $\mathbb{R}^2$  [257,258]:

$$\mathcal{W}_{\blacktriangleright}(t) \equiv \{\mathbf{w}_j(t); \forall j \in \mathcal{N}_{\blacktriangleright}(t)\}. \quad (3.16)$$

Вхідні дані для алгоритму подаються у вигляді груп, які генеруються для кожного дискретного інтервалу навчання. Для кожної групи всі значення  $N_{UE,j}(t)$  встановлюються в нуль. В процесі навчання, абоненти переміщуються в нові локації, і перерозподіл ресурсних блоків здійснюється наново.

**Крок 4.3.3.** Вибір оптимальної базової станції серед підмножини базових станцій (4) за розробленим критерієм забезпечення максимального значення  $SINR$  для  $i$ -го абонента [257,258]:

$$c(t) \equiv \arg \max_{w_u(t) \in \mathcal{W}_u(t)} SINR(x(t), w_u(t)) \quad (3.17)$$

**Крок 4.3.4.** Обчислення нових ваг SOM  $w_i \in \mathcal{W}$  на основі введеної параметричної функції для децентралізованого синтезу топології мережі:

$$w_i(t + \Delta t) = \begin{cases} w_i(t), w_i(t) \in \{\text{множина фіксованих комірок}\} \\ w_i(t) + \beta_{[c(t),i]}(t)(x(t) - w_i(t)), [\text{в інших випадках}] \end{cases} \quad (3.18)$$

Кроки 4.3.1-4.3.4 повторюються ітераційно для усіх абонентів  $i$ .

**Крок 4.4.** Оцінювання показників ефективності функціонування мережної інфраструктури на основі наступних метрик: ймовірність відмови в обслуговуванні із гарантованим співвідношенням сигнал/шум, середня пропускна здатність на одного абонента, системна спектральна ефективність та коефіцієнт справедливого розподілу ресурсів. Формалізація зазначених метрик представлена у підрозділі 3.3.4 [257,258].

**Крок 4.5.** Зменшення кроку навчання на основі функції інтенсивності навчання:

$$\beta_{[c(t),i]}(t) = \begin{cases} \alpha(t) & \text{при } \|n_{c(t)} - n_i\|_{Eu}^{2d} < \rho(t), \\ 0 & \text{в інших випадках} \end{cases}, \quad \rho(t) \geq 0, \lim_{t \rightarrow \infty} \rho(t) = 0, n_k \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}; k \in \{1, 2, \dots\} \quad (3.19)$$

де  $\alpha(t)$  – монотонно спадна в часі функція, яка забезпечує нейропластичність алгоритму SOM з точки зору динаміки навчання. Використання Евклідової норми  $\|\dots\|_{Eu}^{2d}$  в двовимірному просторі у комбінації з системою постійних векторів  $n_k$  дає змогу сформувати топологічну сітку самоорганізованої карти  $\{n_k \in \mathbb{Z} \times \mathbb{Z}; k \in \{1, 2, \dots\}\}$ . Монотонно-спадна в часі функція радіусу

$\rho(t) \geq 0, \rho(t)|_{t \rightarrow \infty} = 0$ , відображає нестационарність процесу формування топології та розподілу інформаційних потоків шляхом контролю взаємодії між нейронами.

**Крок 4.6.** Кроки 4.1-4.5 повторюються до досягнення стабільної топологічної структури, яка буде вказувати на квазі-оптимальне розташування комірок у цільовій зоні покриття. Варто зазначити, топологічна структура мережі мобільного зв'язку представляється як множина елементів  $\langle i, w_i(t) \rangle$ , які формалізовано представляються як нейрони в самоорганізованій карті.

Графічно процес децентралізованого синтезу топологічної структури з використанням запропонованого методу, представлено на рис. 3.14.

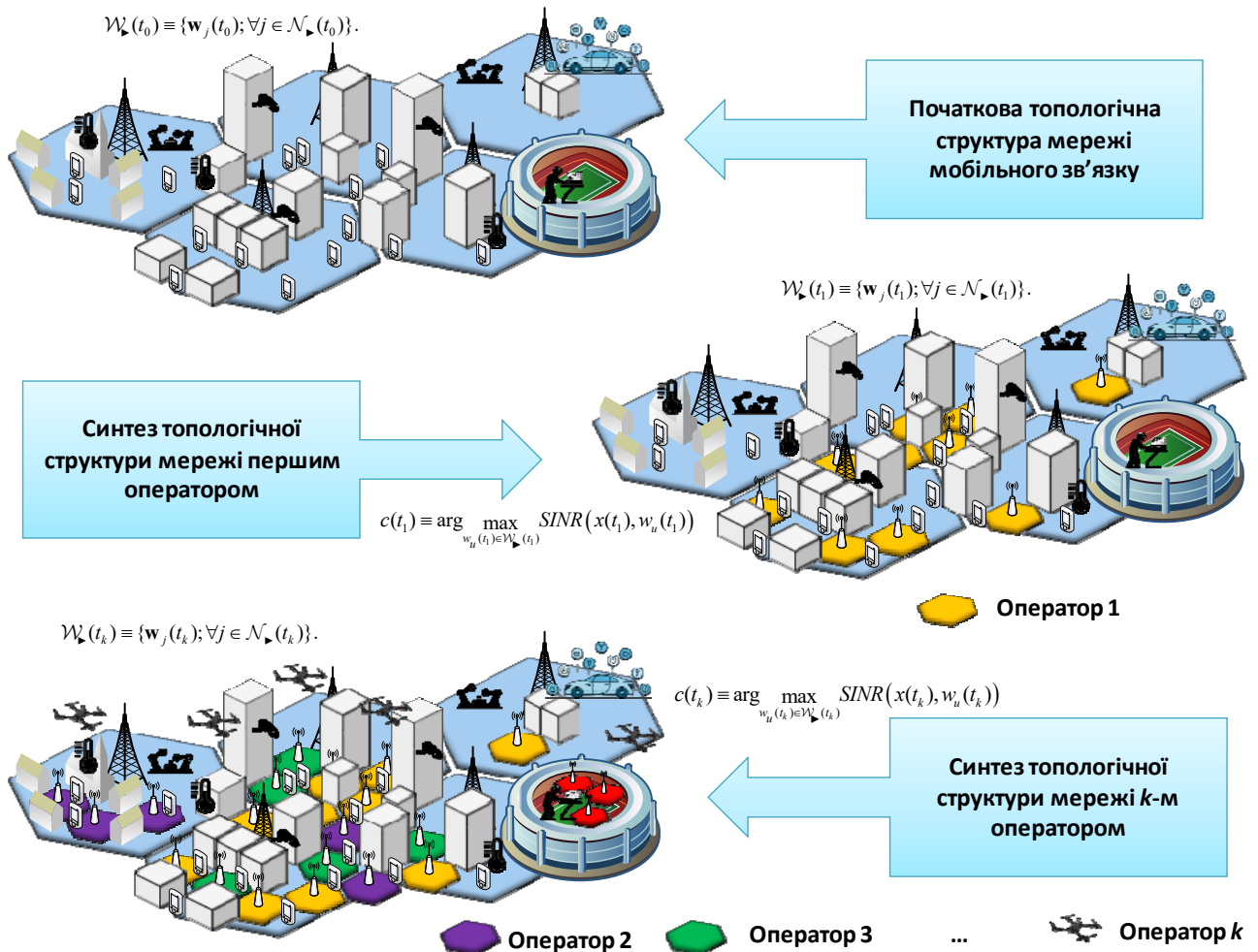


Рис. 3.14. Графічне представлення методу децентралізованого синтезу топологічної структури.

Таким чином, процес навчання запропонованого алгоритму синтезу топологічної структури мережі мобільного зв'язку полягає у переміщенні нейронів в межах простору допустимих карт на площині:

$$x(t) \in \mathbb{R}^2 \mapsto w_{c(t)} \in \mathcal{N}_{\blacktriangleright}(t) \quad (3.20)$$

З кожною наступною ітерацією переміщення окремих нейронів зменшуються до тих пір, поки вони остаточно не зафіксуються у вигляді стабільної топологічної структури  $w_{c^*} \in \mathbb{R}^2$ , яка буде вказувати на оптимальне розташування комірок у цільовій зоні покриття.

### 3.3.3. Алгоритм синтезу коміркової структури на основі кластеризації К-середніх

Для порівняння, розглянемо реалізацію синтезу топологічної структури мережі мобільного зв'язку на основі класичного алгоритму К-середніх, який є одним із найбільш поширених методів машинного навчання для розв'язання задач кластеризації [246,248,249]. Даний алгоритм є схожим в реалізації із алгоритмом самоорганізованих карт з точки зору обробки вхідних даних та процесу навчання. Різниця в тому, що в базовій версії алгоритму К-середніх неможливо знайти чітку топологічну структуру мережі мобільного зв'язку. Крім того, спочатку алгоритм самоорганізованих карт був запропонований як модель, що працює у форматі асоціативної пам'яті, у той час як алгоритм К-середніх розроблявся в основному як агрегатор даних, який точно наближує розв'язок завдань не поліноміальної складності (NP-складних завдань). За допомогою алгоритму К-середніх можна мінімізувати суму середньо-квадратичних відхилень будь-якої навчальної вибірки від найближчої точки в центрі кластера [249,258].

Для синтезу топологічної структури, в оригінальний алгоритм К-середніх необхідно внести обмеження максимально можливої кількості точок, які можуть бути присвоєні до одного кластера для того щоб виконувалась умова:

$$N_{RB,i} \geq N_{UE,i}.$$

На початковому етапі, алгоритм К-середніх починається з присвоєння випадкових значень початкового розташування базових станцій [258]. Як і у випадку ініціалізації ваг самоорганізованої карти Кохонена, базові станції розміщуються у відповідності до біноміального точкового процесу, який є одним із методів стохастичної геометрії.

Для навчання алгоритму використовуються вибірки розташування абонентів  $\mathcal{S}(t_{step})$ , які оновлюються з кожним дискретним кроком моделювання. Кожна вибірка складається із  $card(\mathcal{S}(t_{step})) = N_{UE}$  точок [258]. Кожна точка, в свою чергу, вказує на розташування абонента у дискретний момент часу  $t_{step}$ :

$$x_j(t_{step}), j \in \{1, \dots, N_{UE}\} \quad (3.20)$$

Вектор центроїдів, вказує на середнє значення  $u$ -го кластера для відповідної навчальної вибірки  $v_u(t, j=0)$  з  $u \in \mathcal{M}_\blacktriangleright(t)$ , де

$$\begin{aligned} \mathcal{M}_\blacktriangleright(t) &\equiv \{u' \in \{1, \dots, K\}; \\ &\underbrace{N_{RB,u'}(t) > N_{UE,u'}(t)}_{\text{dynamic constraint}}\}. \end{aligned} \quad (3.21)$$

Варто зазначити, що  $v_u(t, j=0)$  належить до підмножини усіх векторів-прототипів  $\{v_i; i \in \{1, \dots, K\}\}$ , які представляють базові станції, що мають змогу обслуговувати хоча б одного додаткового абонента [258]. Вибір центроїда здійснюється у відповідності до наступного виразу [258]:

$$b_j(t) \equiv \arg \min_{k \in \mathcal{M}_\blacktriangleright(t)} \|x_j(t) - v_k(t, j=0)\|_{Eu}^{2d} \quad (3.22)$$

де  $v_{b_j}$  – вектор, який відповідає кластеру  $b_j \in \{1, \dots, K\}$ . Використання індексу  $j$  вказує на взаємозв'язок між центроїдом  $b_j(t)$  та точкою розташування абонента  $x_j(t)$ . Відповідно вектор розташування базової станції  $v_{b_j(t)}(t)$  повинен не лише бути геометрично найближчим до абонента, але і має забезпечити як мінімум один доступний ресурсний блок для обслуговування абонента в точці  $x_j(t)$  [258].

Після вивчення поточної вибірки абонент  $x_j(t)$ , асоціюється із базовою

станцією  $b_j$ . Аналогічним чином оновлюються усі центроїди  $\{v_i(t + \Delta t, j); \forall i \in \{1, \dots, K\}\}$  для кожного  $i$ -го кластеру. Ітераційний процес модифікації відповідних векторів  $v_i(t, j)$  базується на переміщенні середніх значень центроїдів в межах відповідних кластерів [258]:

$$v_i(t, j+1) = \begin{cases} v_i(t, j), & v_i(t, j) \in \{\text{множина позицій макрокомірок}\} \vee b_j(t) \neq i \\ (1 - \eta_j(t)) v_i(t, j) + \eta_j(t) x_j(t), & [\text{в інших випадках}] \end{cases}. \quad (3.22)$$

Подальші ітерації

$$v_i(t + \Delta t, j) \Big|_{j=0} \xrightarrow{\text{update}} v_i(t, j) \Big|_{j=\text{card}(\mathcal{S}_i(t))} \quad (3.23)$$

модифікують центроїди для того щоб максимально наблизити їх до вхідних даних із навчальних вибірок [258]. Інтенсивність взаємозв'язку між окермо взятим центроїдом та елементом навчальної вибірки може бути апроксимована методом лінійного наближення, який є аналогом до алгоритму ковзного середнього з нормалізованими коефіцієнтами [258]:

$$\eta_j = \frac{\eta_{j,\text{auxil}}}{N_{UE} \times T_{\text{steps}} \sum_{j'=1}^j \eta_{j',\text{auxil}}}, \quad \eta_j \in [0,1] \quad (3.24)$$

де  $\eta_{j,\text{auxil}}$  представляє додатній адаптивний коефіцієнт залежний від часу:

$$\eta_{j,\text{auxil}}(t) = \left( \sum_{t_{\text{step}}=0}^{\left\lceil \frac{t}{\Delta t} \right\rceil - 1} \text{card}(\mathcal{S}_{b_j(t)}(t_{\text{step}} \Delta t)) + \sum_{s=1}^j \hat{\delta}[b_s(t), b_j(t)] \right)^{-1}, \quad (3.25)$$

який також враховує дельту Кронекера, що вказує на співпадіння між індексами  $b_s, b_j$ :

$$\hat{\delta}[b_s, b_j] = \begin{cases} 1, & b_s = b_j \\ 0, & b_s \neq b_j \end{cases}. \quad (3.26)$$

### 3.3.4. Формалізація показників ефективності функціонування фізичної топологічної структури мережі мобільного зв'язку

В даному підрозділі, визначено сукупність основних метрик якості функціонування фізичної топологічної структури мережі мобільного зв'язку, які використовуються в процесі багатокритеріальної оптимізації. До цих метрик належать ймовірність відмови в обслуговуванні із гарантованим співвідношенням сигнал/шум, середня пропускна здатність на одного абонента, системна спектральна ефективність та коефіцієнт справедливого розподілу ресурсів. Дискретний інтервал вимірювання метрик становить  $t_{step}$ , в той час як сумарна кількість вимірювань становлюється рівною  $T_{steps}$ . Нижче, наведено детальний опис кожної метрики ефективності [258].

**Ймовірність відмови в обслуговуванні із заданим рівнем SINR.** Ймовірність відмови в обслуговуванні  $P_{out}$  обчислюється шляхом порівняння всіх значень SINR, із заданою пороговою величиною [270-275]. Абонент вважається таким, якому відмовлено в обслуговуванні, якщо значення SINR для його пристрою є нижчим від порогового  $SINR_{thr}$ . Таким чином, фізичним зміст даної метрики полягає у кількості абонентів, які знаходяться за пороговою величиною співвідношення SINR для окремо взятої досліджуваної топологічної структури мережі мобільного зв'язку [258]:

$$P_{out} = \frac{1}{N_{UE}} \sum_{i=1}^{N_{UE}} \tilde{\delta}_{thr} [SINR_i(t), SINR_{thr}], \quad (3.27)$$

де  $SINR_i(t_{step})$  – SINR  $i$ -го абонента у дискретний момент часу  $t_{step}$ . Пороговий ефект виражається у вигляді параметричної функції:

$$\tilde{\delta}_{thr} [SINR, SINR_{thr}] \equiv \begin{cases} 1, & SINR < SINR_{thr} \\ 0, & SINR \geq SINR_{thr} \end{cases}. \quad (3.28)$$

Другий аргумент функції (3.28)  $\tilde{\delta}_{thr} [., \bullet]$  зарезерований для заданого порогового рівня  $SINR_{thr}$ , відносно якого здійснюється розрахунок ймовірності відмови в обслуговуванні.

**Середня пропускна здатність на абонента.** Пропускна здатність



абонента розраховується відповідно до значень SINR та смуги пропускання каналу зв'язку. У мережах мобільного зв'язку стандартизованих консорціумом 3GPP як релізи четвертого та п'ятого покоління розподіл смуги пропускання каналу зв'язку здійснюється у форматі частотно-часових ресурсних блоків з використанням OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), які розподіляються між абонентами планування ресурсів [276-281]. Таким чином, смуга пропускання каналу зв'язку фізично розраховується як сумарна кількість ресурсних блоків, які передаються абоненту протягом однієї секунди. Середня пропускна здатність розраховується для кожного дискретного інтервалу моделювання, і остаточне значення розраховується як середнє арифметичне значення протягом кількості інтервалів моделювання [258]:

$$C = \frac{1}{N_{UE}} \sum_{i=1}^{N_{UE}} C_i(t) \quad (3.29)$$

**Системна спектральна ефективність.** Системна спектральна ефективність визначається як сумарна пропускна здатність усіх абонентів сегменту мережі, яка досягається в межах абсолютної смуги радіочастотних ресурсів  $B_{sys}$ , яка використовується для даного сегменту. При чому, значення системної спектральної ефективності не нормується у відповідності до коефіцієнту повторного використання частот [282,283]. Таким чином, чим вищий коефіцієнт перевикористання спектру в межах сегменту мережі, тим вище значення системної спектральної ефективності даного сегменту:

$$S = \frac{1}{B_{sys}} \sum_{i=1}^{N_{UE}} C_i(t) \quad (3.30)$$

**Справедливість розподілу ресурсів.** Справедливість розподілу ресурсів визначається як величина усереднена протягом тривалості моделювання на основі індексу Джейна [12]:

$$J_A = \frac{1}{N_{UE}} \frac{\left[ \sum_{s=1}^{N_{UE}} C_s(t) \right]^2}{\sum_{z=1}^{N_{UE}} C_z^2(t)} \quad (3.31)$$

Даний індекс використовується для розрахунку справедливості будь-якого довільного розподілу. Значення справедливості розподілу ресурсів знаходяться в межах  $[1/N_{UE}, 1]$  не лише для миттєвих значень, але і для усереднених протягом усієї тривалості моделювання  $J_A$ .

### **3.4. Розроблення просторової імітаційної реальної фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку**

#### **3.4.1. Побудова віртуальної моделі середовища з міською забудовою та багатопроменевим поширенням хвиль**

У даному підрозділі представлено імітаційне моделювання процесу інтелектуального синтезу топологічної коміркової структури мережі мобільного зв'язку. Для цього розроблено імітаційну модель територіальної зони покриття, яка є точною копією сегменту району Манхеттен у місті Нью-Йорк (США) (рис. 3.15). Зокрема модель представлено у тривимірному просторі, враховуючи розташування та розміри будівель [258].



Рис. 3.15. Просторова модель досліджуваної зони покриття.

Наступним етапом синтезу є аналіз існуючої мережної інфраструктури, яка вже попередньо побудована іншими операторами мобільного зв'язку (рис.3.16). Для цього використано сервіс OpenCellID, який містить відкриту інформацію про базові станції мобільного зв'язку стандартів 2G, 3G, 4G та 5G і постійно оновлюється [258]. Зокрема, в базі є інформація про розташування, радіус дії, та

приналежність базових станцій до конкретного оператора мобільного зв'язку (рис.3.17)



Рис. 3.16. Просторове розміщення базових станцій у досліджуваній моделі мережі.

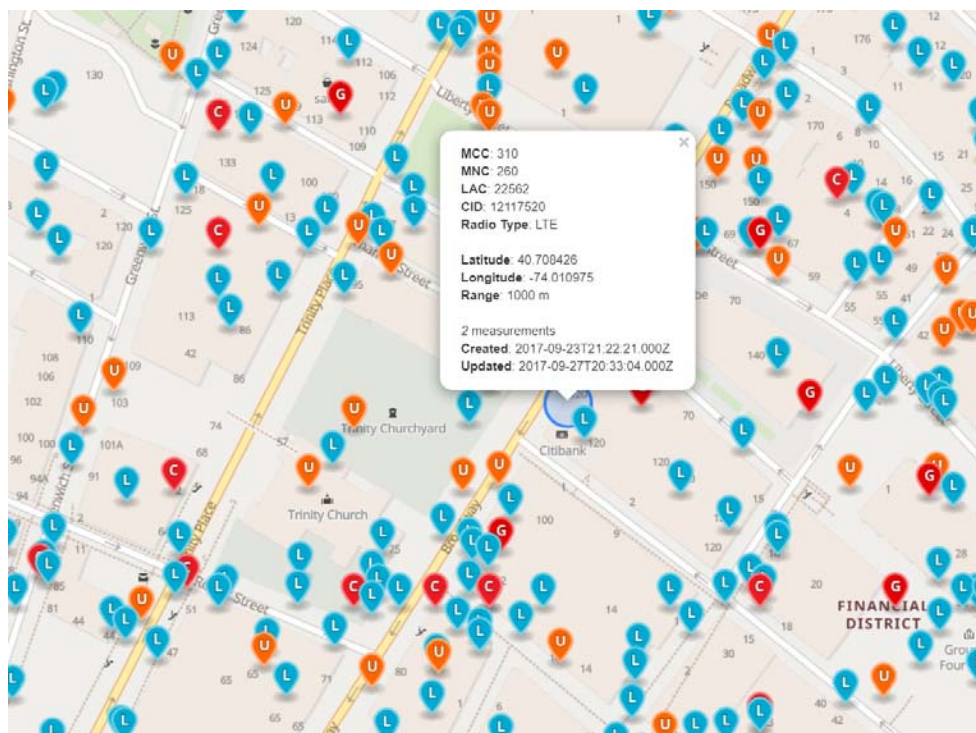


Рис. 3.17. Вибірка даних про реальне розташування існуючої мережної інфраструктури мобільного зв'язку стандартів 2G, 3G, 4G та 5G за допомогою сервісу OpenCellID.

Крім того, розроблено реалістичну модель мобільності кінцевих абонентів у міському середовищі, на основі якої здійснюється багатокритеріальна оптимізація топологічної структури (рис. 3.18).



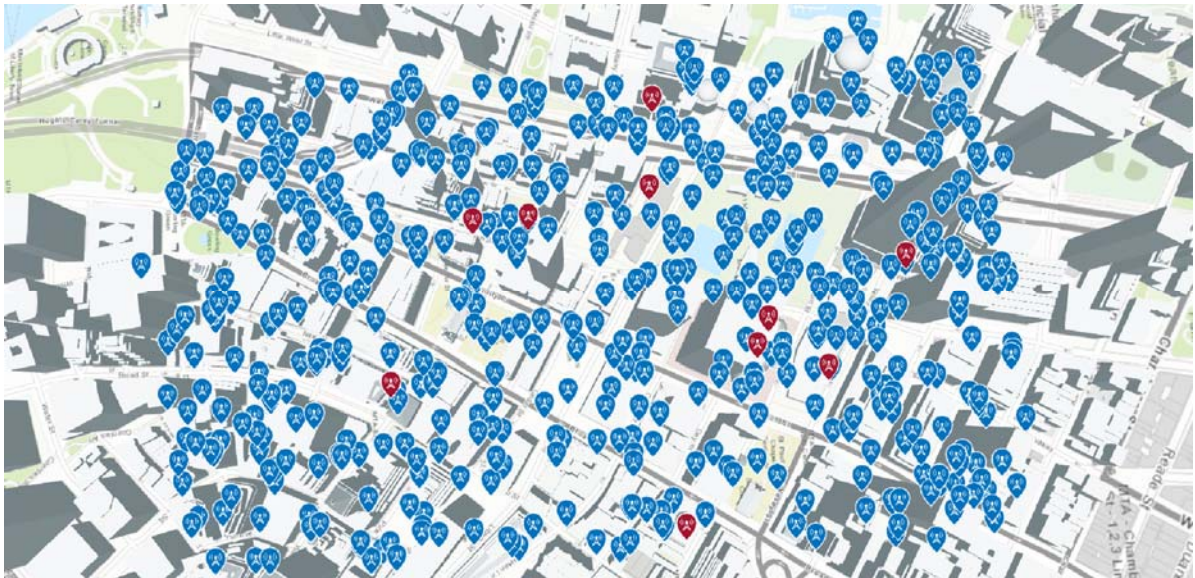


Рис. 3.18. Приклад розташування абонентів у межах досліджуваної зони покриття мережі мобільного зв'язку в фіксований момент часу.

Варто зазначити, що тривимірна модель міської забудови використовувалась лише для моделі поширення радіохвиль, з метою врахування загасання сигналу при розрахунку співвідношення SINR. Для цього використано модель трасування променів, яка враховує особливості поширення сигналу з урахуванням багатократного відбиття від будівель, і як наслідок, втрати потужності сигналу (рис. 3.19) [284].

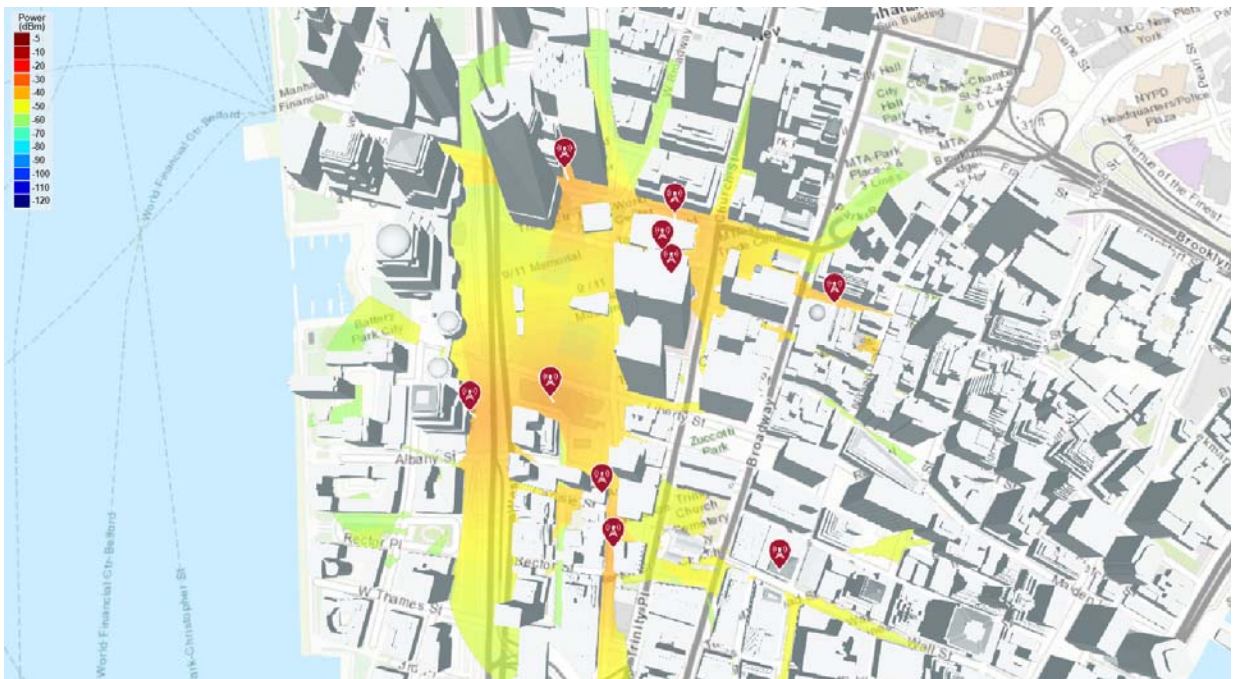


Рис. 3.19. Обчислення рівня сигналу від базових станцій мережі мобільного зв'язку з урахуванням особливостей поширення сигналу в середовищах з щільною забудовою.

Розглянемо цей процес більш детально на прикладі кількох довільних абонентів. Для початку спробуємо побудувати лінії прямої видимості (LOS – Line of Sight) між базовою станцією та абонентськими пристроями. Як можна побачити з рис. 3.20, жоден пристрій не знаходиться в умовах прямої видимості до базової станції, незважаючи на те, що їх відстань до базової станції не перевищує 700 м. Таким чином, існуючі геометричні методи проектування, які переважно використовують метрику Евклідової відстані для розрахунку оптимального розташування базових станцій, не можуть забезпечити адекватність моделювання та належну ефективність синтезованої топологічної структури.

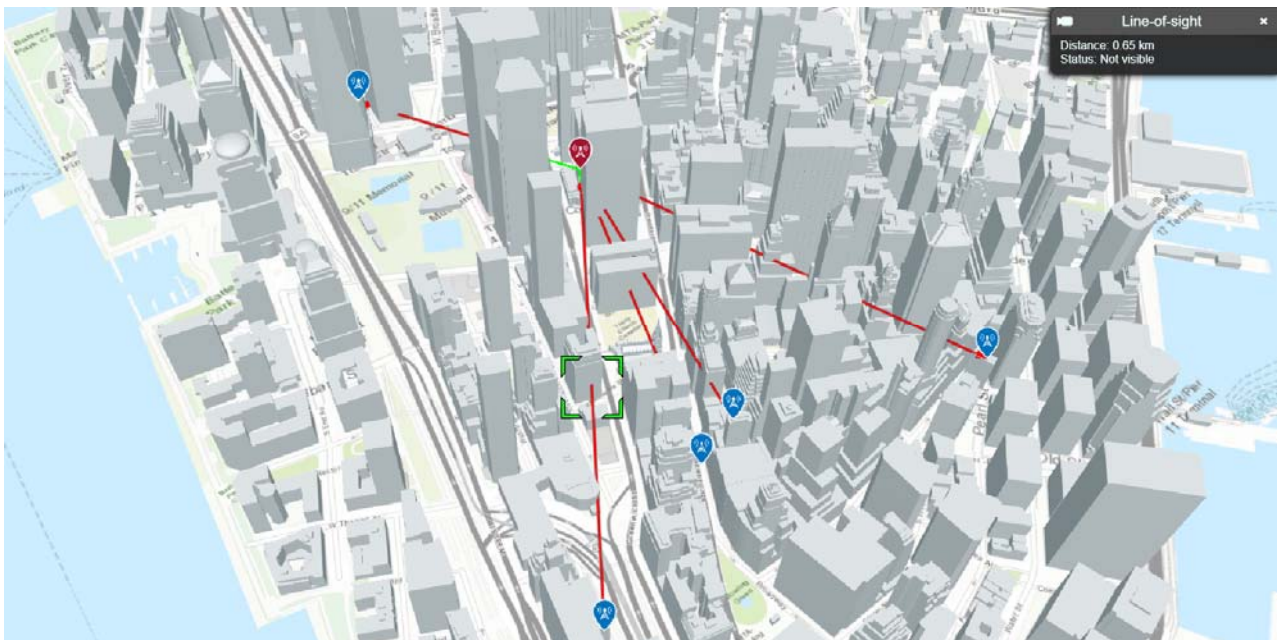


Рис. 3.20. Моделювання каналів прямої видимості між базовою станцією та абонентськими пристроями.

З метою наближення сценарію моделювання до реальних умов функціонування мережі мобільного зв'язку в умовах щільної міської забудови запропонований метод синтезу використовує модель трасування променів, для імітації багаторазових відбиттів сигналу в каналах NLOS (Non Line of Sight) (рис.3.21) [284].



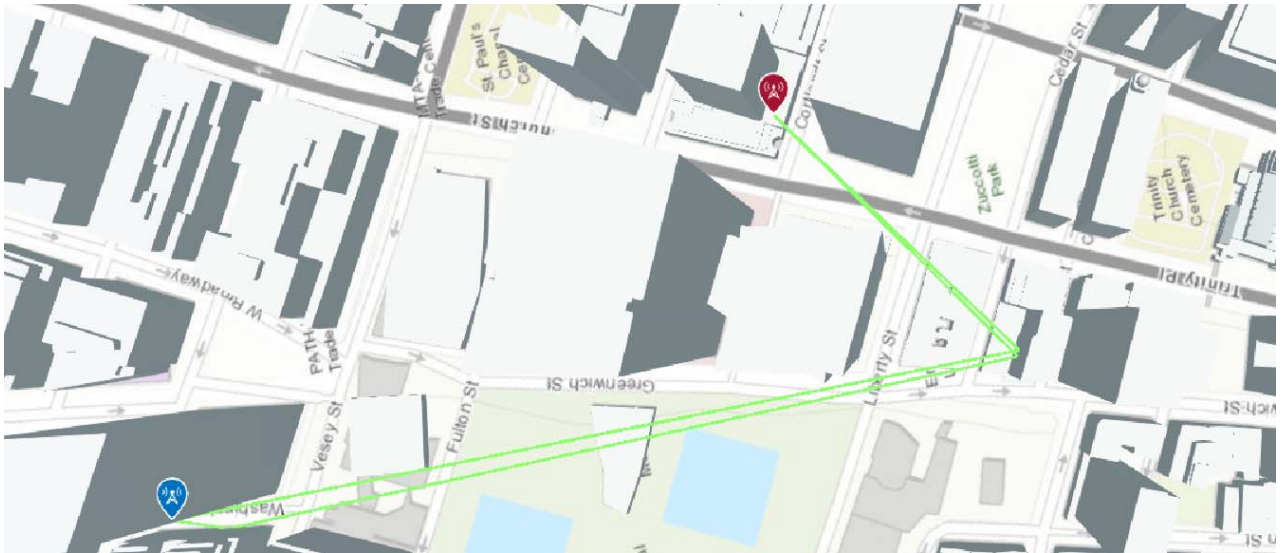


Рис. 3.21. Моделювання каналів непрямой видимості між базовою станцією та абонентським пристроєм.

При використанні моделі багаторазових відбиттів сигналу від будівель, або земної поверхні, дуже важливо враховувати характеристики матеріалів та їх вплив на загасання сигналу. Зокрема, для прикладу на рис. 3.21. при використанні моделі повного відбиття, рівень прийнятого сигналу на стороні абонентського пристрою становив  $-37.1483$  дБм, у той час як при врахуванні відбиття від бетонної стіни, рівень сигналу є суттєво нижчим:  $-42.5176$  дБм. Варто зазначити, що на характеристики поширення сигналу суттєво впливає і таке буденне явище як зміна погодніх умов. Зокрема, при дощових або снігових опадах, рівень прийнятого сигналу є на  $1.5-3$  дБм нижчим, у зв'язку із вищим показником заломлення середовища поширення. Крім того, при оптимізації коміркової структури мережі необхідно враховувати сезонні фактори, такі як наявність або відсутність листя на кронах дерев, що в свою чергу потребує різних конфігурації щодо потужності передавання базових станцій для літнього та зимового періодів.

### **3.4.2. Дослідження впливу конфігурації антен на процес синтезу мережної інфраструктури**

Вищенаведені результати представлені з урахуванням колової діаграми направленості антен базових станцій, що є адекватним сценарієм для умов

розгортання мікрокомірок з радіусом дії до 50 м, які можуть розміщуватись на освітлювальних стовпах або рекламних щитках. Проте, в переважній більшості, навіть для мікрокомірок стандарту 5G використовується технологія багатоантенних систем Massive MIMO (Multiple Input Multiple Output)[256]. Однією із ключових переваг багатоантенних систем є можливість адаптації діаграми спрямованості шляхом керування амплітудою та фазою сигналу кожного елемента антени. Оскільки в мережах 5G використовуються значно вищі частотні діапазони, зокрема 28 ГГц, то розміри антен, які є прямо пропорційні до довжини хвилі сигналу, зменшились у 10 разів порівняно із антенами 4G. Таким чином, при аналогічних розмірах антенної системи, 5G має змогу використовувати конфігурації MIMO 128x128, у той час як 4G використовує не більше ніж MIMO 8x8. Такий підхід значно підвищує гнучкість базових станцій з точки зору діаграмоутворення [264]. Тому, в запропонованому методі синтезу коміркової структури, передбачена можливість оптимізації розташування комірок не лише враховуючи колову діаграму антен, але й вузьконаправлену з використанням адаптивного формування діаграми спрямованості [256,264,285,286]. Проте, справедливо зазначити, що врахування діаграмоутворення в процесу синтезу суттєво ускладнює процес моделювання за рахунок значно вищої кількості ступенів свободи для конфігурації мережі.

Технологія адаптивного діаграмоутворення полягає у формуванні сигналу шляхом суперпозиції хвиль від кількох незалежних елементів (Рис. 3.22). Ця технологія дозволяє, шляхом зміни початкової фази та амплітуди сигналу, керувати напрямком та формою діаграми спрямованості багатоелементної антенної системи. В основі адаптивного діаграмоутворення є методи оцінки кута приходу AoA (Angle of Arrival) та кута відправлення AoD (Angle of Departure). Оскільки, сигнал від абонента надходить на кожен наступний елемент антенної системи із зміщенням по фазі за рахунок проходження додаткової відстані, то виходячи із відомої відстані між елементами антенної

системи та отриманим значенням зсуву фази (3.32), можна вивести значення кута приходу (3.33) [285]:

$$\Delta\phi = -2\pi \frac{d \sin \theta}{\lambda} \quad (3.32)$$

$$\theta = \sin \left( \frac{\Delta\phi \Delta\lambda}{-2\pi d} \right) \quad (3.33)$$

де  $\theta$  – це кут приходу,  $d$  – відстань між елементами антени,  $\lambda$  – довжина хвилі.

На основі розрахованих значень кута приходу (AoA) формується матриця зсувів фаз, яка використовується для повороту діаграми спрямованості антени в напрямку абонента або групи абонентів:

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \cdots & \varphi_{1n} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \cdots & \varphi_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \varphi_{m1} & \cdots & \cdots & \varphi_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Для цього матриця зсувів фаз поелементно перемножується на відповідну матрицю потужностей випромінювачів, тобто амплітуд випромінюваного сигналу відповідними елементами антени. На виході отримуємо керуючі сигнали для кожного елемента антенної систем [256,264].

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \cdots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \cdots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \cdots & \cdots & P_{mn} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Для моделювання перевіряються різні послідовності ввімкнення елементів багатоантенної системи, включаючи різні варіанти відстаней між активними елементами. Для моделювання обрано частотний діапазон 28 ГГц, який є основним діапазоном для розгортання мікрокомірок 5G в умовах міської забудови [264]. Дослідження проводились з використанням різних конфігурацій антенної системи, для того щоб визначити оптимальні конфігурації ввімкнених елементів антени. Усі конфігурації використовують півхвильову відстань між елементами антени.





Рис. 3.22. Приклад статичної конфігурації діаграми направленості. RSSI=  
-87.1683 дБм.

Для порівняння на рис. 3.22 та 3.23 представлено два варіанти формування діаграми спрямованості антени: статичний та адаптивний, відповідно. Результати вимірювання прийнятого сигналу показують, що використання скануючої антенної системи дає змогу підвищити рівень прийнятого сигналу приблизно на 41 дБ [264].



Рис. 3.23. Приклад адаптивної конфігурації діаграми направленості. RSSI=  
-45.56 дБм.

Для моделювання алгоритмів самоорганізованих карт та кластеризації K-середніх використовувалась модель в 2D-просторі. При цьому, висота антени малої комірки враховується лише для метрики SINR, яка залежить від моделі поширення радіохвиль, у той час як для метрики Евклідової відстані, обчислення здійснюється повністю у двовимірному просторі [258]. Усі параметри імітаційної моделі мережі мобільного зв'язку встановлені у відповідності до специфікацій 3GPP [84,85]. Для спрощення процесу навчання алгоритмів, потужність передавання базових станцій макрокомірок та малих комірок фіксована, а ступені свободи запропонованого алгоритму обмежуються географічним розташуванням малих комірок. Процес оптимізації починається з генерації випадкової топологічної структури мережі на основі біноміального точкового процесу. Після цього, здійснюється оцінювання основних метрик ефективності функціонування топологічної структури, і здійснюється наступна ітерація алгоритму синтезу коміркової структури [258]. Остаточна топологія була визначена при досягненні компромісу для усіх показників ефективності топологічної структури (рис. 3.24). При використанні обчислень на основі графічного процесора та бібліотеки CUDA, сумарний час синтезу топологічної структури мережі для заданих параметрів моделювання становить приблизно дві години, що є значно менше, ніж час розв'язку NP-складної задачі оптимізації [258].

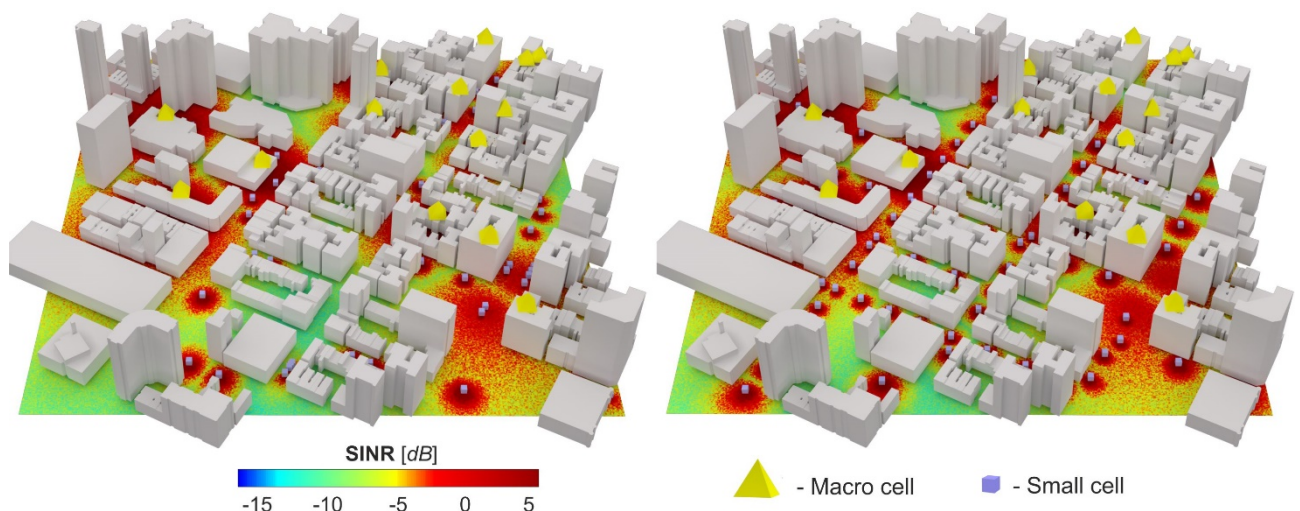


Рис. 3.24. Просторове представлення моделі міського середовища для синтезу топологічної структури мережі мобільного зв'язку.

### 3.4.3. Аналіз результатів моделювання алгоритмів синтезу топологічної структури

Експериментальні дослідження проводились на основі *розробленої імітаційної моделі фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку у тривимірному просторі*, враховуючи реальні розташування та розміри будівель з бази даних OpenStreetMaps, реальне розташування макрокомірок на основі даних сервісу OpenCellID, параметри мережі радіодоступу згідно рекомендацій 3GPP, а також *розробленої моделі мобільності на основі GAN* [84,85,258,262].

При моделюванні мобільності генерувалось два типи абонентів: пішоходи та пасажери автомобілів. Аналогічно до моделювання у другому розділі роботи, кожен автомобіль одночасно перевозить 4-х активних абонентів. Переміщення абонентів здійснюється у відповідності до траєкторій, які відповідають типовій активності абонентів у досліджуваному районі. Тому, усі маршрути абонентів розраховуються відповідно до Манхеттенської відстані. Швидкість переміщення абонентів в автомобілях встановлена на рівні 30 км/год, у той час як для пішоходів – 5 км/год [258].

Як показано на рис. 3.24, простір для інтелектуального алгоритму синтезу топологічної структури мережі обмежений забудовою міського середовища, що додає складності, проте є більш реалістичним з точки зору проектування мережі мобільного зв'язку оператором.

З великої кількості проведених експериментів для різної кількості малих комірок, а також двох різних інтелектуальних алгоритмів синтезу топологічної структури, можна зробити висновок, що інтелектуальні алгоритми переважають алгоритм синтезу топологічної структури на основі Пуасонівського точкового процесу за всіма показниками ефективності (рис. 3.25-3.26) [26,27,257,258].

Результати експериментальних досліджень показали, що запропонований метод синтезу топологічної структури дає змогу підвищити ймовірність обслуговування абонентів із прийнятним співвідношенням SINR до 20%, у порівнянні із алгоритмом Пуасонівського точкового процесу, забезпечуючи при

цьому схожі результати з алгоритмом К-середніх (рис. 3.25,а). Моделювання ймовірності відмови здійснювалось для випадку 40 комірок [258].

Водночас, запропонований метод забезпечує найбільш справедливий розподіл ресурсів, переважаючи алгоритми К-середніх та Пуасонівського точкового процесу на 6% та 8%, відповідно (рис. 3.25,б) [258].

Порівняння з точки зору середньої пропускної здатності та системної спектральної ефективності показує перевагу запропонованого методу над алгоритмом К-середніх та алгоритмом Пуасонівського точкового процесу на 7% та 40%, відповідно (рис. 3.26,а,б) [258].

Перевагу запропонованого методу на основі самоорганізованих карт над алгоритмом К-середніх можна пояснити наступним чином. На відміну від алгоритму К-середніх, який оптимізує розташування комірок незалежно одна від одної, алгоритм самоорганізованих карт зберігає взаємозв'язок між сусідніми комірками. Таким чином, топологічна структура, яка синтезована алгоритмом К-середніх допускає існування сильно відокремлених кластерів, у той час як алгоритм самоорганізованих карт розміщує декілька сусідніх комірок в районах з більшою густиною абонентів [258].

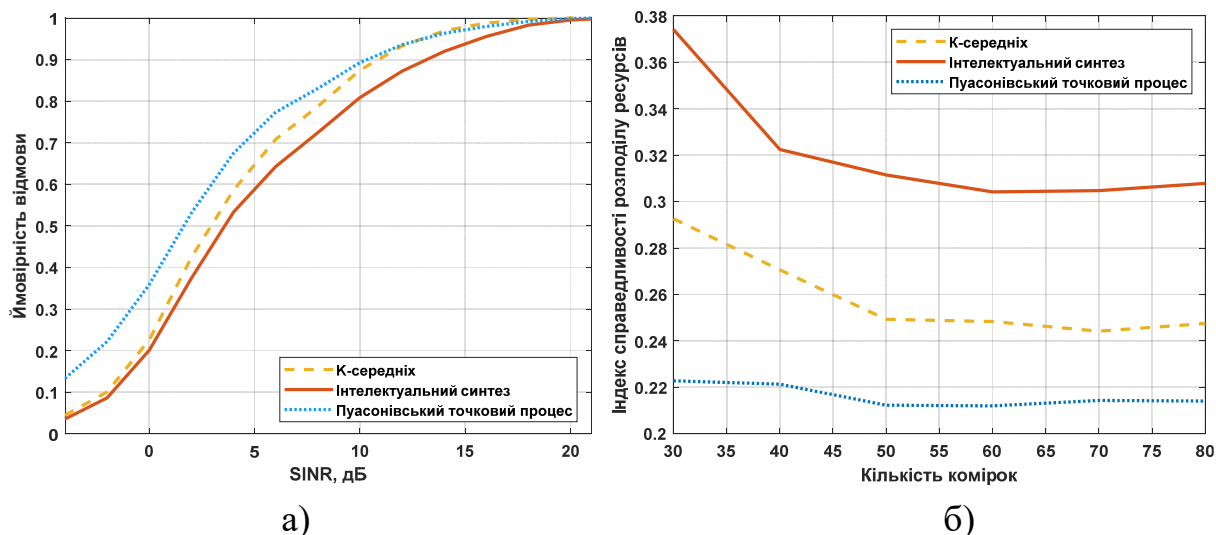


Рис. 3.25. Результати моделювання показників ефективності функціонування топологічної структури мережі мобільного зв'язку: ймовірність відмови - (а), справедливість розподілу ресурсів - (б).

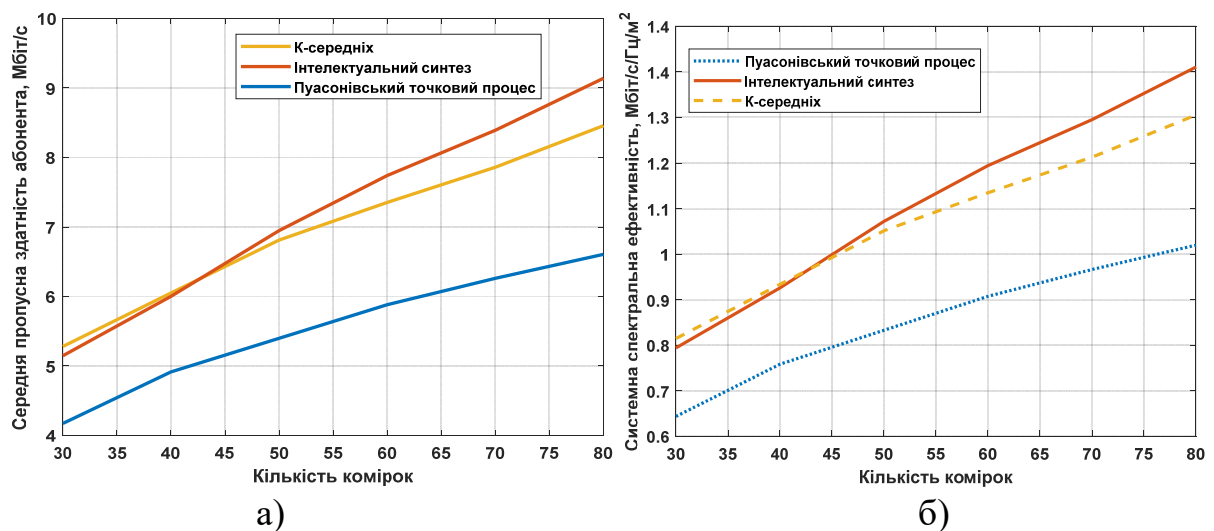


Рис. 3.26. Результати моделювання показників ефективності функціонування топологічної структури мережі мобільного зв'язку: середня пропускна здатність - (а), системна спектральна ефективність - (б).

Підсумовуючи результати, можна зробити висновок, що синергічне поєднання запропонованих у розділі методів дає змогу закласти значно вищий потенціал ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку на етапі її проектування, у порівнянні із існуючими методами синтезу топологічної структури на основі детермінованої та стохастичної геометрії.

### 3.5. Висновки до 3-го розділу

1. Запропоновано алгоритм моделювання мобільності абонентів, який використовує генеративно-змагальні нейронні мережі. Особливістю запропонованого алгоритму, є можливість адаптації до довільного середовища та індивідуальних атрибутів кінцевих абонентів. Для моделювання просторово-часових статистичних характеристик трафіку, запропонований алгоритм використовує систему OpenStreetMaps, яка дає змогу представити досліджувану територію у вигляді графа маршрутів, на основі якого генеруються траєкторії переміщення абонентів. Такий підхід, дав змогу врахувати особливості цільової зони покриття території з точки зору не лише маршрутів переміщення абонентів, але й типу району, що в свою чергу забезпечує адекватність моделі просторово-часової локалізації абонентів. Використання даної моделі, в процесі

синтезу коміркової структури, дало змогу підвищити системну спектральну ефективність мережі мобільного зв'язку на 7%.

2. Розвинуто метод проектування покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена. Ключовими відмінностями методу є використання метрики співвідношення сигнал/шум, замість метрики Евклідової відстані, що дало змогу враховувати просторові характеристики зони покриття із щільною забудовою, а також використання фіксованих вагових коефіцієнтів нейронної мережі, що дало змогу врахувати існуючі базові станції в процесі проектування нової мережної інфраструктури. Таким чином, забезпечується децентралізований синтез цілісної топологічної структури мережі мобільного зв'язку різними операторами. Для дослідження, розроблено імітаційну модель фізичної мережі мобільного зв'язку, яка враховує тривимірну копію забудови місцевості на основі геоінформаційної системи OpenStreetMaps та реальне розташування базових станцій на основі бази OpenCellID. Запропонований підхід дав змогу на 20% підвищити ймовірність обслуговування абонентів із прийнятним співвідношенням сигнал/шум, за рахунок моделювання просторових характеристик радіоканалів з багатопроменевим поширенням хвиль на етапі синтезу складних топологічних структур.

## **РОЗДІЛ 4. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ РАДІОЧАСТОТНИМИ РЕСУРСАМИ В МУЛЬТИОПЕРАТОРНИХ МЕРЕЖАХ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

### **4.1. Проблематика спільного використання радіочастотного ресурсу в децентралізованих мережах мобільного зв'язку**

У другому розділі роботи запропоновано фундаментальні засади процесу спільного використання спектру між операторами на основі токенизації радіочастотного ресурсу та смарт-контрактів. Проте, з урахуванням поточних реалій розподілу радіочастотного ресурсу в Україні та більшості країн світу необхідно розробити ефективну модель спільного використання ресурсів між операторами враховуючи їх стратегічні цілі та обмеження [233,287-289]. На сьогоднішній час, актуальною моделлю використання радіочастотного ресурсу є централізовані аукціони між операторами, на яких оголошується набір лотів, які формуються з фрагментів радіочастотного спектру та можуть бути придбані операторами. Часто на практиці трапляється ситуація, при якій даний розподіл не є рівномірним, оскільки оператори мобільного зв'язку з різною абонентською базою, мають різні економічні стратегії окупності інвестицій. Як приклад, можна навести аукціон на частоти LTE в Україні діапазоні 1800 МГц, де початкові лоти були розподілені між трьома найбільшими операторами в Україні пропорційно до частки їх абонентської бази: 15 + 15 МГц – lifecell, 20 + 20 МГц – Vodafone Україна, 25+25 МГц – Київстар. Ще 3 лоти розмірами 5 + 5 МГц були продані при жорсткій конкуренції між операторами, і у підсумку два з них отримав Київстар, а третій дістався Vodafone Україна. Таким чином у підсумку, оператори на сьогоднішній час можуть використовувати наступні смуги у діапазоні 1800 МГц:

- Lifecell – по 15 МГц для UL та DL відповідно;
- Vodafone Україна – по 25 МГц для UL та DL відповідно;
- Київстар – по 35 МГц для UL та DL відповідно.



При цьому, враховуючи сумарну смугу радіочастотного ресурсу шириною 75 МГц, жоден з операторів, не має змоги використовувати більше ніж 25 МГц неперервного радіочастотного ресурсу. Враховуючи характеристики мобільності абонентів та неоднорідний територіальний розподіл трафіку, часто виникає ситуація, при якій в одній територіальній зоні пропорція розподілу абонентів між операторами суттєво відрізняється від пропорції розподілу радіочастотного ресурсу [233,236,288,289]. Це призводить до того, що оператор з меншим обсягом радіочастотного ресурсу у комірці, повинен обслуговувати більшу кількість абонентів, ніж оператор з більшим обсягом радіочастотного ресурсу. Таким чином, знижується сумарна ефективність використання радіочастотного ресурсу, економічна ефективність для оператора з надлишком ресурсів та ефективність обслуговування абонентів в мережі оператора з нестачею ресурсів. Враховуючи, що даний розподіл динамічно змінюється в часі, оператори потребують методів та моделей торгівлі ліцензійним радіочастотним ресурсом між собою для максимальної ефективності його використання [219,233,236,288,289].

## **4.2. Розроблення моделі спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в децентралізованих мережах мобільного зв'язку**

### **4.2.1. Обґрунтування техніко-економічної моделі функціонування мультиоператорної мережі мобільного зв'язку**

Для синтезу моделі торгівлі необхідно визначити набір показників ефективності функціонування децентралізованих систем мобільного зв'язку. Зокрема, доцільно виділити індивідуальні показники ефективності абонентів, технічні аспекти ефективності мережної інфраструктури та економічні аспекти операторів. В контексті даної дисертаційної роботи, в якості метрики для абонентів запропонована функція корисності, яка базується на інтегральному оцінюванні параметрів якості та вартості сервісу [233]. Тому, при побудові моделі торгівлі токенизованим радіочастотним ресурсом для операторів, в



основі буде використано метод адаптивного вибору оператора на стороні абонента. Таким чином реалізується конкурентна модель, при якій абоненти впливають на результуючі дії операторів [219,233]. З точки зору мережної інфраструктури, розглядаються такі показники як спектральна ефективність та пікова швидкість передавання даних. Водночас для операторів, визначальним критерієм є прибуток та рентабельність інвестицій [219,233].

Тому, у роботі пропонується децентралізація ринку мереж мобільного зв'язку, при якій кожен абонент має змогу обрати найбільш прийнятний варіант підключення до мережі, проаналізувавши його доцільність для конкретних умов. Перш за все, необхідно вивчити можливі сценарії функціонування мультиоператорної мережі, які ймовірно можуть будуть придатними для впровадження в сучасних реаліях ринку мобільного зв'язку для підвищення ефективності як для кінцевих абонентів, так і для операторів [219,233].

Існуючі бізнес-моделі операторів є внутрішньо-орієнтованими, і зосереджені переважно на ексклюзивних угодах SLA з кінцевими абонентами. Впровадження запропонованого методу адаптивного вибору оператора, дасть змогу стимулювати конкуренцію у площині операторів, що теоретично повинно покращити якість сервісу для абонентів [219,233]. Крім того, модель мультиоператорного обслуговування дає змогу операторам розподіляти між собою прибуток від надання послуг тим самим абонентам, що додає більшої гнучкості для формування їх ринкових стратегій [219,233]. Існуючі приклади роздрібних ринків електроенергії та природного газу, показують, що така лібералізація дала змогу підвищити ефективність функціонування для всіх учасників ринку. Незважаючи на те, що ринок мобільного зв'язку сильно відрізняється від ринку енергетики, все ще існують деякі подібні особливості. Наприклад, радіочастотні ресурси не є скінченим фізичним активом, який можна накопичувати, обсяг використання радіочастотного ресурсу змінюється в часі, ринок характеризується різноманітними ціновими політиками, монополіями, картельними угодами, тощо.

Тому, в даному розділі пропонується модель реалістичного сценарію побудови мультиоператорної мережі мобільного зв'язку. Дана модель базується на двох типах операторів: оператор макрокомірок ( $M$ ) та оператор мікрокомірок ( $S$ ). При цьому, ми припускаємо, що оператор макрокомірок є великим національним оператором з власною мережною інфраструктурою макрокомірок та ексклюзивним правом на використання радіочастотного ресурсу ліцензійного діапазону [219,233]. У свою чергу, оператор мікрокомірок має лише власну мережну інфраструктуру мікрокомірок, в той час як радіочастотний ресурс орендується у оператора макрокомірок. Така модель взаємодії вже використовується на практиці в Китаї, де оператори China-Telecom та China Unicom орендують радіочастотний ресурс TD-LTE у оператора China Mobile [290]. Тому, у роботі приймається, що даний сценарій може бути перспективним варіантом для існуючих операторів мобільного зв'язку в Україні.

#### **4.2.2. Розроблення технічної моделі децентралізованої мультиоператорної мережі мобільного зв'язку**

Концепція багаторівневого покриття гетерогенної мережі мобільного зв'язку, довела свою перевагу з точки зору збільшення пропускної здатності за рахунок використання додаткових шарів покриття та повторного використання частот. Незважаючи на практично необмежені можливості багаторівневої архітектури, з точки зору підвищення системної спектральної ефективності, істотним обмеженням є дефіцит радіочастотного ресурсу. Для кожного додаткового шару покриття повинна використовуватись окрема смуга частот, яка не перетинається з будь-яким іншим шаром покриття. Тому, кожен наступний шар, як правило формується з комірок меншого розміру, порівняно із попереднім. Зазвичай ці шари класифікують на макрокомірки, мікрокомірки, пікокомірки та фемтокомірки. Така архітектура дає змогу повторно використовувати один і той же радіочастотний ресурс в межах одного шару покриття, або між різними шарами, якщо немає їх перекриття у цільовій зоні

обслуговування [29].

У контексті даної дисертаційної роботи, багаторівневі гетерогенні мережі є зручною моделлю для дослідження техніко-економічних аспектів спільного використання радіочастотного ресурсу та адаптивного вибору оператора в мережі мобільного зв'язку. Для спрощення імітаційного моделювання запропонована формалізована модель обмежена двома операторами мережі мобільного зв'язку з двома різними шарами покриття: макрокомірками та мікрокомірками [219,233].

Крім того, приймається, що будь-який абонент може динамічно змінювати оператора, для того щоб вибрати найкращий компроміс між вартістю та якістю сервісу. Для уникнення зловживань з боку операторів, ціна суборенди радіочастотного ресурсу є фіксованою та встановлюється регулятором (НКРЗІ, FCC, Ofcom, тощо) [219,233].

Таким чином, оператор макрокомірок може балансувати свої доходи від обслуговування кінцевих абонентів та від надання радіочастотного ресурсу в суборенду. У свою чергу, оператор мікрокомірок має змогу повторно використовувати радіочастотний ресурс для різних мікрокомірок, забезпечуючи тим самим вищу системну спектральну ефективність та якість обслуговування абонентів, і відповідно встановити за це вищу вартість послуг, враховуючи особливості функції корисності абонентів.

Топологічна структура макрокомірок обирається статично для цільової зони покриття на основі даних з сервісу OpenCellID. Топологічна структура мікрокомірок формується на основі запропонованого у третьому розділі роботи методу інтелектуального синтезу коміркової структури з використанням самоорганізованих карт Кохонена [258]. Параметри радіоінтерфейсу вибираються із специфікації 3GPP [84,85]. Для базових станцій макрокомірок використовується смуга радіочастотного ресурсу шириною 20 МГц в діапазоні 1800 МГц (100 ресурсних блоків у ресурсній сітці мережі LTE/5G). Для мікрокомірок ми встановлюємо обмеження у 4 МГц (20 ресурсних блоків у ресурсній сітці мережі LTE/5G), які можуть бути взяті в суборенду від

оператора макрокомірок. Модель топологічної структури для досліджуваного сценарію представлена на рис. 4.1.

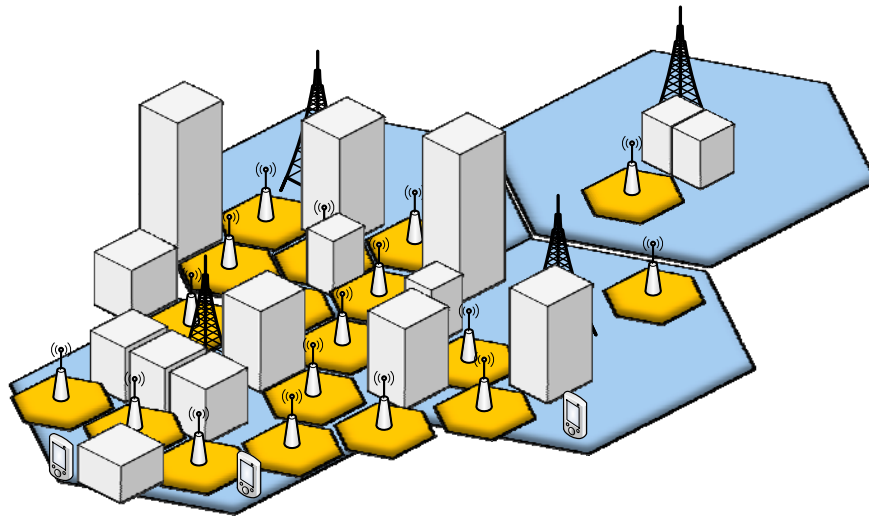


Рис. 4.1. Модель топологічної структури для досліджуваного сценарію спільного використання ресурсів.

Оренда радіочастотних ресурсів дає змогу оператору макрокомірок отримати миттєвий дохід, без надання послуг кінцевим абонентам. Це, в свою чергу, мотивує оператора макрокомірок розвантажувати свою мережну інфраструктуру та передавати частину абонентів на обслуговування оператору мікрокомірок, у випадку перевантаження макрокомірок. Такий підхід вже знайшов застосування в контексті внутрішньої мережі одного оператора, з використанням алгоритму MLB (Mobility Load Balancing). Дана процедура передбачає примусовий хендовер абонентів з перевантажених базових станцій на менш завантажені, що дає змогу балансувати навантаження в мережі та забезпечити рівномірну якість обслуговування для усіх абонентів. З точки зору практичної реалізації, запропонований метод адаптивної зміни оператора дає змогу реалізувати аналог алгоритму MLB, враховуючи тісну інтеграцію між усіма операторами в межах інфраструктури блокчейн [219,233]. Проте, у такому контексті, ініціатором хендоверу є безпосередньо абонент, який приймає рішення на основі порівняння значень функції корисності. Таким чином, оператор макрокомірок отримує додаткові доходи від суборенди радіочастотних ресурсів, забезпечуючи тим самим вищу якість сервісу для

абонентів, які залишаються в його обслуговуванні. Усі операції, пов'язані з орендою радіочастотних ресурсів регулюються брокером радіочастотного ресурсу на основі смарт-контрактів, який визначає права доступу операторів до радіочастотного ресурсу. Альтернативно, при невеликій кількості операторів та наявності довіреної третьої сторони брокер спектру може бути реалізований з використанням централізованої бази даних та відповідного програмного контролера, якому довіряють усі оператори [236].

Розглянемо формалізоване представлення запропонованої моделі. Нехай  $N$  – кількість абонентів в мережі мобільного зв'язку, поточне розташування яких визначено координатами  $x_i(t) \in \mathbb{R}^2, i \in \{1, 2, \dots, N\}$ . Розташування макрокомірок визначається координатами  $y_j \in \mathbb{R}^2, j \in \{1, 2, \dots, M\}$ . Для параметрів радіоканалу приймається наявність гладких завмирань каналу зв'язку в межах одного ресурсного блоку та колову діаграму спрямованості антен. Характеристика каналу зв'язку між  $i$ -м абонентом та  $j$ -ю базовою станцією визначається наступним чином [219,233]:

$$g_{ij}(t) = A_{ij} g_{\text{fad},ij}(t) L_{ij}, \quad (4.1)$$

де  $A_{ij}$  – коефіцієнт підсилення антени,  $g_{\text{fad},ij}(t)$  – компонента гладких завмирань в каналі зв'язку,  $L_{ij}$  – загасання сигналу в каналі зв'язку. Враховуючи те, що основною метою розробленої моделі є підвищення техніко-економічної ефективності процесу спільного використання радіочастотного ресурсу операторами, у даному розділі використано спрощену модель загасання у вільному просторі, яка використовується для планування покриття мереж мобільного зв'язку 5G в середовищах із щільною міською забудовою [291]:

$$L_{ij} = FSPL(f, 1m) + 10n \log_{10}(d_{ij}^{\text{tran-rec}}) + \chi_{\sigma}^{CI} [\text{dB}], \quad (4.2)$$

де  $f$  – несуча частота,  $d_{ij}^{\text{tran-rec}}$  – довжина радіоканалу між вузлами  $i$  та  $j$ ,  $\chi_{\sigma}^{CI}$ ,  $n$  – коефіцієнти наближення,  $FSPL(\dots)$  – загасання сигналу у вільному просторі:

$$FSPL(f, 1m) = 20 \log_{10} \left( \frac{4\pi f}{c} \right), \quad (4.3)$$

де  $c$  – швидкість поширення електромагнітної хвилі у вакуумі.

Модель поширення сигналу строго визначається двома коригуючими коефіцієнтами  $\chi_\sigma^{CI}$  та  $n$ . Зокрема, в [291] визначено дві модифікації моделі поширення радіохвиль для геометрії відкритого простору та для щільної багатоповерхової забудови. В запропонованій реалізації, розглядається середовище з щільною міською забудовою та високою густиною абонентського трафіку. Відповідно для макрокомірок обирається другий варіант моделі, який відтворює поширення сигналу у середовищі канйонного типу. З іншого боку, для мікрокомірок обирається модель геометрії відкритого простору, яка передбачає наявність лише каналів прямої видимості (LOS – Line-of-Sight) між базовими станціями та абонентськими пристроями. Таким чином, значення коригуючих коефіцієнтів моделей поширення для макрокомірок становлять  $n = 2.7$  та  $\chi_\sigma^{CI} = 8.1$ , а для мікрокомірок  $n=2$  та  $\chi_\sigma^{CI} = 2.9$ , відповідно [233,291].

Використовуючи значення характеристики каналу  $g_{ij}$  та відповідні величини потужності передавання базових станцій  $P_j$ , виводимо величину співвідношення сигналу до шуму та інтерференції SINR для  $i$ -го абонента, який обслуговується базовою станцією  $j$ -ї базової станції:

$$\gamma_{ij}(t) \equiv \frac{P_j g_{ij}(t)}{\sum_{s=1, s \neq j}^M P_s g_{is}(t) + \sigma_\gamma^2} = \frac{P_j g_{ij}(t)}{I_{ij}(t) + \sigma_\gamma^2}, \quad (4.4)$$

де  $\sigma_\gamma^2$  – спектральна густина потужності шуму. Варто зазначити, що у формулі (4.4) враховано усі системні шуми, які впливають на пристрій  $i$ -го абонента.

В якості метрики ефективності функціонування мережі мобільного зв'язку, визначаємо пропускну здатність для  $i$ -го абонента:

$$q_{ij}(t) = W \sum_{k=1}^{N_{RB}} \log_2 \left( 1 + \frac{P_i g_{ij}^k(t) b_{ij}^k}{I_{ij}^k(t) + \sigma_\gamma^2} \right), \quad (4.5)$$

де  $b_{ij}^k = 1$  якщо  $k$ -й ресурсний блок використовується  $i$ -м абонентом, і  $b_{ij}^k = 0$  – в протилежному випадку;  $W$  – смуга пропускання яку займає ресурсний блок в

частотній області (180 кГц в стандарті LTE);  $g_{ij}^k$  – характеристика каналу зв'язку між  $i$ -м кінцевим користувачем та  $j$ -ю базовою станцією для  $k$ -го ресурсного блоку;  $I_{ij}^k$  – потужність інтерференційних завад в приймачі абонента для  $k$ -го ресурсного блоку [233,270-279].

Отже, пропускна здатність для кінцевого абонента залежить від характеристик поширення сигналу, інтерференційних завад між комірками та сумарної кількості абонентів. На відміну від більшості моделей, які розраховують пропускну здатність незалежно для кожного абонента, запропонована модель враховує взаємозв'язок між пропускну здатністю абонентів, оскільки сумарна пропускна здатність базової станції рівномірно розподіляється між усіма абонентами. Таким чином, зростання кількості абонентів, під'єднаних до базової станції, призводить до зниження пропускну здатності окремих абонентів. Оскільки звичайні схеми статичного ціноутворення, не можуть врахувати негативний зовнішній ефект варіації абонентського навантаження, у запропонованій моделі використовується динамічна схема ціноутворення, для того щоб досягти компромісу між вартістю та якістю сервісу для кінцевих споживачів [219,233].

#### **4.2.3. Розроблення економічної моделі децентралізованої мультиоператорної мережі мобільного зв'язку**

Розглядаючи систему з точки зору операторів, варто зазначити, що вони взаємодіють за принципом конкуперації (конкурентної співпраці). Така модель полягає у тому, що оператори водночас співпрацюють з точки зору спільного використання радіочастотних ресурсів, а з іншого конкурують за надання сервісу кінцевим абонентам.

Оператор  $M$  є ексклюзивним власником ліцензії на використання радіочастотного ресурсу та інфраструктури макрокомірок. В свою чергу, оператор  $S$  є власником інфраструктури мікрокомірок, проте не має жодної ліцензії на використання радіочастотного ресурсу. Таким чином, оператор  $S$  може обслуговувати абонентів лише за умови оренди радіочастотного ресурсу в

оператора  $M$ . Функціональна схема запропонованої моделі взаємодії представлена на рис. 4.2 [233].

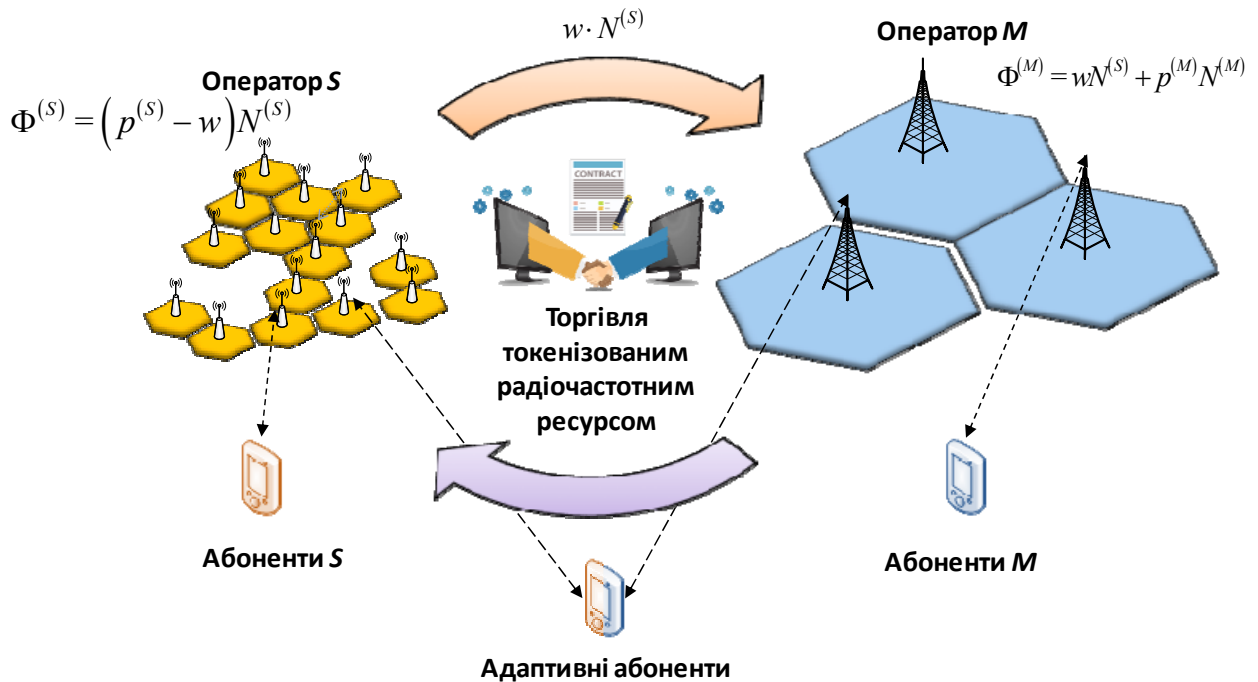


Рис. 4.2. Функціональна схема моделі спільного використання ліцензійних радіочастотних ресурсів в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку.

Позначивши кількість абонентів кожного оператора як  $N^{(M)}$  та  $N^{(S)}$ , функції прибутку кожного оператора можуть бути виведені як [233]:

$$\begin{aligned} \Phi^{(S)} &= (p^{(S)} - w)N^{(S)} \\ \Phi^{(M)} &= wN^{(S)} + p^{(M)}N^{(M)}, \end{aligned} \quad (4.6)$$

де  $w$  – вартість оренди токена  $LRRT$  з розрахунку на одного абонента, яка фіксується регулятором,  $p^{(k)}$  – вартість сервісу оператора, яка визначається з дискретного простору цінових стратегій:

$$\mathcal{A}_R^{(k)} = \{p_0^{(k)}, p_1^{(k)}, \dots, p_{R-1}^{(k)}\}. \quad (4.7)$$

В свою чергу, абоненти підключаються до мережі одного з операторів, використовуючи метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку на основі інтегральної функції корисності [233]:

$$\max_{\forall k} u_i^{(k)} = \left[ \mu^{(q)} (q_i^{(k)} - q_i^{(\min)}) + (1 - \mu^{(q)}) (p_i^{(\max)} - p_i^{(k)}) \right] \Theta(p_i^{(\max)} - p_i^{(k)}) \Theta(q_i^{(k)} - q_i^{(\min)}). \quad (4.8)$$



де  $k \in \{S, M\}$ ,  $q_i^{(k)}$  – пропускна здатність, яку гарантує  $k$ -й оператор,  $i$ -му абоненту,  $q_i^{(\min)}$  – мінімальна пропускна здатність, яка задовольняє  $i$ -го абонента,  $p_i^{(k)}$  – вартість сервісу, яку пропонує  $k$ -й оператор,  $i$ -му абоненту,  $p_i^{(\max)}$  – максимальна вартість сервісу, яка задовольняє  $i$ -го абонента.

Таким чином, абоненти формують попит на ринку мобільного зв'язку, у той час як пропозиція представлена двома операторами із незалежними політиками ціноутворення.

Для синтезу ігрової моделі в нормальній формі, простір стратегій операторів пов'язується з відповідними їм виграшами [233]:

$$\left[ \underbrace{\{\mathcal{S}, \mathcal{M}\}}_{\text{оператори}} \rightarrow \underbrace{\{p^S, p^M\}}_{\text{цінові стратегії}} \in \mathcal{A}_R^S \times \mathcal{A}_R^M; \underbrace{\Phi^S : \mathcal{A}_R^S \times \mathcal{A}_R^M \rightarrow \mathbb{R}^+; \Phi^M : \mathcal{A}_R^S \times \mathcal{A}_R^M \rightarrow \mathbb{R}^+}_{\text{виграші}} \right] \quad (4.9)$$

Одним із головних аспектів в модельованій грі є формування динаміки утворення цін та їх стабілізація. Припустимо, що статистично при великій кількості абонентів, розподіл запитів сервісу коливається в незначній мірі, і здебільшого стаціонарним. Це одна з важливих причин вважати, що вартість послуги, яка є функцією від попиту, теж може коливатися в деякому діапазоні до тих пір, поки не буде досягнуто балансу між попитом абонентів та пропозицією операторів [233]. З іншого боку, доцільно припустити, що наявність екзогенної динаміки кінцевих абонентів, є важливим фактором для розроблення адаптивних стратегій ціноутворення, які повинні бути самооптимізованими для досягнення рівноваги в стохастичній ігровій моделі. Метою запропонованої моделі є формалізація взаємодії між оператором макрокомірок та оператором мікрокомірок, де кожен оператор визначає ціну сервісу із наявної множини доступних ігрових стратегій. Для досягнення повної або часткової раціональності операторів, ми розглядаємо процес самонавчання операторів незалежно один від одного. Дане припущення означає, що після кожного раунду гри, оператори не отримують інформацію про дії (тобто фактичні ціни сервісу), обрані їх опонентами [233].

Для формалізації процесу динамічного ціноутворення, введемо вектор ймовірностей вибору ціни оператором  $k \in \{S, M\}$  із загальної множини стратегій:

$$\boldsymbol{\pi}^{(k)} = \left[ \pi_i^{(k)} \right]_{i=0}^{R-1} \quad (4.10)$$

В процесі еволюції, вектор ймовірностей модифікується за критерієм максимізації прибутку оператора на основі знаходження еволюційно-стабільної рівноваги. Ітераційний процес гри описаний нижче [233].

**Етап 1. Формування початкових умов.** Початково, вектор  $\boldsymbol{\pi}^{(k)}$  встановлюється рівним  $[1/R, 1/R, \dots, 1/R]$ , що відображає однакові значення ймовірностей вибору кожної стратегії.

**Етап 2. Дії операторів.** Оператор  $k \in \{S, M\}$  випадково вибирає вартість сервісу з множини  $p^{(k)} \in \{0, 1, \dots, R-1\}$  на основі вектора ймовірностей  $\boldsymbol{\pi}^{(k)}$ .

**Етап 3. Розподіл виграшів.** Кінцеві абоненти приймають рішення про підключення до одного з операторів на основі інтегральної функції корисності (6), фіксуючи таким чином вартість послуг  $l$ . Рішення кінцевих абонентів безпосередньо впливають на розподіл виграшів між операторами:

$$\Phi_l^{(k)} = f(p^{(k)}), l = p^{(k)}, p^{(k)} \in \{p^{(M)}, p^{(S)}\}, p^{(S)} \in \{0, 1, \dots, R-1\}, p^{(M)} \in \{0, 1, \dots, R-1\} \quad (4.11)$$

**Етап 4. Самонавчання.** Виграш оператора масштабується в інтервалі  $(0, 1)$ :

$$\Phi_l^{(k)} \leftarrow \left( \Phi_l^{(k)} - \min_{\forall j \neq l} \Phi_j^{(k)} \right) / \left( \max_{\forall j \neq l} \Phi_j^{(k)} - \min_{\forall j \neq l} \Phi_j^{(k)} \right). \quad (4.12)$$

Оператор  $k \in \{S, M\}$  оновлює відповідні компоненти вектора ймовірностей  $\boldsymbol{\pi}^{(k)}$ , на основі параметру навчання  $\eta \in (0, 1)$ :

$$\begin{aligned} \pi_j^{(k)} &\leftarrow \pi_j^{(k)} - \eta \pi_j^{(k)} \Phi_l^{(k)}, \quad j \neq l, \\ \pi_l^{(k)} &\leftarrow \pi_l^{(k)} + \eta \left( \sum_{z \neq l} \pi_z^{(k)} \right) \Phi_l^{(k)}, \end{aligned} \quad (4.13)$$

Етапи 2, 3, і 4 повторно виконуються до досягнення критерію еволюційно-стабільної рівноваги. При цьому, асимптотична складність алгоритму рівна  $\mathcal{O}(R)$ .

Розглядаючи концепцію еволюційної стабільності важливо провести експериментальні дослідження конвергенції цінових стратегій операторів до стану рівноваги. Результати двох різних експериментів представлені на рис. 4.3., для демонстрації процесу досягнення рівноваги після різноманітних стохастичних збурень. Загалом, при 100 проведених експериментах, з яких лише 2 представлені на рис. 4.2, оператори досягають приблизно однакових рівноважних значень вартості сервісу [233].

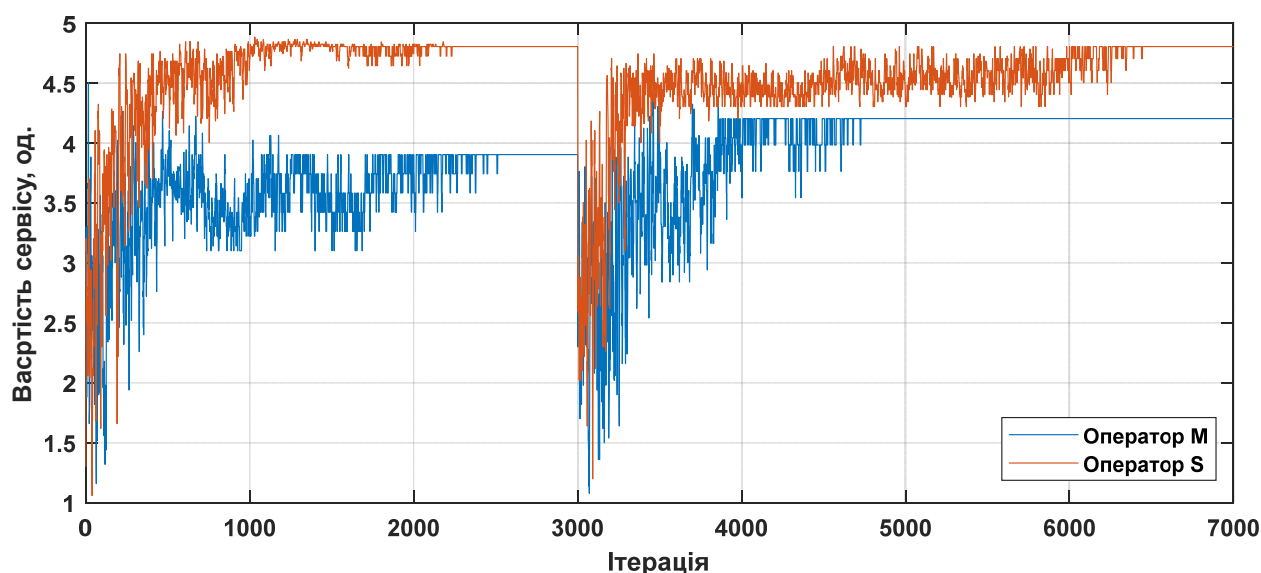


Рис. 4.3. Динаміка стратегій ціноутворення операторів до досягнення еволюційно стабільної рівноваги.

Загальний висновок полягає в тому, що рівноважна ціна оператора мікрокомірок вища, що відповідає теоретичним очікуванням. Проте, очевидно, що отримані результати отримані виключно при використанні алгоритму еволюційно стабільної рівноваги в контексті економічних показників ефективності операторів. Тому, важливо також провести дослідження техніко-економічної ефективності мережі мобільного зв'язку враховуючи динаміку абонентів та реалістичні параметри міського середовища [233].

### 4.3. Дослідження техніко-економічної ефективності децентралізованої мережі мобільного зв'язку при спільному використанні ліцензійного радіочастотного ресурсу

#### 4.3.1. Параметри та характеристики процесу моделювання

Процес моделювання здійснюється у 4 етапи [219,233].

**Етап запиту сервісу.** Абонент  $i$  надсилає запит на з'єднання через канал випадкового доступу (RACH – Random Access Channel), повідомляючи про значення рівня RSRP від кожної комірки. З практичної точки зору, дана фаза повністю відповідає специфікації стандартів 3GPP. Зокрема, усі запити надсилаються до вузла управління мобільністю MME (Mobility Management Entity), який відповідає контролює переміщення абонентів та призначає їм відповідні носії EPS (Evolved Packet System), які визначають подальшу політику обслуговування абонентів.

**Етап формування пропозицій SLA.** Оператори макро та мікрокомірок аналізують усі запити абонентів, визначають наявні можливості стосовно обслуговування необхідних абонентів, враховуючи доступний радіочастотний ресурс та значення RSRP для кожного абонента. Відповідно до даних значень, оператори визначають SLA (Service Level Agreement) для  $i$ -го UE, яка складається з пропускної здатності та вартості сервісу  $\langle q_i^S, p_i^S \rangle$ , і  $\langle q_i^M, p_i^M \rangle$  для оператора мікрокомірок та макрокомірок відповідно. З точки зору практичної реалізації, інтеграція вартості та пропускної здатності в одній пропозиції потребує узгодженої взаємодії MME та білінгової системи LTE, ще до призначення EPS носіїв із заданими параметрами якості обслуговування.

**Етап з'єднання.** Для оцінки ефективності запропонованих рішень моделювання мультиоператорної мережі мобільного зв'язку проводиться з динамічним розподілом радіочастотного ресурсу в залежності від вибору оператора абонентом, або із статичним розподілом радіочастотного ресурсу порівню між операторами. В залежності від моделі обслуговування:

**Адаптивна:** Абонент  $i$  розраховує значення функції корисності  $u_i^k$  та визначає чи задовольняється мінімальна вимога обслуговування. Серед усіх

пропозицій операторів, які задовільняють мінімальну умову обслуговування, абонент  $i$  вибере пропозицію оператора з найвищим значенням функції корисності (4.8). Якщо, жодна з умов не буде задовольняти мінімальні вимоги, абонент  $i$  залишиться в режимі очікування. Дану модель можна легко реалізувати на основі звичайної процедури роумінгу між різними операторами, яка визначена в існуючих стандартах LTE. Єдина відмінність полягає в тому, що в запропонованому методі абонент фактично впливатиме на розподіл радіочастотного між операторами, тоді як при звичайному роумінгу радіочастотні ресурси різних операторів зазвичай відокремлені на основі індивідуальних ліцензій.

*Статична:* Абонент  $i$  підключається до мережі свого оператора без можливості його зміни. Таким чином, в даній моделі немає жодної динаміки і вона повністю відповідає існуючим мережам стандартів LTE та 5G.

**Етап планування ресурсів та обслуговування.** Оператори  $S$  та  $M$  здійснюють планування ресурсних блоків для обслуговуваних абонентів. З практичної точки зору, для всіх створених EPS носіїв, створюються відповідні радіоносії, які повинні забезпечити пропускну здатність відповідно до угоди SLA. Після цього, базова станція здійснює планування ресурсів для кожного абонента у відповідності до специфікацій 3GPP [84,85].

Враховуючи, що метою запропонованої моделі є максимізація ефективності використання радіочастотних ресурсів між операторами, при моделюванні встановлено спрощений критерій якості послуг, який визначається лише пропускну здатністю. Використання даного критерію є обґрунтованим, оскільки такі показники якості як затримка, джиттер, втрати пакетів та інші похідні характеристики переважно визначаються на вищих рівнях моделі OSI, і великою мірою залежать від пропускну здатності. Для моделювання переміщення абонентів використано методи моделювання мобільності на основі GAN [262] та оптимізовану топологічну структуру мережі для міського середовища з урахуванням забудови [258], які були представлені у третьому розділі роботи.

Незважаючи на те, що запропоновану модель можна практично реалізувати без значних змін в існуючій інфраструктурі мережі мобільного зв'язку, є кілька важливих аспектів, які слід враховувати. Загальна процедура обслуговування абонентів та розподілу ресурсів повинна враховувати пріоритет абонента, пріоритет послуги, конфігурацію хендоверу, апаратні можливості UE та багато інших технічних обмежень для належного планування ресурсів серед багатьох абонентів [219]. Проте, при експериментальному дослідженні запропонованої моделі приймається ряд спрощень. Зокрема, використовується планувальник ресурсів з рівномірним розподілом та однаковим пріоритетом абонентів, а також один вид сервісу з гарантованою пропускною здатністю. Таке спрощення потрібне для більш точної оцінки економічних параметрів мережі мобільного зв'язку, такі як вартість послуг та прибуток операторів, без впливу випадкових факторів пріоритезації та просторового розташування абонента відносно базових станцій [233].

Для експериментального моделювання розроблено імітаційну модель мультиоператорної мережі мобільного зв'язку з дворівневим покриттям (макрокомірки та мікрокомірки). Розроблена модель враховує технічні та економічні аспекти функціонування мережі мобільного зв'язку. Сценарій моделювання включає реалістичну модель території з міською забудовою та реальним розташуванням макрокомірок на основі даних OpenCellID, яка є найбільшою у світі відкритою базою даних базових станцій мереж мобільного зв'язку [233]. Зокрема дана база містить інформацію про географічне розташування та висоту встановлення базових станцій, а також підтримувані стандарти та радіус їх дії. Переміщення абонентів моделюється за допомогою програмного забезпечення, розробленого на мові Python з використанням бібліотеки OSMnx, геоінформаційної системи OpenStreetMap та нейронних мереж GAN [258,262]. За рахунок використання програмно-апаратної архітектури паралельних обчислень на основі графічних процесорів CUDA, розроблена модель дає змогу одночасно генерувати велику кількість унікальних траєкторій переміщення абонентів, що дає змогу моделювати розгортання та

функціонування мережі мобільного зв'язку в будь-якій точці світу [233,258,262].

Проте, варто зазначити, що на сьогоднішній час немає відкритих баз даних із повною інформацією про розташування мікро, піко та фемтокомірок. Враховуючи потенційну густину таких комірок в районах із щільною забудовою, а також можливість їх встановлення не лише операторами, але і іншими приватними компаніями, такими як торгові центри чи ресторани, формування такої бази даних є доволі складним завданням. Крім того, на відміну від процесу проектування покриття макрокомірок, який має на меті забезпечити повсюдний доступ абонентів, покриття мікрокомірок планується у вигляді кластерів із високою густиною абонентів з метою забезпечити високі вимоги до пропускної здатності та розвантажити інфраструктуру макрокомірок.

Тому, враховуючи стохастичність процесу переміщення абонентів, в даній моделі використовується інтелектуальний метод синтезу топологічної структури на основі самоорганізованих карт Кохонена [257,258]. Як вже згадувалось у попередньому розділі, даний метод дає змогу стохастично оптимізувати топологічну структуру мікрокомірок для довільної зони покриття та моделі мобільності кінцевих абонентів. Досліджувані топологічні структури забезпечують реалістичну модель мережі мобільного зв'язку з точки зору відстаней абонентів до базових станцій та ймовірності обслуговування із заданим співвідношенням SINR [258]. На рис. 4.4 представлено розглянуте середовище моделювання для частини міста Кошице (Словаччина).

Процес моделювання здійснюється лише для низхідного каналу зв'язку, оскільки в запропонованій моделі приймається режим часового дуплексу та симетрична характеристика каналу зв'язку [233]. Вартість оренди одного ресурсного блоку  $w$  є фіксованою та нормується в діапазоні від 0 до 1. Для моделювання встановлюється вартість  $w = 0.5$  для того, щоб гарантувати позитивний дохід для кожного оператора. Торгівля токенами радіочастотного ресурсу між операторами проходить в режимі реального часу, паралельно з процесом обслуговуванням абонентів [219,233,236]. При цьому, кожен

оператор прагне залучити якомога більше абонентів для збільшення свого прибутку, використовуючи свої переваги. Оператор мікрокомірок, як правило забезпечує значно вищу пропускну здатність за рахунок кращої якості радіоканалу та вищої системної спектральної ефективності. З іншого боку, оператор макрокомірок дає змогу забезпечити більш стабільний зв'язок для абонентів з високою мобільністю, наприклад тих, які знаходяться в транспортних засобах [233]. Для більш адекватних результатів моделювання мережі з точки зору конкуренції операторів, приймається, що усі абоненти зберігають нульовий баланс між якістю та вартістю послуги, тобто  $\mu = 0.5$  у виразі (4.8). При тому, абоненти можуть використовувати одну з двох моделей обслуговування: адаптивну або статичну [233].

Для статичної моделі приймається, що абоненти рівномірно розділені між операторами. Крім того, встановлено припущення, що 25% усіх абонентів знаходиться у транспортних засобах, які переміщуються з швидкістю 30 км/год.

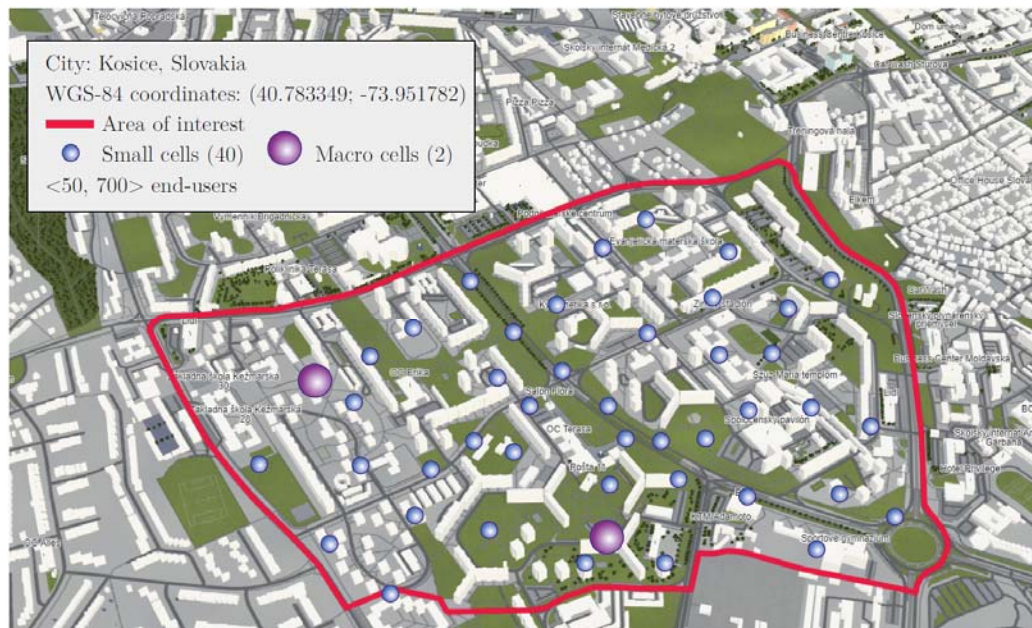


Рис. 4.4 Приклад середовища моделювання з використанням бібліотеки OpenStreetMaps.

Для моделювання радіоканалів обрано специфікацію 3GPP з відповідними параметрами базових станцій макро та мікрокомірок [84,85]. Приймається, що оператор макрокомірок має ліцензію на використання смуги радіочастотних ресурсів шириною 20 МГц в діапазоні 1.8 ГГц, що відповідає 100 ресурсним



блокам LTE в частотній області. Дані значення обрано виходячи з реального розподілу радіочастотного ресурсу в Україні. У свою чергу, оператор мікрокомірок має змогу використовувати лише ту частину радіочастотних ресурсів, які він орендує у оператора макрокомірок [233].

#### **4.3.2. Експериментальні дослідження та аналіз техніко-економічної ефективності децентралізованих мереж мобільного зв'язку**

Для забезпечення адекватності та статистичної коректності розробленої моделі, в процесі моделювання проводиться розрахунок середніх значень обчислювальних параметрів, щоб усунути похибку, пов'язану із динамікою системи. Для цього, здійснюється 1000 ітерацій вимірювання одного параметра, на основі яких обчислюється єдине середнє значення. Експериментальні моделювання проводяться для різної кількості абонентів, для того щоб визначити, як вона впливає на технічну та економічну ефективність мережі як для операторів, так і для самих абонентів [233].

Для початку розглянемо критерій пропускної здатності, оскільки це найважливіший параметр функціонування мережі мобільного зв'язку на фізичному рівні моделі OSI (рис. 4.5,а). При моделюванні було розраховано середнє значення пропускної здатності на одного абонента шляхом усереднення 1000 окремих експериментів:

$$\bar{q} = \frac{1}{N} \sum_{t_{step}=1}^{T_{steps}} \sum_{i=1}^N q_i(t_{step}). \quad (4.14)$$

Порівнюючи різні моделі обслуговування, спостерігаємо, що адаптивна модель забезпечує найбільшу пропускну здатність для невеликої кількості абонентів, у той час як статична працює ефективніше для великої кількості абонентів. Таким чином, процес аналізу результатів доцільно розглядати для двох випадків: для незавантаженої мережі та для завантаженої мережі. У випадку незавантаженої мережі оператор мікрокомірок може запропонувати кращу пропускну здатність за нижчу ціну (рис. 4.5,а), що призводить до зростання відсоткової частки абонентів, які отримують високу пропуску

здатність [233]. На відміну від адаптивної моделі, статична модель не дозволяє абонентам змінювати оператора в режимі реального часу, тому половина з них змушені обслуговуватись оператором макрокомірок з нижчою пропускною здатністю. Тому, середнє значення пропускної здатності у випадку незавантаженої мережі є вищим для адаптивної моделі обслуговування.

Проте, ситуація істотно змінюється при зростанні навантаження на мережну інфраструктуру. Зокрема, краще співвідношення ціна/якість у оператора мікрокомірок призводить до зростання кількості абонентів, яких він повинен обслуговувати. В такому випадку, оператор мікрокомірок миттєво стає перевантаженим, що змушує його знижувати пропускну здатність для абонентів, з метою зниження кількості відмов в обслуговуванні [233].

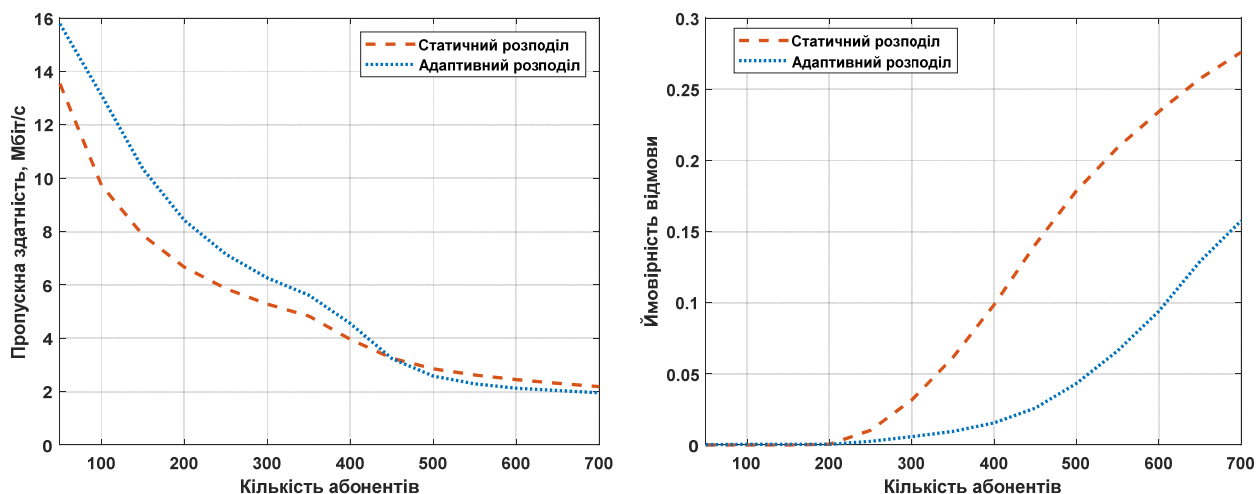


Рис. 4.5. Результати моделювання запропонованої моделі спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу з точки зору пропускної здатності абонента – а) та ймовірності відмови – б).

В статичній моделі, ефект перевантаження знижується, оскільки кількість абонентів рівномірно розділена між операторами і не змінюється. Тому, не зважаючи на те, що оператор макрокомірок є повністю перевантажений для обох моделей обслуговування, середнє значення пропускної здатності одного абонента стає трохи вищим для статичної моделі, у порівнянні із адаптивною.

Іншим важливим фактором, крім пропускної здатності, є доступність послуги. Цей параметр гарантує, що кінцеві абоненти отримуватимуть послугу

з очікуваною пропускнуою здатністю, незалежно від їхнього місця розташування в межах покриття мережі. Для оцінки доступності послуги ми оцінюємо ймовірність відмови в обслуговуванні (рис. 4.5,б). Даний параметр позначає ймовірність того, що оператор не зможе задовольнити запит кінцевого абонента в певний час, у зв'язку із перевантаженням мережі [233]:

$$P_{Out} = \frac{1}{T_{steps} N} \times \sum_{t_{step}=1}^{T_{steps}} \sum_{i=1}^N \tilde{\delta}_{thr} [q_i(t_{step}), q_{min}]. \quad (4.15)$$

Враховуючи особливості функціонування радіоінтерфейсу LTE, навіть при дуже високому навантаженні у комірці, оператори мають змогу зберегти обслуговування абонентів з дуже низькою пропускнуою здатністю. Тому, для уникнення оманливих результатів, у формулі (4.15) встановлюється порогове значення пропускнуої здатності на рівні 300 кбіт/с, щоб не вважати абонентів з майже нульовою пропускнуою здатністю такими, яким забезпечується допустимий рівень сервісу [233]:

$$\tilde{\delta}_{thr} [q, q_{min}] \equiv \begin{cases} 1, & \text{якщо } q < q_{min} \\ 0, & \text{якщо } q \geq q_{min} \end{cases} \quad (4.16)$$

Аналогічно до рис. 4.5,а, спостерігається чітка зміна поведінки системи із збільшенням кількості абонентів. Для 250 кінцевих абонентів ймовірність відмови майже дорівнює нулю через значний надлишок радіочастотного ресурсу. При зростанні кількості абонентів, ймовірність відмови починає зростати частіше. Порівнюючи різні моделі обслуговування, можна спостерігати, що статична є менш надійною, оскільки абоненти мають лише один можливий вибір оператора. У цьому випадку адаптивна модель працює краще, оскільки вона може використовувати підключення обох операторів. Однак різниця не є суттєвою з точки зору всіх абонентів. Найбільша зафіксована різниця між адаптивною та статичною моделями становить приблизно 15%, тоді як майже 80% абонентів отримали прийнятну пропускну здатність [233].

Також слід зазначити, що абоненти, які отримали відмову в обслуговуванні, все одно враховуються при розрахунках середньої пропускнуої

здатності у виразі (4.14) як абоненти з нульовим значенням. Це важливо для того, щоб уникнути ефекту при якому середнє значення пропускної здатності буде високим в умовах великої кількості відмов, за рахунок того, що сумарна пропускна здатність комірки буде розділена між меншою кількістю абонентів. Проте, кількість таких абонентів досить низька, так що вони не суттєво вплинули на результати пропускної здатності [233].

Незважаючи на те, що статична модель вносить більше «нулів» у середнє значення пропускної здатності, вона також забезпечує багатьом абонентам мікрокомірок достатньо високу пропускну здатність. З іншого боку, адаптивна модель зменшує кількість «нулів», але забезпечує набагато більше мінімальних порогових значень, з пропускну здатністю  $\sim 300$  кбіт/с, через перевантаження мікрокомірок.

Таким чином, результати експериментального дослідження ефективності функціонування мультиоператорної мережі мобільного зв'язку показали, що запропонована техніко-економічна модель торгівлі радіочастотним ресурсом дає змогу знизити кількість відмов в обслуговуванні до 14% (рис. 4.5,а), і забезпечує при цьому до 30% вищу середню пропускну здатність для абонентів (рис. 4.5,б) [233].

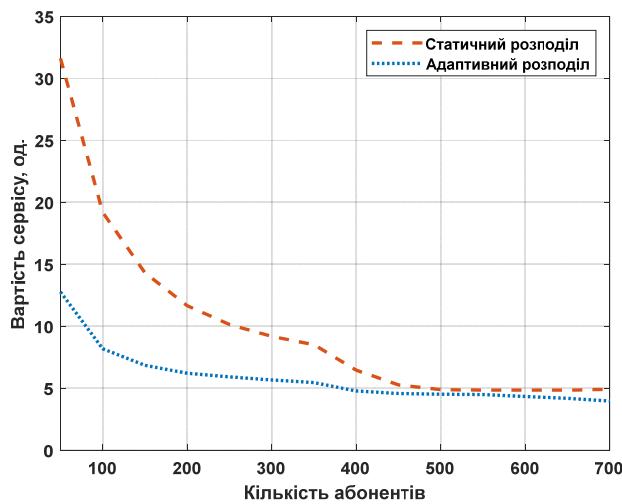
Окрім технічних показників ефективності функціонування децентралізованої мережі мобільного зв'язку, важливо розглянути показники економічної ефективності досліджуваних моделей, такі як вартість сервісу для абонента та прибутки операторів.

Розглянемо динаміку зміни вартості сервісу при різній кількості абонентів (рис. 4.6) , яка змінюється у відповідності до виразів (4.13). Вартість сервісу усереднюється операторами в процесі конкурентного співіснування відповідно до результатів попередніх стратегій. Механізм ціноутворення можна пояснити синергією між зниженням вартості послуг та зростаючим попитом абонентів. Для кращого розуміння ринкових тенденцій, вартість сервісу окремао проаналізована для оператора макрокомірок (рис. 4.6,а) та оператора мікрокомірок (рис. 4.6,б) [233].

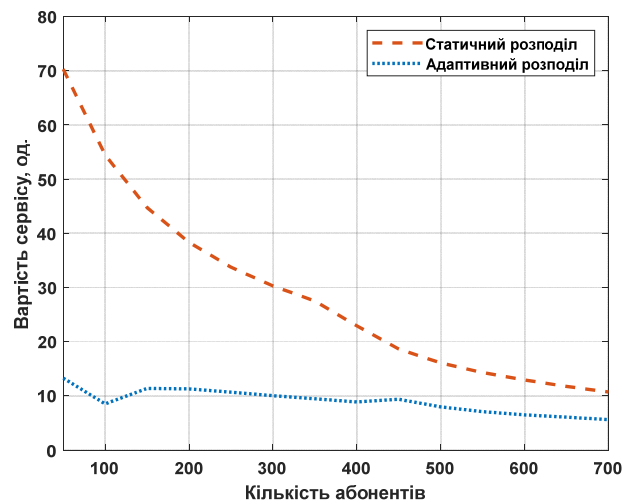
Враховуючи можливість зміни оператора, вартість сервісу для абонентів є нижчою при використанні адаптивної моделі. Це відповідає основним ринковим правилам, оскільки конкуренція зазвичай супроводжується зниженням вартості сервісу. Дана закономірність справедлива для обох операторів, що спостерігається із рис. 4.6 [233].

Порівнюючи вартість сервісу між операторами, можна впевнено стверджувати, що оператор мікрокомірок в результаті еволюції свої ринкових стратегій встановлює вищу вартість сервісу, ніж оператор макрокомірок, що можна пояснити фундаментальними відмінностями між ними. Зазвичай, оператор мікрокомірок має змогу забезпечити вищий коефіцієнт повторного використання частот та гарантувати вищу швидкість передавання даних для абонентів, ніж оператор макрокомірок (рис. 4.6,б). Враховуючи особливості функції корисності абонента (4.18), абоненти надають перевагу сервісу оператора мікрокомірок з вищою вартістю, за умови, що пропускна здатність буде пропорційно вищою [233]. Крім того, оператор мікрокомірок закладає вартість сервісу для абонента з розрахунку на вартість оренди радіочастотного ресурсу у оператора макрокомірок. Відповідно, у оператора макрокомірок залишається протилежна стратегія демпінгування вартості сервісу для абонентів з метою компенсації нижчої пропускної здатності (рис. 4.6,а). Крім того, стратегія оператора макрокомірок враховує додатковий дохід від надання радіочастотного ресурсу в оренду оператору мікрокомірок [233].

Порівняльний аналіз з точки зору економічної ефективності показав, що запропонована ігрова модель забезпечує в середньому в 2 рази нижчу вартість сервісу для абонентів (рис. 4.6). Нормуючи показники вартості та якості сервісу для абонентів на основі функції корисності (4.8), можна зробити висновок, що використання запропонованої моделі дає змогу знизити вартість послуг для абонентів, при збереженні якості, або підвищити якість послуг, при збереженні їх вартості [233].



а)



б)

Рис. 4.6. Результати моделювання запропонованої моделі спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу з точки зору вартості сервісу оператора макрокомірок – а) та оператора мікрокомірок – б).

Іншим важливим критерієм економічної ефективності є показник прибутку операторів, який визначається виразами (4.6). Аналізуючи результати на рис. 4.7,а, ми спостерігаємо, що прибуток оператора макрокомірок незначно зменшується із прийняттям моделі адаптивного обслуговування, і забезпечує схожі результати із моделлю статичного обслуговування [233]. З іншого боку, результати для оператора мікрокомірок відрізняються більш суттєво (рис. 4.7,б). При невеликій кількості абонентів, адаптивна модель призводить до того, що оператор мікрокомірок не має змоги навіть компенсувати витрати на оренду радіочастотного ресурсу, у той час як при статичній моделі оператор має достатню кількість абонентів для забезпечення додатнього прибутку. При зростанні кількості абонентів, прибуток оператора мікрокомірок з адаптивною моделлю еволюційно нормалізуються та поступово наближається до прибутку зі статичною моделлю [233]. Проте, за рахунок відсутності механізму динамічного демпінгування вартості послуг, при статичній моделі оператори отримують вищий прибуток, ніж при адаптивній моделі. З іншого боку, такий ефект можна обґрунтувати тим, що розглянутий сценарій передбачає наявність постійного попиту абонентів при статичній моделі, що є ідеалізованим

варіантом з точки зору прибутку операторів. На практиці, часто виникає ситуація коли кількість абонентів, які потребують сервісу є нижчою від поточних можливостей операторів, що призводить до зниження ефективності використання радіочастотного ресурсу і, як наслідок, зниження прибутків оператора при статичній моделі. Натомість, адаптивна модель в такому варіанті забезпечує вищий прибуток операторів, як показано на рис. 2.14,б, у другому розділі дисертаційної роботи [219,233].

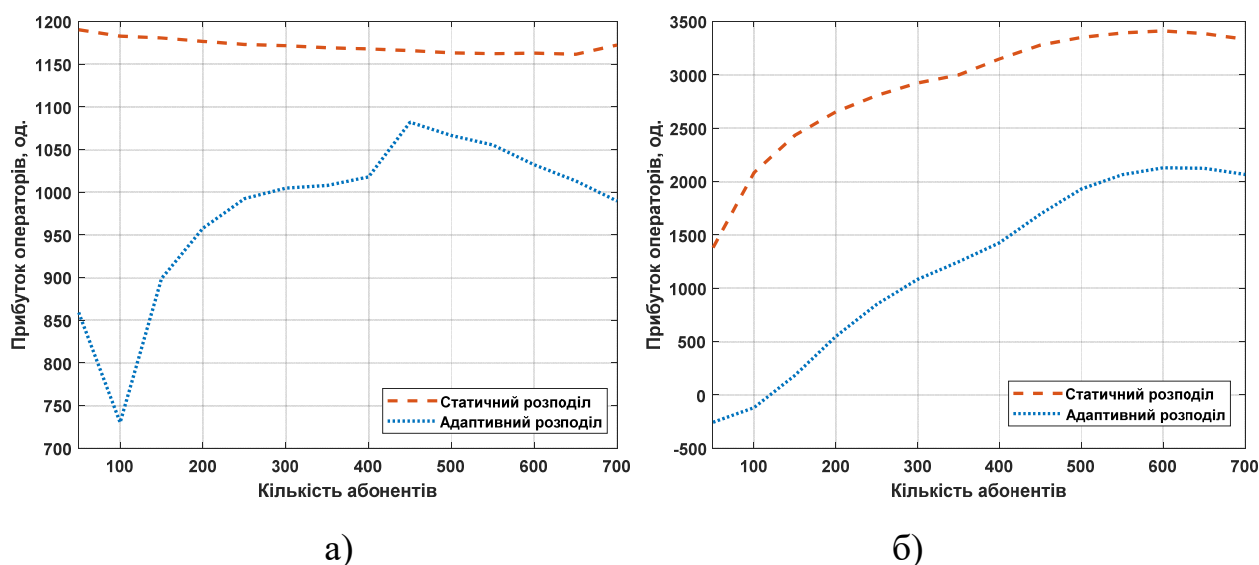


Рис. 4.7. Результати моделювання запропонованої моделі спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу з точки зору прибутку оператора макрокомірок – а) та оператора мікрокомірок – б).

Аналізуючи результати прибутків оператора в даному контексті, важливо зазначити, що в реальному житті, оператор не обов’язково повинен знижувати вартість сервісу. Альтернативним варіантом, який очікувано буде більш поширено використовуватись операторами, є підвищення якості надання сервісів, для того щоб обґрунтовано встановлювати вищу їх вартість для абонентів. Тому, для більш повного аналізу техніко-економічної ефективності, проведено порівняння відношення пропускної здатності, яка забезпечується для абонентів, до відповідної вартості сервісу (рис. 4.8). Отримані результати повністю відображають перевагу адаптивної моделі з точки функції корисності абонента у мережі будь-якого оператора [233].

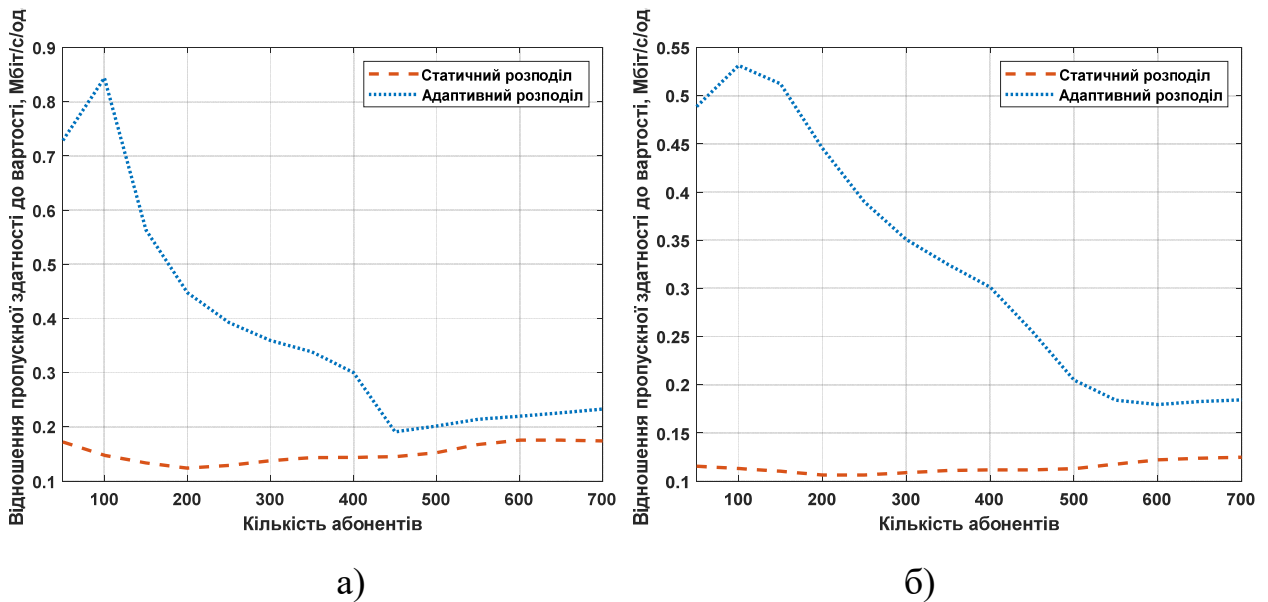


Рис. 4.8. Результати моделювання запропонованої моделі спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу з точки зору вартості сервісу оператора макрокомірок – а) та оператора мікрокомірок – б).

Отже, на підставі проведеного дослідження можна зробити висновок, що запропонована техніко-економічна модель спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу операторами у децентралізованій мережі мобільного зв'язку дає змогу підвищити основні технічні показники ефективності для операторів та абонентів, забезпечити підвищення сумарної економічної ефективності функціонування мережі для абонентів та забезпечити додатну прибутковість операторів в умовах жорсткої конкуренції між ними .

Для більш повного дослідження, у наступному підрозділі розглянуто моделі адаптивного спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу, які мають значний потенціал з точки зору підвищення сумарної пропускної здатності мережі мобільного зв'язку. Особливістю проблеми спільного використання радіочастотного ресурсу в неліцензійному діапазоні є необхідність уникнення інтерференційних завад з іншими технологіями радіодоступу, які вже функціонують у даному частотному діапазоні, і не підлягають регулюванню, оскільки будь-хто може придбати та встановити Wi-Fi маршрутизатор або точку доступу, за умови не перевищення допустимої потужності випромінювання.



#### **4.4. Моделі та алгоритми спільного використання радіочастотних ресурсів неліцензійного діапазону в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку**

##### **4.4.1. Проблематика використання радіочастотного ресурсу неліцензійного діапазону для мереж мобільного зв'язку**

При формуванні основних цілей стандартів мереж мобільного зв'язку покоління 5G Міжнародний союз електрозв'язку (ITU) окреслив ключові цілі перед консорціумом 3GPP постало складне завдання суттєвого підвищення сумарної пропускної здатності мереж мобільного зв'язку в умовах обмеженого радіочастотного ресурсу. Враховуючи надзвичайно малий обсяг доступних ресурсів у діапазоні до 6 ГГц, 3GPP запропонували концепцію використання частот міліметрового діапазону на початку процесу стандартизації мереж 5G.

Незважаючи на те, що міліметровий діапазон (приблизно 28 ГГц) забезпечує до 10 разів вищі швидкості передавання у порівнянні з існуючими діапазонами нижче 6 ГГц, багато провідних вчених та інженерів досі вагаються чи є даний діапазон економічно обґрунтованим, враховуючи труднощі в реалізації та вартість кінцевих пристроїв. Тому, початкові розгортання мереж 5G у діапазоні міліметрових зосереджені переважно на двох сценаріях: в межах приміщень та для фіксованих каналів зв'язку.

Тому, 3GPP продовжує пошук альтернатив для розширення радіочастотного ресурсу у мережах 5G. Зокрема, наразі активно ведуться дослідження неліцензійного радіочастотного ресурсу в рамках стандартів 3GPP Release 16 NR-U (New Radio–Unlicensed) та 3GPP Release 13 LTE-U (LTE–Unlicensed). Існуючі методи такі як LAA (Licensed Assisted Access) довели, що мережі LTE та Wi-Fi можуть співіснувати в неліцензійному діапазоні [36-48].

Крім того, нещодавно регулятори почали розглядати використання діапазону 6 ГГц, який охоплює 5.925–7.125 ГГц, у якості неліцензійного з можливим використанням для покриття 5G. Таким чином, оператори мереж LTE та 5G зможуть використовувати поєднання діапазонів 2.4 ГГц, 5 ГГц та в

перспективі 6 ГГц, що потенційно додає понад 1 ГГц радіочастотного ресурсу до існуючих радіочастотних резервів мереж мобільного зв'язку.

Проте, будь-який пристрій у мережах мобільного зв'язку, що використовує неліцензійний радіочастотний ресурс, повинен дотримуватися ряду рекомендацій [36-48]:

1. Обмеження потужності передавання для локалізації поширення сигналу та уникнення внутрішньо-смугових інтерференційних завад.
2. Спільне використання радіочастотного ресурсу з існуючими технологіями та пристроями в неліцензійному діапазоні.
3. Підтримка технологій динамічного вибору частоти (DFS) та управління потужністю передавання (TPC) для полегшення співіснування, аналогічно до існуючих стандартів Wi-Fi.
4. Підтримка технологій співіснування мереж LTE та Wi-Fi, таких як Listen Before Talk (LBT).

У регіонах де неліцензійний радіочастотний ресурс не використовується активно пристроями Wi-Fi, можна розгортати локальні мережі 5G NR-U, використовуючи усі переваги мереж 5G, такі як висока пропускна здатність, висока надійність та низька затримка. Зокрема, такий підхід є перспективним для приватних корпоративних та індустріальних мереж, які можуть будувати свої бізнес-процеси з використанням технологій 5G NR-U, за умови забезпечення рознесення частот між 5G та Wi-Fi [36-48].

Незважаючи на додаткові труднощі в реалізації NR-U/LTE-U, дані технології забезпечують значний додатковий обсяг радіочастотного ресурсу, який є ключовим для реалізації потенціалу мереж мобільного зв'язку 4G-6G. Крім того, при наявності ефективних механізмів співіснування мереж мобільного зв'язку з існуючими технологіями радіодоступу в неліцензійному частотному діапазоні до 6 ГГц, даний досвід можна перенести на інші частотні діапазони. Зокрема в міліметровому діапазоні 60 ГГц, додатково можна використати смугу неліцензійного радіочастотного ресурсу шириною 14 ГГц, за умови відповідного прогресу в апаратному забезпеченні [45,46].

#### **4.4.2. Розроблення алгоритму координованого прослуховування частотних каналів у неліцензійному діапазоні**

Розв'язок проблеми використання неліцензійного радіочастотного ресурсу великою кількістю операторів мобільного зв'язку в контексті децентралізованої мережі мобільного зв'язку є складним завданням, яке потребує нових підходів до управління радіочастотним ресурсом [5]. Незважаючи на те, що у другому розділі запропоновано модель токенизації неліцензійного частотного діапазону, його використання операторами має ряд особливостей. Зокрема, на відміну від токенів LRRT, які надають операторам ексклюзивне право на використання радіочастотного ресурсу, токени URRT забезпечують лише право використання серед операторів мобільного зв'язку. Це означає, що будь-які інші технології радіозв'язку, такі як Wi-Fi або LoRaWAN, продовжують функціонувати в даному діапазоні, що може призвести до зростання рівня інтерференційних завад та зниження ефективності для усіх пристроїв, які здійснюють передавання сигналу [26-48].

Враховуючи фундаментальні відмінності між методами множинного доступу у технологіях стандартів 3GPP та IEEE 802.11, важливо знайти точки перетину, які б дали змогу даним мережам співіснувати між собою в межах неліцензійного радіочастотного діапазону. Для цього, є ряд технічних рішень, які дають змогу пристроям LTE/5G, адаптуватись до умов середовища з випадковим доступом [5,36-48].

Розглянемо принцип передавання даних у мережах Wi-Fi, який представлено на рис. 4.9. Після завершення передавання блоку даних (т.1), пристрій очікує на пакет підтвердження успішного передавання АСК протягом міжкадрового інтервалу SIFS (Short Inter-Frame Spacing), який залежить від часу передавання даних у радіоканалі та часу обробки даних на приймальній стороні. В залежності від використовуваного стандарту даний інтервал може становити від 3 до 160 мкс. Відсутність АСК означає виникнення колізії та необхідність повторного передавання блоку даних. Після отримання підтвердження АСК (т.2,3), пристрій починає процедуру відліку перед

передаванням наступного блоку даних (т. 4). У випадку, якщо ініціатором є точка доступу, яка працює в режимі PCF (Point Coordination Function), процедура відліку починається через інтервал PIFS (PCF Inter-Frame Spacing). Якщо передавання здійснюється зі сторони абонентського пристрою в режимі DCF (Distributed Coordination Function), процедура відліку починається через інтервал DIFS (DCF Inter-Frame Spacing), який є довшим. Таким чином забезпечується пріоритет точки доступу над звичайними пристроями [42]. Процедура відліку здійснюється з використанням вікна очікування  $CW$  (Contention Window), який ділиться на окремі часові інтервали. Розмір вікна очікування початково встановлюється в мінімальне значення  $CW_{\min} = 31$ , і подвоюється кожного разу при виникненні колізій до максимально можливого значення  $CW_{\max} = 1023$ . Нумерація інтервалів здійснюється в зворотному порядку від максимального значення до нуля. Таким чином, кожен пристрій обирає випадкове число  $CW_0 \in (CW_{\min}, CW_{\max})$  з якого і починається відлік до моменту передавання блоку даних. При невеликій кількості пристроїв ймовірність вибору однакового значення двома пристроями є невисокою, проте коли кількість пристроїв перевищує максимальну кількість інтервалів у вікні очікування, колізії уникнути неможливо [42].



Рис. 4.9. Механізм передавання даних у мережах Wi-Fi.

Один з механізмів для координації процесу передавання між мережами LTE-U та Wi-Fi передбачає, що LTE-U працює в режимі LAA (Licensed Assisted Access), при якому загальний кадр на рівні MAC (Media Access Control), тривалістю 10 мс, розділяється на періоди передавання та періоди очікування, розміри, який кратні субкадрам LTE-U тривалістю 1 мс, як показано на рис. 4.10 [36].

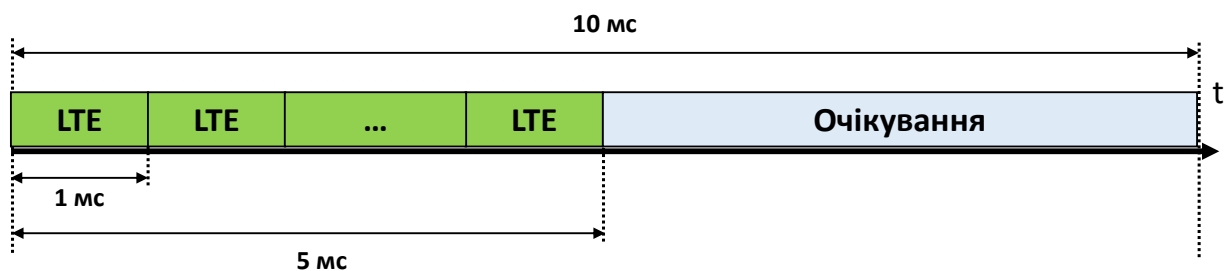


Рис. 4.10. Механізм передавання даних у мережах LTE-U/LAA.

Оскільки пристрої Wi-Fi прослуховують середовище шляхом вимірювання спектральної густини потужності сигналу в радіоканалі, в момент передавання даних пристроями LTE-U, Wi-Fi буде очікувати момент звільнення каналу. Таким чином, перемикаючись в режим очікування, LTE-U дає змогу пристроям Wi-Fi здійснити передавання даних. При цьому, в залежності від співвідношення між кількістю пристроїв LTE-U та Wi-Fi, співвідношення між кількістю субкадрів LTE-U для очікування та передавання змінюється пропорційно для забезпечення адекватного часу використання каналу для кожної з технологій [36,47].

Проте, модель LAA має ряд характерних недоліків, які полягають у відсутності механізму прослуховування середовища з боку пристроїв LTE-U, що не дає їм можливості повною мірою уникати інтерференційних завад із мережами Wi-Fi. Тому, альтернативним варіантом є реалізація механізму LBT (Listen Before Talk), яка полягає у прослуховуванні середовища передавання перед тим як здійснювати планування ресурсів для передавання даних у неліцензійному каналі (рис. 4.11). При використанні такого підходу, пристрої LTE-U мають змогу прослуховувати середовище на рівних з пристроями Wi-Fi [5]. Перед тим як передавати дані, пристрої LTE-U прослуховують середовище та повідомляють базову станцію про можливість передавання даних. Для узгодження моменту передавання даних для кожного пристрою, використовується аналогічне вікно прослуховування, як і у мережах Wi-Fi, проте сам процес строго детермінований в рамках структури кадру LTE-U, з відповідним поділом на субкадри для прослуховування та субкадри для передавання даних, як показано на рис. 4.11.

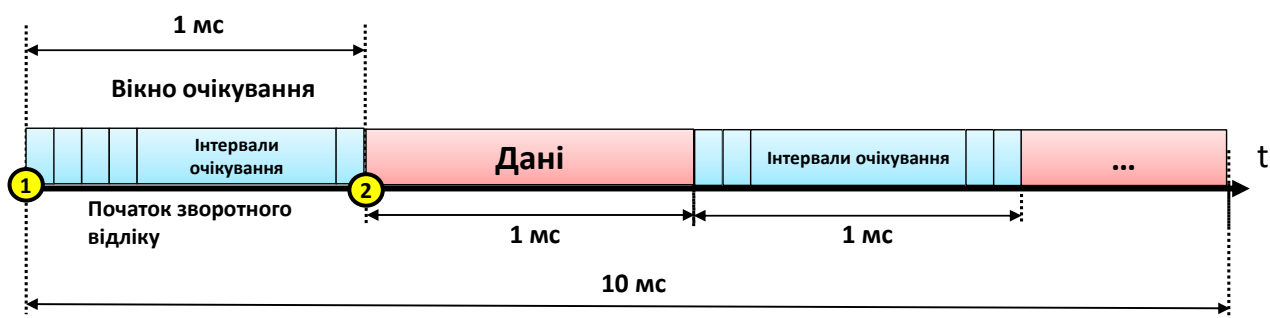


Рис. 4.11. Механізм передавання даних у мережах LTE-U/LBT.

При використанні механізму LBT, пристрої LTE-U прослуховують середовище обираючи випадкове значення для початку відліку  $CW_0 \in (CW_{\min}, CW_{\max})$  (т.1). При цьому, інтервали очікування відповідають тим, які використовуються в стандарті Wi-Fi для того, щоб уніфікувати обидві технології в процесі випадкового доступу. Після завершення часу очікування, пристрій LTE здійснює передавання даних у наступному субкадрі (т.2) [5].

Таким чином, для уникнення інтерференційних завад між мережами LTE та Wi-Fi важливим аспектом є мінімізація ймовірності вибору однакових значень  $CW_0$  різними пристроями. Тому, важливим параметром при реалізації системи мобільного зв'язку в неліцензійному частотному діапазоні є визначення розміру часового вікна, з якого здійснюється вибір інтервалу очікування кожного пристрою перед моментом передавання. Очевидно, що для максимальної ефективності використання радіочастотного ресурсу, значення  $CW_{\max}$  повинно бути якомога меншим, щоб мінімізувати час очікування пристроїв перед початком передавання. Проте, як вже зазначалось вище, при великій кількості пристроїв, ймовірність виникнення інтерференційних завад прямує до 1, що потребує збільшення діапазону значень у вікні очікування. Розширення вікна очікування збільшує кількість альтернативних варіантів для вибору пристроями, що в свою чергу забезпечить зниження ймовірності виникнення інтерференційних завад між ними. Проте, при збільшенні розміру часового вікна очікування, прямо пропорційно зростає відсоток простою радіочастотного ресурсу та зниження загальної спектральної ефективності системи мобільного зв'язку [292].

Формалізуємо дану модель наступним чином. Нехай,  $A_i$  – подія, при якій один пристрій вибирає  $i$ -й слот у вікні  $CW$ . Тоді, ймовірність події  $A_i$  обчислюється як:

$$P(A_i) = \left( \frac{CW_{\max} + 1}{2} \right)^{-1}. \quad (4.17)$$

Відповідно ймовірність, що жоден з пристроїв більше не вибере даний слот у вікні очікування обчислюється наступним чином:

$$1 - P(A_i) = \left( 1 - \left( \frac{CW_{\max} - 1}{2} \right)^{-1} \right)^{N-1}, \quad (4.18)$$

де  $N$  – кількість пристроїв, які конкурують за доступ до каналу зв'язку.

Таким чином, ймовірність вибору одного значення у вікні очікування для двох пристроїв можна обчислити як:

$$P_{coll} = 1 - \left( 1 - \left( \frac{CW_{\max} - 1}{2} \right)^{-1} \right)^{N-1}. \quad (4.19)$$

Для обчислення аналогічного випадку, узагальненого для  $n$  пристроїв, вираз (4.19) модифікується наступним чином:

$$P_{coll} = 1 - \left( 1 - \left( \frac{CW_{\max} - 1}{2} \right)^{-n+1} \right)^{N-n+1}. \quad (4.20)$$

Отже, із виразу (4.20) випливає, що для зниження ймовірності одночасного передавання пристроїв у неліцензійному частотному діапазоні необхідно максимізувати відношення розміру вікна очікування до кількості пристроїв, які конкурують за доступ до каналу.

$$f = \max_{\forall CW_{\max}, N} \left( \frac{CW_{\max}}{N} \right). \quad (4.20)$$

На сьогоднішній час, є чимало досліджень, які спрямовані на оптимізацію розміру вікна очікування в мережах Wi-Fi. Проте, особливості структури кадру LTE-U не дають змоги застосувати більшість із них у мережах мобільного зв'язку. Зокрема, при використанні стандартного дискретного інтервалу у вікні очікування тривалістю 9 мкс, максимальний розмір вікна очікування для LTE-U

буде рівним  $CW_{\max} = \lfloor 1000 / 9 \rfloor = 111$ , що майже у 10 разів менше, ніж у мережі Wi-Fi. Тому, для альтернативного розв'язку даної проблеми необхідно обрати інший підхід, який дасть змогу забезпечити максимальне відношення тривалості часового вікна до кількості конкуруючих вузлів [292].

У даній роботі розроблено алгоритм випадкового доступу з координуваним прослуховуванням частотних каналів абонентськими пристроями. Особливістю даного алгоритму є перехід від моделі конкурентного доступу між пристроями LTE (рис. 4.12), до моделі координованого доступу з використанням технології D2D (Device-to-Device) (рис. 4.13) [292]. Використання D2D дає змогу абонентським пристроям об'єднуватись у групи, для того щоб спільно прослуховувати стан каналів та обмінюватись даною інформацією між собою.

Ключовою особливістю запропонованого алгоритму є те, що конкуренція здійснюється не лише на рівні окремих пристроїв, але і на рівні окремих D2D груп. При цьому, кожен пристрій у D2D групі, приймає участь у прослуховуванні середовища окремо, але при отриманні доступу до середовища, будь-яким пристроєм групи, усі інші пристрої автоматично отримують пріоритет доступу до неліцензійного каналу по чергово, після головного пристрою. Розглянемо процедуру передавання даних у неліцензійному частотному діапазоні з використанням запропонованого алгоритму [292].

**Етап 1.** Групування абонентів з використанням алгоритму K-means, який представлений у підрозділі 2.5.1.

**Етап 2.** Вибір ортогональних (квазі-ортогональних) множин значень вікна прослуховування для окремих D2D груп.

**Етап 3.** Зворотній відлік таймера очікування моменту передавання даних.

**Етап 4.** Передавання даних пристроєм з  $i$ -ї D2D групи, у якого вийшов час очікування.

**Етап 5.** Почергове передавання даних іншими пристроями з  $i$ -ї D2D групи у відповідності до їх поточних значень таймера очікування.

**Етап 6.** Повернення до етапу 3.



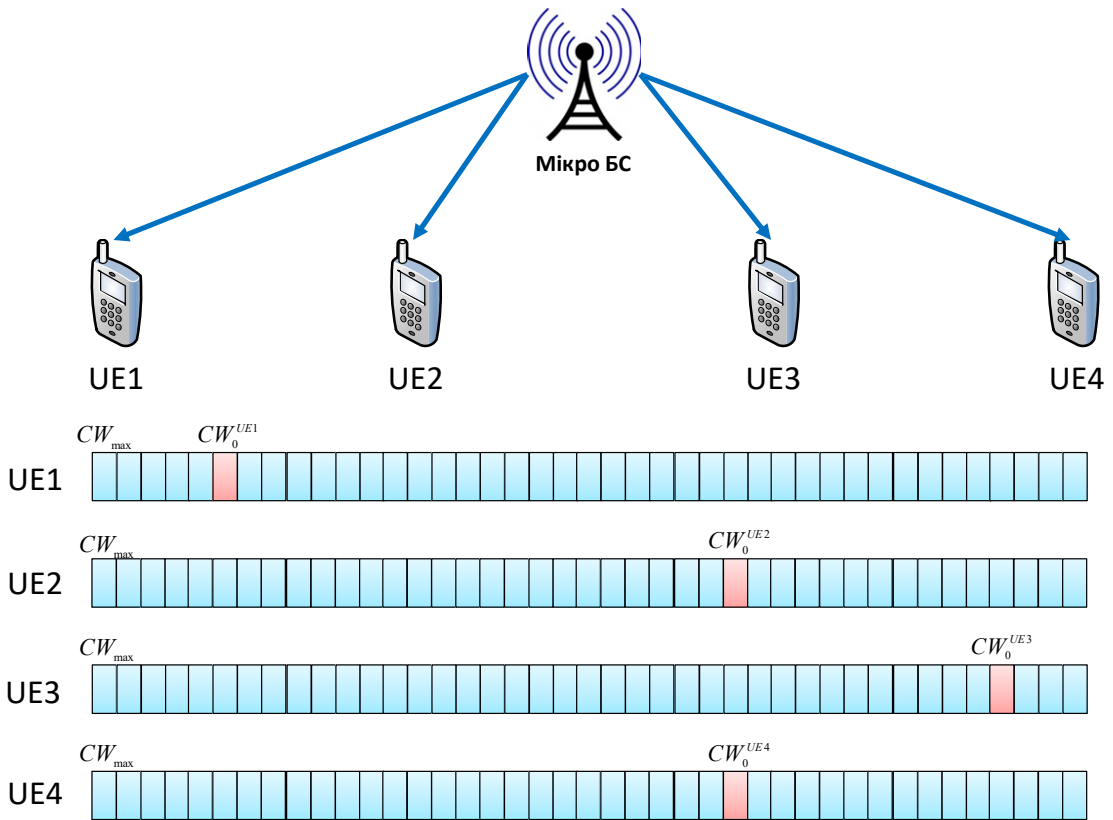


Рис. 4.12. Звичайний алгоритм конкурентного передавання даних у неліцензійному частотному діапазоні.

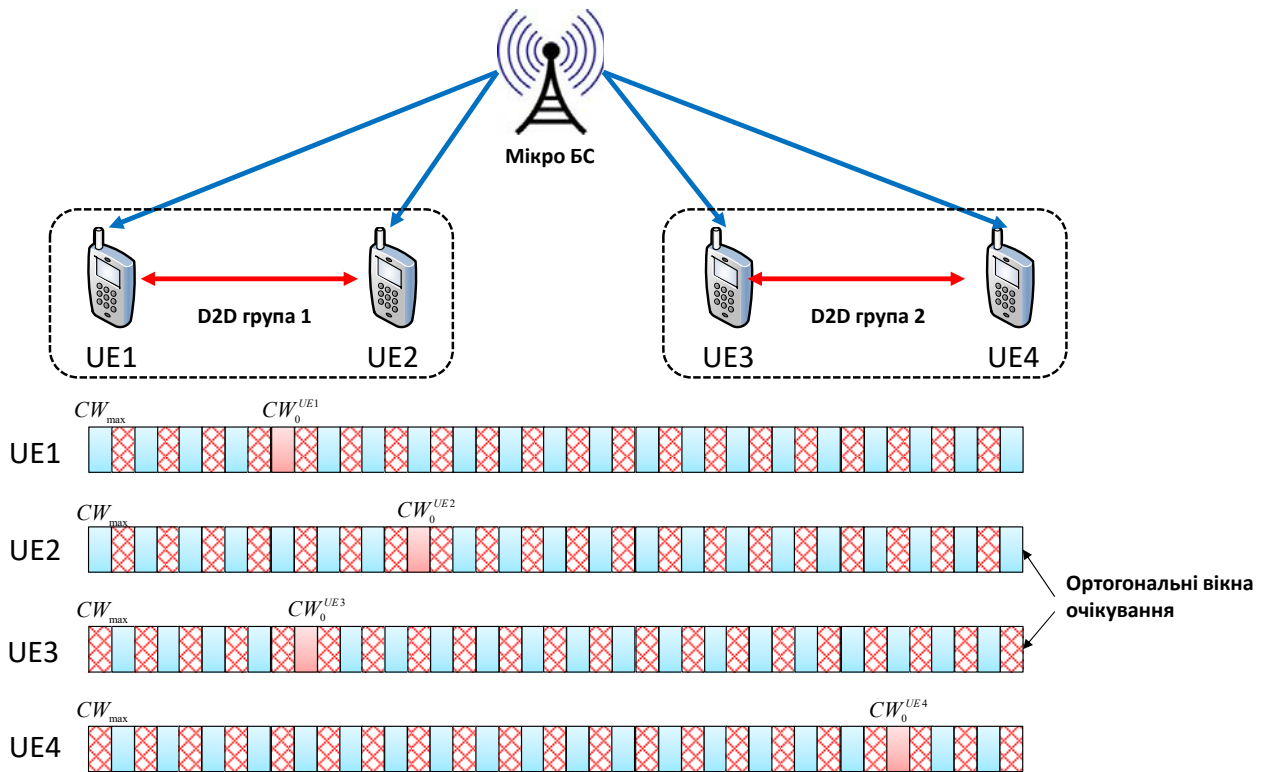


Рис. 4.13. Запропонований алгоритм передавання даних з координуваним прослуховуванням неліцензійного частотного діапазону [292].

Таким чином, механізм передавання даних у мережах LTE-U/LBT, який представлений на рис. 4.11, модифікується за рахунок усунення зайвих інтервалів прослуховування (рис. 4.14) [292,293].

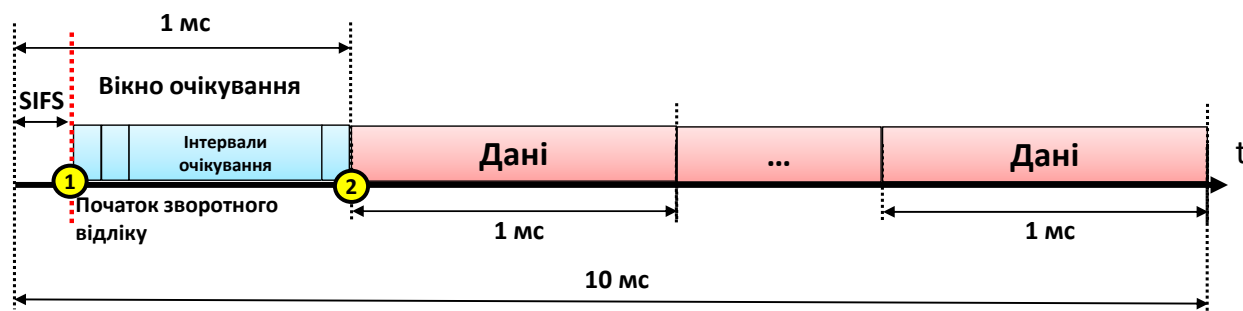


Рис. 4.14. Модифікований механізм передавання даних з використанням координованого прослуховування на основі D2D груп [292,293].

Додатковою особливістю запропонованого алгоритму є використання ортогональних множин допустимих значень вікон прослуховування для різних D2D груп. У випадку, який проілюстрований на рис. 4.13, перша D2D група використовує лише парні значення  $CW_0$ , у той час як друга група – лише непарні значення  $CW_0$ . При цьому, часові відліки обома групами ведуться по всіх значеннях  $CW$ , що забезпечує їх рознесення в часі та уникнення одночасного передавання даних.

Використання ортогональних множин  $CW$  дає ще одну важливу перевагу у контексті економічної ефективності мережі. Враховуючи, що для різних абонентів можуть використовуватись різні пріоритети надання сервісу оператором, використання рознесених множин  $CW$  дає змогу розподілити їх між D2D групами таким чином, щоб абоненти з вищим пріоритетом мали змогу частіше отримувати доступ до неліцензійного радіочастотного діапазону.

Для дослідження ефективності запропонованого алгоритму з точки зору ймовірності виникнення колізій між абонентами LTE та Wi-Fi проведено моделювання процесу конкурентного доступу до неліцензійного радіочастотного ресурсу. Моделювання проводилось для різного розміру вікна очікування та для різної кількості абонентів, припускаючи що кількість пристроїв LTE та Wi-Fi завжди однакова. Результати просторових залежностей

ймовірності виникнення колізій між абонентами LTE та Wi-Fi представлені на рис. 4.15 та 4.16. Варто зазначити, що результати враховують колізії як між пристроями LTE та Wi-Fi, так і безпосередньо між пристроями Wi-Fi [292].

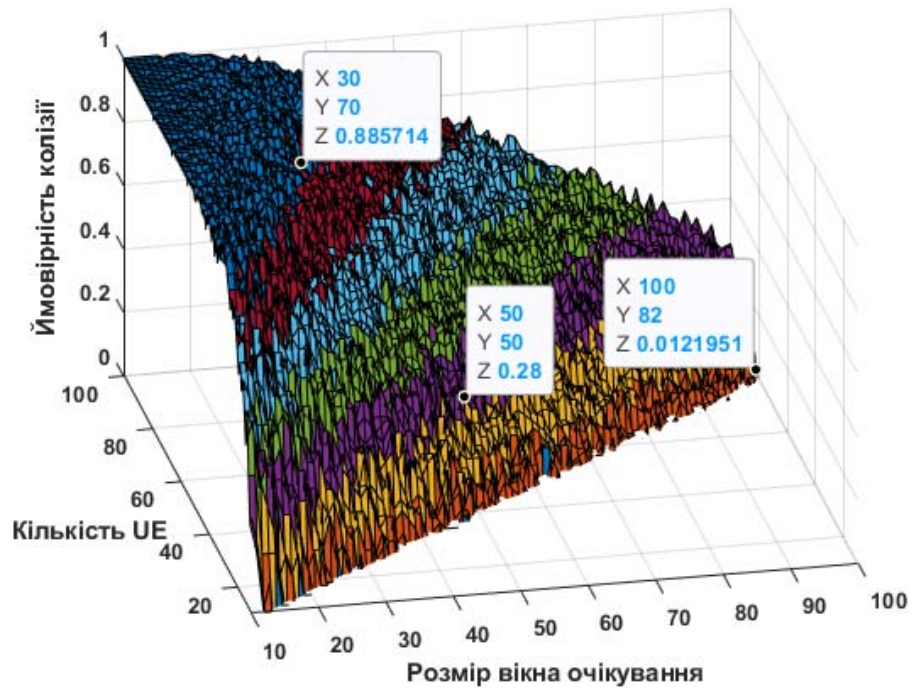


Рис. 4.15. Просторова залежність ймовірності виникнення колізій при звичайному алгоритмі функціонування LTE-U/LBT.

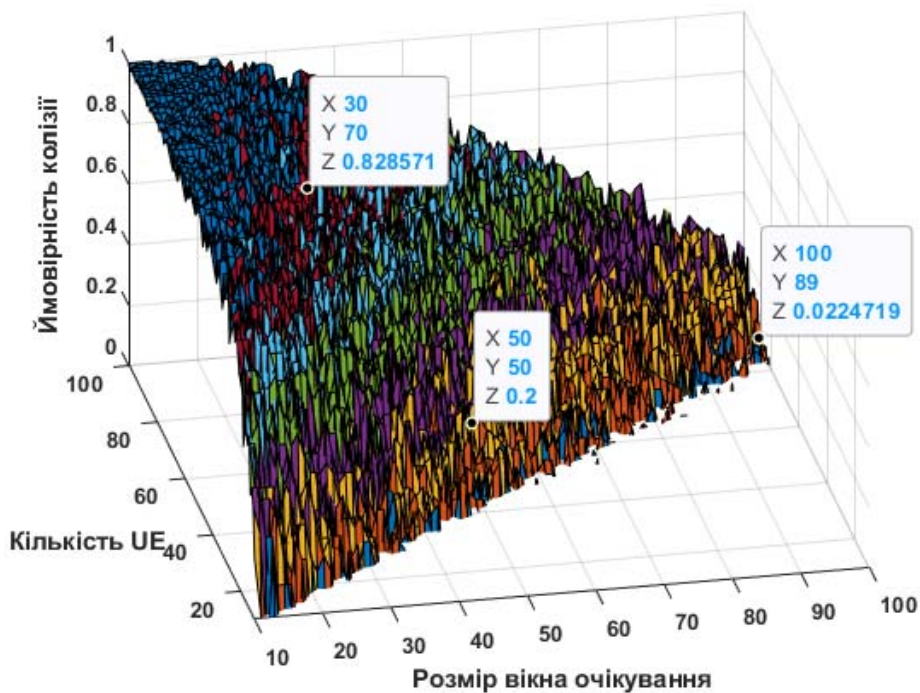


Рис. 4.16. Просторова залежність ймовірності виникнення колізій при запропонованому алгоритмі координованого прослуховування.

З рис. 4.15-4.16 можна побачити, що для аналогічних значень розміру вікна прослуховування, запропонований алгоритм забезпечує зниження ймовірності колізії на 5-10%, що в свою чергу забезпечує краще співвідношення сигнал/шум для пристроїв LTE-U [5,292,293].

Результати на рис. 4.16 отримані при використанні 4 груп D2D, пристрої між якими розподілялись порівну. Для порівняння різних комбінацій кількості груп та кількості пристроїв в групі, проведено ряд досліджень для 100 абонентів. На рис. 4.17 показано результати ймовірності виникнення колізій для різної кількості абонентів та D2D груп [292].

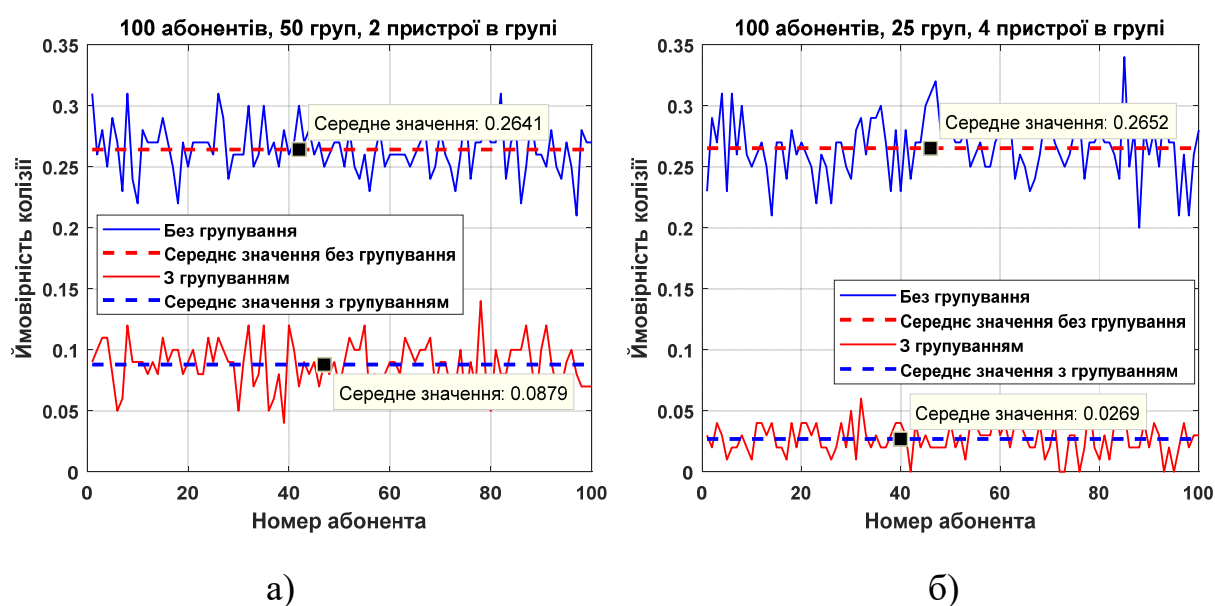


Рис. 4.17. Результати моделювання різних сценаріїв звичайного та кооперативного прослуховування для 2 абонентів в групі – а) та для 4 абонентів в групі – б).

Загалом на основі ряду проведених експериментів визначено, що розроблений алгоритм координованого прослуховування забезпечує вигравш з точки зору ймовірності одночасного передавання даних абонентами LTE та Wi-Fi від 5 до 30%, що в свою чергу повинно знизити кількість колізій для пристроїв Wi-Fi та відповідно підвищити співвідношення сигнал/шум та пропускну здатність для пристроїв LTE (рис. 4.18) [5,292,293].

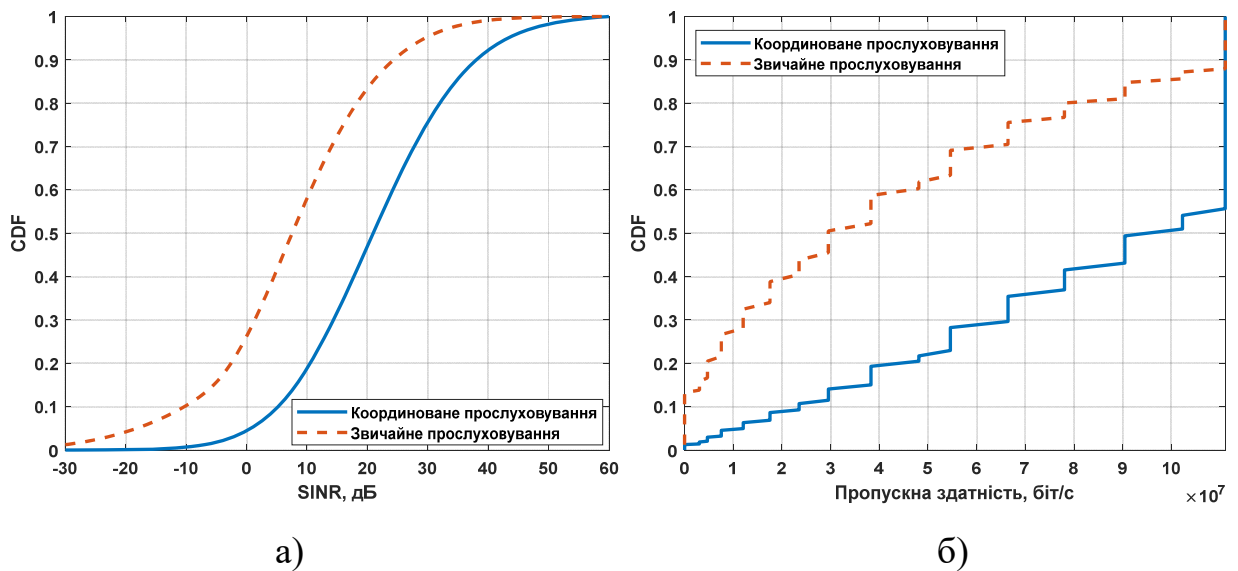


Рис. 4.18. Порівняння кумулятивних функцій розподілу значень SINR – а) та пропускної здатності – б) для пристроїв LTE-U.

Результати моделювання, показують, що використання розробленого методу координованого прослуховування каналів в неліцензійному частотному діапазоні дає змогу в середньому підвищити пропускну здатність для пристроїв LTE-U до 35% (рис. 4.18,б) за рахунок зменшення інтерференційних завад із мережами Wi-Fi (рис. 4.18,а) [5,292,293].

#### 4.4.3. Розроблення моделі спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу в децентралізованих мережах мобільного зв'язку

Незважаючи на те, що запропонований у попередньому підрозділі алгоритм координованого прослуховування дає змогу ефективно використовувати неліцензійний радіочастотний ресурс уникаючи значних інтерференційних завад між мережами мобільного зв'язку та мережами Wi-Fi, у контексті децентралізації цього недостатньо, враховуючи значну кількість операторів мобільного зв'язку, які потенційно можуть використовувати неліцензійний радіочастотний ресурс на основі існуючих стандартів LTE-U та 5G NR-U [293]. Це суттєво підвищить рівень завантаженості неліцензійних

діапазонів, що призведе до підвищення рівня інтерференційних завад та погіршення якості функціонування не лише для мереж мобільного зв'язку, але і для існуючих приватних та публічних мереж Wi-Fi.

Тому, у даній роботі пропонується нова модель спільного використання радіочастотного ресурсу неліцензійному діапазоні для операторів, яка передбачає схожий принцип розподілу ресурсів до ліцензійного діапазону. Використання запропонованої у другому розділі моделі токенизації неліцензійного радіочастотного ресурсу дає змогу розподілити його між операторами аналогічно до ліцензійного, як показано на рис. 4.19 для типового сценарію трьох операторів [219,294,295].

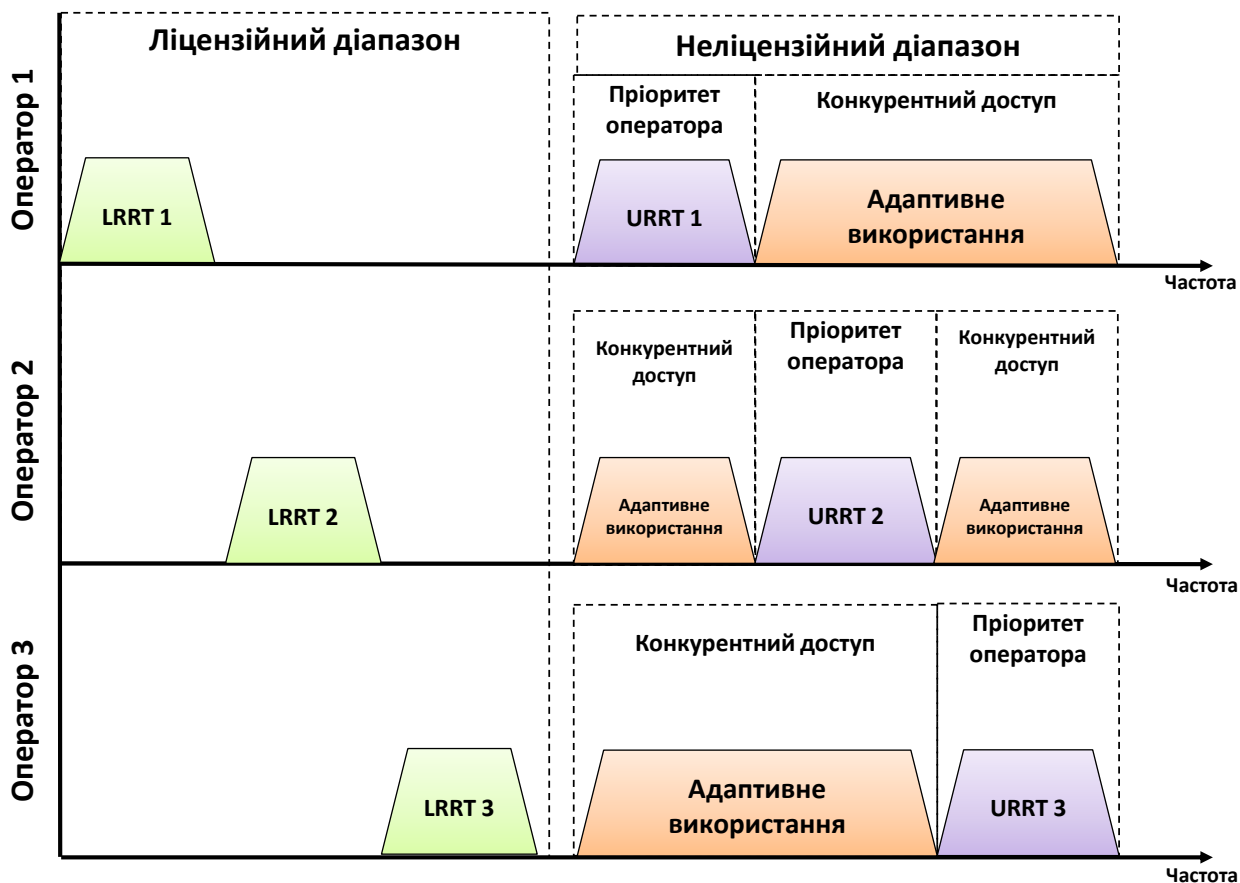


Рис. 4.19. Приклад логічного розділення пулу радіочастотних ресурсів між операторами.

Особливістю запропонованої моделі є використання віртуальних тимчасових ліцензій на неліцензований радіочастотний ресурс, які реалізуються шляхом його токенизації у мережі блокчейн за стандартом ERC

721 (NFT-токени). Токени URRT дають операторам пріоритет використання відповідного неліцензійного радіочастотного ресурсу [219]. Таким чином, в умовах невеликого завантаження ресурсів оператори використовують лише неліцензійний радіочастотний діапазон в межах свого пулу радіочастотного ресурсу, конкуруючи при цьому лише з мережами Wi-Fi. Такий підхід узгоджується із парадигмою мережного слайсингу, яку можна застосувати до неліцензійного радіочастотного ресурсу з використанням запропонованої моделі [219,294,295].

Таким чином, у найбільш критичному випадку, оператори можуть здійснювати агрегацію радіочастотного ресурсу в ліцензійному та неліцензійному діапазонах, для збільшення сумарної пропускної здатності (рис. 4.20). Загалом, агрегацію радіочастотного ресурсу в ліцензійному та неліцензійному діапазонах варто розділити на дві складові. Перша – агрегація пріоритетного радіочастотного ресурсу, до якого належить власний ліцензійний радіочастотний ресурс та пріоритетна частина неліцензійного радіочастотного ресурсу. Друга – адаптивна агрегація ресурсу неліцензійного діапазону, у разі відсутності активності оператора, який має пріоритет у даному діапазоні [294,295].



Рис. 4.20. Агрегація радіочастотного ресурсу ліцензійного та неліцензійного діапазонів для підвищення сумарної пропускної здатності мережі.



Для моделювання процесу агрегації радіочастотного ресурсу обрано сценарій двох операторів. Сумарний обсяг ліцензійного радіочастотного ресурсу становить 100 МГц, які порівну розділено між операторами (по 50 МГц). Аналогічно додаткові 100 МГц виділені у неліцензійному частотному діапазоні, і для кожного оператора надається віртуальна ліцензія на пріоритетне використання 50МГц неліцензійного частотного діапазону. При цьому, активність мереж Wi-Fi є стабільною впродовж усього періоду моделювання. Сценарій моделювання зображений на рис. 4.21.

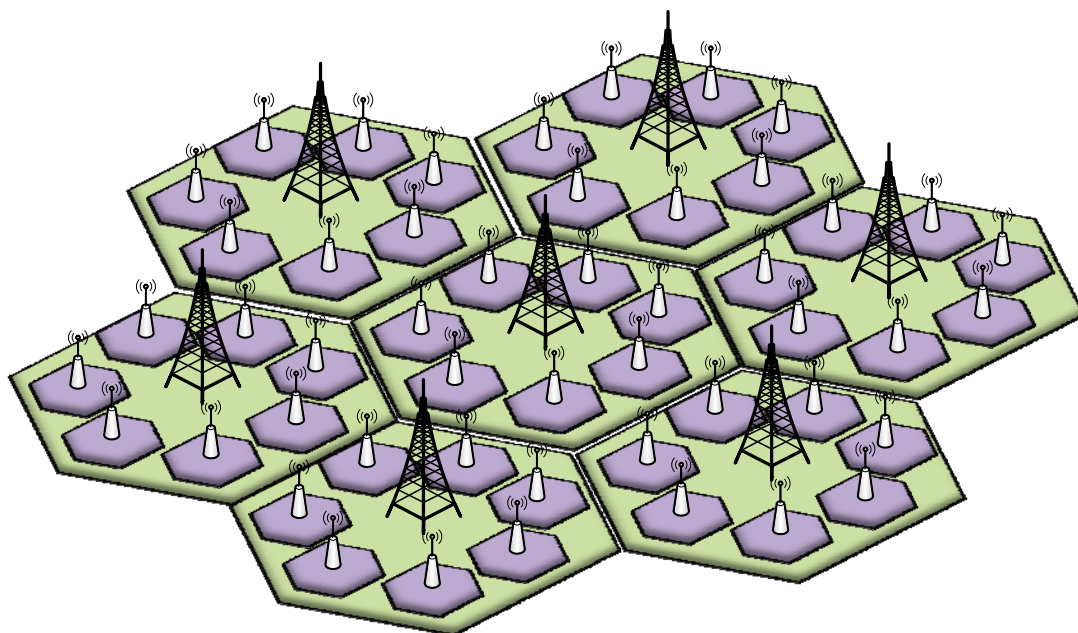


Рис. 4.21. Ілюстративне представлення топологічної структури для моделювання процесу агрегації радіочастотного ресурсу.

Для передавання у ліцензійному радіочастотному діапазоні імітувались макрокомірки з усередненою спектральною ефективністю 5 біт/Гц. Для неліцензійного діапазону обрано мікрокомірки із середньою спектральною ефективністю 10 біт/Гц [294,295].

Результати моделювання на рис. 4.22 показують, що при використанні запропонованої моделі пріоритетної агрегації оператори мають змогу досягти схожих значень агрегованої пропускної здатності, що підтверджує можливість координованого використання неліцензійного радіочастотного ресурсу у



децентралізованих мережах мобільного зв'язку. Це досягається за рахунок використання пріоритетного доступу до неліцензійного радіочастотного ресурсу, який запобігає домінуванню одного з операторів [294,295].

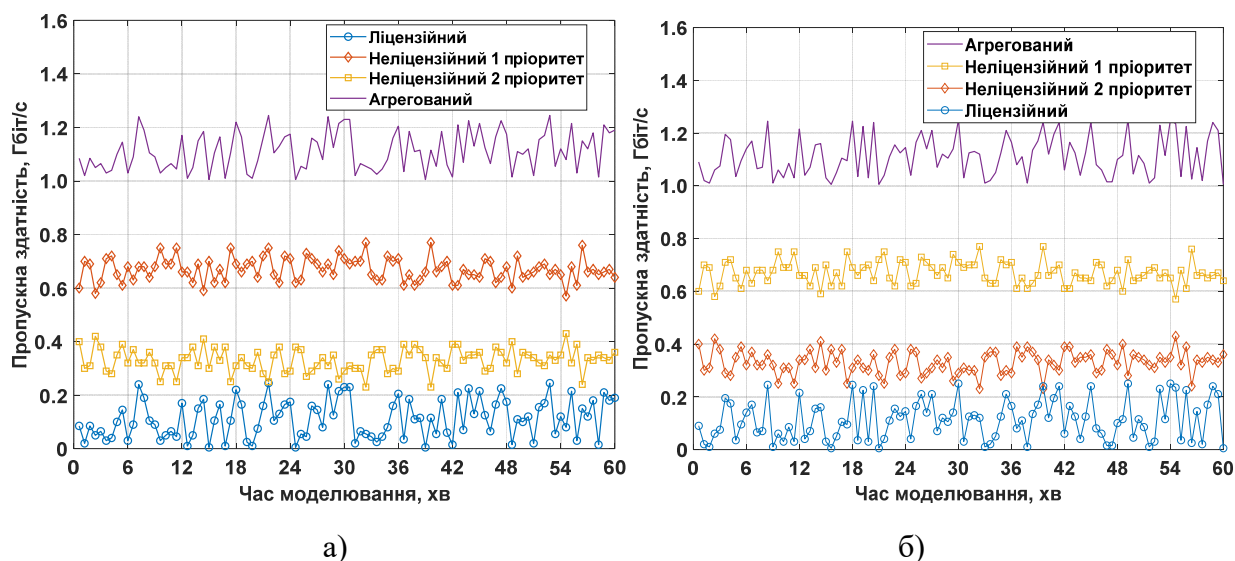


Рис. 4.22. Результати моделювання пропускної здатності при агрегації трафіку для оператора 1 – а) та оператора 2 – б).

Однак, результати на рис. 4.22, отримані при ідеалізованому випадку рівномірного розділення ресурсів між операторами та однакової активності абонентів у кожного оператора. В реальному житті, такий сценарій є практично неможливим, враховуючи динаміку абонентів у мережі та різні масштаби операторів. Тому, для розв'язку завдання адаптивного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу в децентралізованій мережі мобільного зв'язку, запропоновано адаптовану кооперативну ігрову модель оренди токенів *URRT* з адаптацією вигравів обернено-пропорційно до обсягу використання ресурсів операторами [296,297]. Особливістю даної моделі є те, що координація ігрових стратегій операторів здійснюється смарт-контрактом, який встановлює операторам квоти на оренду радіочастотного ресурсу [296,297]. Для визначення квоти оператора, використовуються утилітарні токени стандарту ERC 20, які мають обмежену емісію  $M$ . Величина  $M$  є співмірною до сумарного обсягу неліцензійного радіочастотного ресурсу, який визначений для спільного використання в рамках кооперативної гри. Таким чином, операторам

нараховується  $m < M$  утилітарних токенів, які дають право на оренду невзаємозамінних токенів URRT (ERC-721) [296,297].

Розглянемо процес функціонування ігрової моделі для випадку фіксованого обсягу радіочастотного ресурсу [297].

**Етап 1.** Визначення кількості операторів  $n$ , які приймають участь у грі.

**Етап 2.** Розподіл утилітарних токенів порівну між операторами:

$$m_k = \frac{M}{n}, k \in [1, n] \quad (4.21)$$

де  $m_k$  – кількість утилітарних токенів для оператора  $k$ ,  $M$  – сумарна емісія утилітарних токенів.

**Етап 3.** Оператори використовують ресурси неліцензійного діапазону надсилаючи свої утилітарні токени на адресу смарт-контракту:

$$0 \leftarrow m_k \leftarrow m_k - \omega_k \cdot t_k, k \in [1, n] \quad (4.22)$$

де  $\omega_k, t_k$  – вартість використання радіочастотного ресурсу за секунду та тривалість використання неліцензійного радіочастотного ресурсу в секундах, відповідно. Даний етап триває поки усі  $M$  утилітарних токенів не будуть надіслані на баланс смарт-контракту.

**Етап 4.** Смарт-контракт перерозподіляє утилітарні токени між операторами обернено-пропорційно до обсягу використаного неліцензійного радіочастотного ресурсу оновлюючи баланси операторів:

$$m_k = \frac{\sum_{i \neq k} \omega_i \cdot t_i}{n}, i, k \in [1, n] \quad (4.23)$$

При ітерації етапів 3, 4 оператори наближаються до стратегії рівноваги Неша:

$$\omega_k = \frac{W}{n}, k \in [1, n]. \quad (4.24)$$

де  $W$  – сумарний обсяг радіочастотного ресурсу неліцензійного діапазону.

Результати моделювання показують, що запропонована модель досягає рівноваги Неша за незначну кількість ітерацій, забезпечуючи при цьому

рівномірний розподіл доступу до неліцензійного частотного діапазону незалежно від кількості конкуруючих операторів (рис. 4.23) [297].

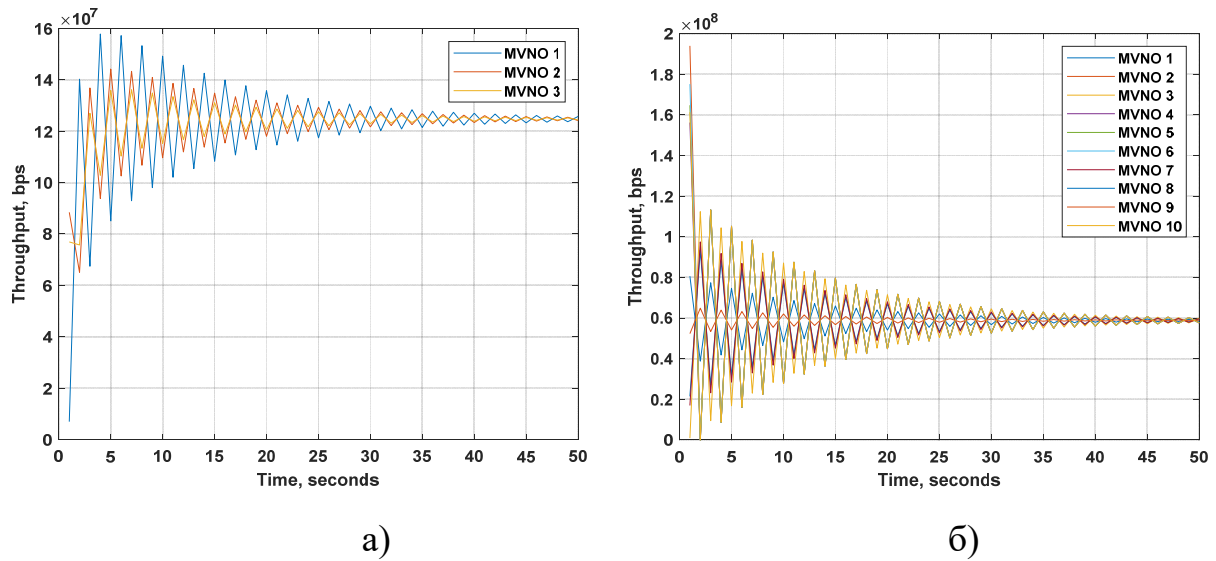


Рис. 4.23. Результати моделювання запропонованої ігрової моделі спільного використання неліцензійного радіочастотного ресурсу для 3-х операторів – а) та для 10-ти операторів – б).

#### 4.5. Розроблення модифікованого методу інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в децентралізованих мережах мобільного зв'язку

##### 4.5.1. Формалізація проблеми управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку

Як вже зазначалося у попередніх розділах, активність абонентів зумовлена багатьма соціальними факторами, такими як робота, сім'я, автомобіль, громадський транспорт та багато інших. Це призводить до того, що абоненти характеризуються унікальними атрибутами та їх закономірностями, оскільки кожен абонент має свої звичні траєкторії переміщення та часто відвідувані місця (дім, робота, ресторан, тренажерний зал, тощо) [298-301]. Важливим фактором є те, що такі закономірності як правило характеризуються високим ступенем самоподібності та періодичності, що зумовлено обмеженнями графіку роботи та іншими факторами. Відповідно, дану властивість можна переносити на групи абонентів довільного розміру, оскільки суперпозиція індивідуальних

самоподібних характеристик в результаті утворює групові характеристики із самоподібними статистичними розподілами. Дані аспекти були частково враховані при синтезі моделі мобільності на основі генеративно змагальних нейронних мереж у третьому розділі роботи [262, 298-301].

Таким чином, для вирішення проблеми інтелектуального управління радіочастотним ресурсом у даному розділі пропонується метод прогнозування трафіку на різних рівнях децентралізованої мережі мобільного зв'язку, який дасть змогу операторам підвищити ефективність формування стратегій спільного використання ліцензійного та неліцензійного радіочастотного ресурсу з урахуванням просторово-часового розподілу абонентів [219,298-301].

Відомо, що пропускна здатність у мережі мобільного зв'язку є визначальним параметром якості сервісу для абонентів, який опосередковано впливає на такі показники як затримка та втрати пакетів. Тому, для формалізації методу інтелектуального управління радіочастотним ресурсом використовується метрика пропускної здатності абонентів, а також похідні від неї метрики пропускної здатності комірок та системної спектральної ефективності сегменту мережі [270-283].

Для формалізації використовуємо математичну модель, яка запропонована у другому розділі. Оскільки, метою методу управління є підвищення сумарної ефективності використання радіочастотного ресурсу незалежно від кількості операторів, для початку розглянемо матрицю інформаційних потоків лише на рівні абонентів, сервісів та мережної інфраструктури. Для введення часової динаміки формалізуємо інформаційний потік абонента у вигляді часового ряду:

$$f_{i,j,l}(t) = \underline{F}(i, j, l)_t, \quad (4.25)$$

де  $i$  – індекс абонента,  $j$  – індекс сервісу та  $l$  – індекс базової станції.

З точки зору управління ресурсами на рівні комірок мережі мобільного зв'язку індивідуальні особливості кожного абонента не є принциповими, що дає можливість спростити вираз (4.25):

$$f_{j,l}(t) = \sum_i f_{i,j,l}(t). \quad (4.26)$$

Вираз (4.26) узагальнює інформаційний потік із сервісом  $j$  через базову станцію  $l$ , без прив'язки до абонентів. Для додаткового спрощення можна представити сумарний інформаційний потік усіх сервісів через базову станцію  $l$ , що дає змогу оцінити сумарний обсяг ресурсів, який необхідний для базової станції:

$$f_l(t) = \sum_j f_{j,l}(t) \equiv \sum_i \sum_j f_{i,j,l}(t). \quad (4.27)$$

Вирази (4.26) та (4.27) дають змогу узагальнити інформаційні потоки для прогнозування та прийняття рішення про розподіл радіочастотного ресурсу. На рис. 4.24 представлено схематичне представлення запропонованої моделі інформаційних потоків у децентралізованій мережі мобільного зв'язку.

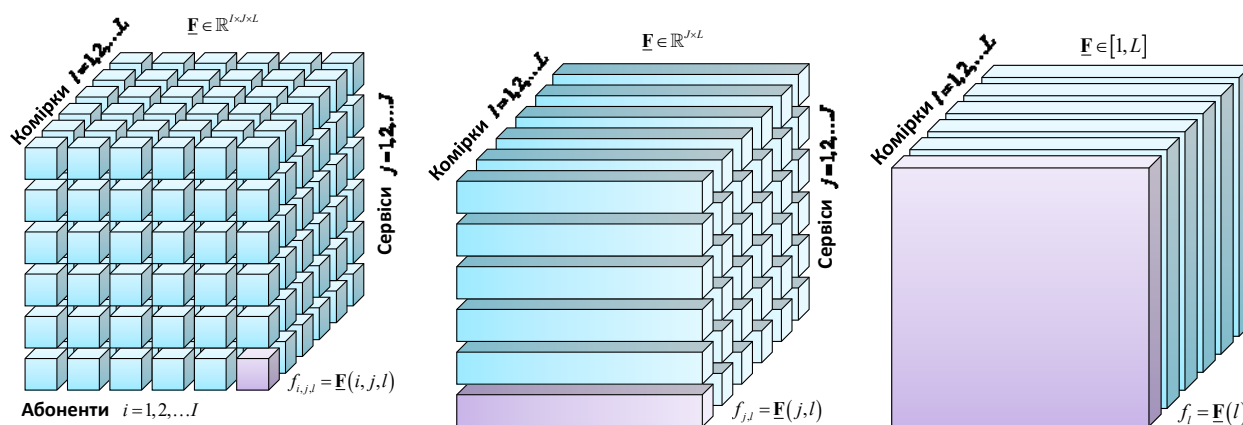


Рис. 4.24. Схематичне представлення інформаційних потоків у децентралізованій мережі мобільного зв'язку.

#### 4.5.2. Удосконалений метод інтелектуального прогнозування інформаційних потоків у децентралізованих мережах мобільного зв'язку

Формалізована модель розподілу інформаційних потоків, яка представлена на рис. 4.24, дає змогу перейти до прогнозування трафіку у різних просторових комбінаціях. Зокрема, на відміну від класичних підходів, які здійснюють прогнозування сумарного трафіку у комірках мережі мобільного зв'язку, у даній роботі пропонується враховувати окремі прогнози за типами сервісів для кожної комірки (4.26), які можна отримати на основі статистики функцій корисності абонентів [219].

Для здійснення інтелектуального прогнозування розроблено модель рекурентної нейронної мережі на основі архітектури LSTM (Long-Short Term Memory). Нейронні мережі LSTM адаптовані для вивчення довгострокових залежностей та закономірностей, що робить їх однією із найбільш ефективних архітектур для прогнозування трафіку у мережах мобільного зв'язку. На відміну від звичайних рекурентних нейронних мереж, LSTM будуються на основі складних багат шарових комірок, які забезпечують властивості довгострокової та короткочасної пам'яті, що забезпечує гнучкість вибору часових масштабів прогнозування трафіку [298-301].

Для навчання моделі, було згенеровано датасет переміщення абонентів з використанням запропонованого у третьому розділі алгоритму моделювання мобільності на основі генеративно-змагальних нейронних мереж [262]. Крім того, для заданої моделі мобільності згенеровано коміркову структуру мережі мобільного зв'язку, використовуючи запропонований у третьому розділі роботи метод синтезу коміркової структури на основі самоорганізованих карт Кохонена. Таким чином, реалізовано представлену в другому розділі роботи модель автоматизованого інтелектуального управління, яка передбачає самонавчання інтелектуальних алгоритмів, шляхом їх взаємодії між собою, без необхідності втручання системних адміністраторів, як показано на рис. 4.25 [216,218,258,262,298-301].

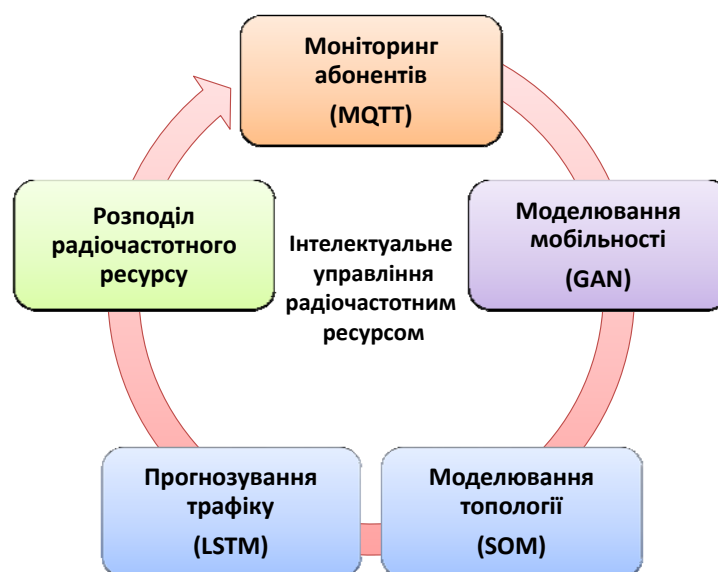


Рис. 4.25. Цикл інтелектуального управління радіочастотним ресурсом.

Результати прогнозування трафіку для чотирьох комірок з використанням розробленої моделі рекурентної нейронної мережі представлено на рис. 4.26.

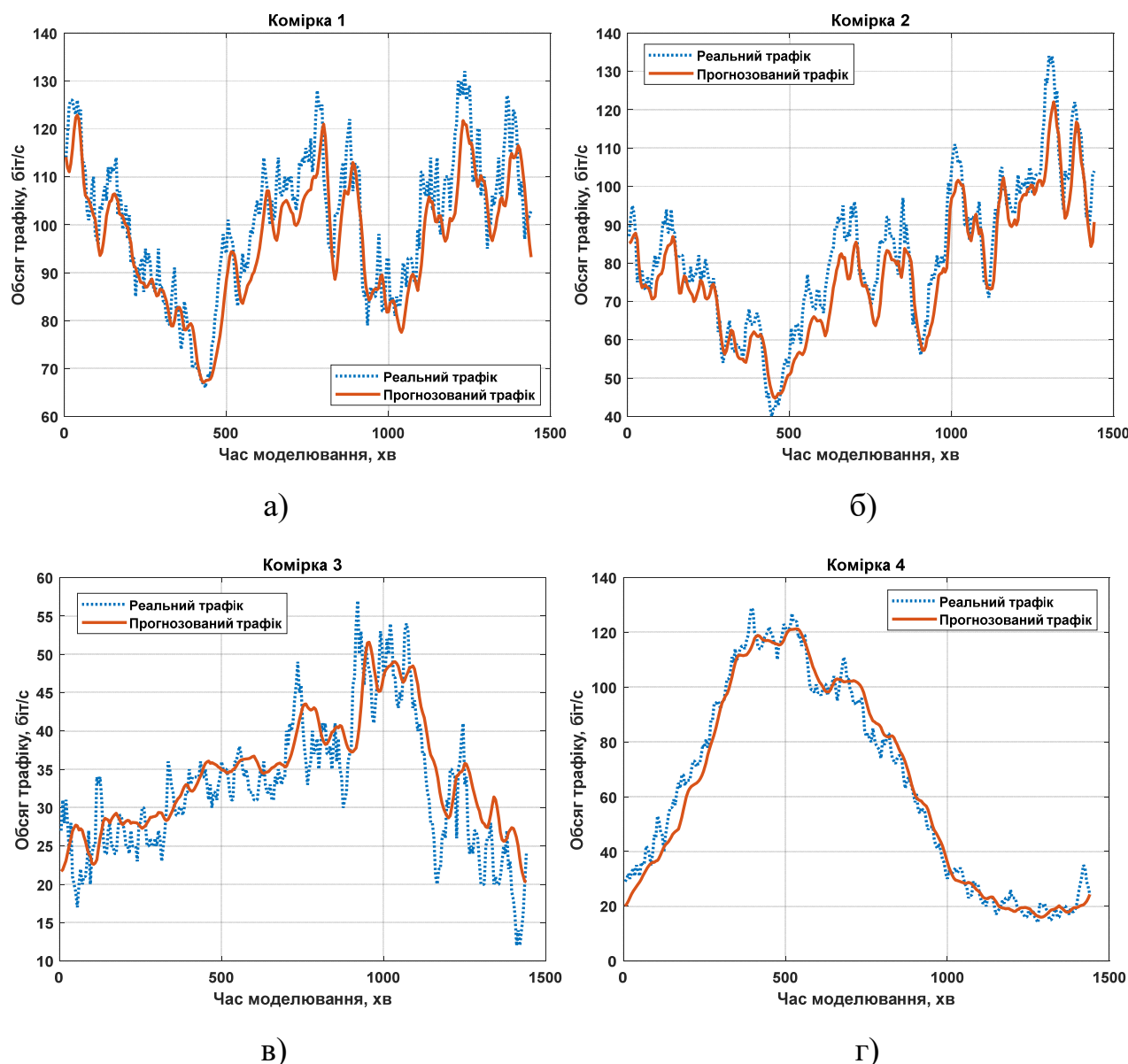


Рис. 4.26. Приклади прогнозування трафіку з використанням рекурентних нейронних мереж LSTM для різних комірок.

Для спрощення процесу моделювання, значення параметру співвідношення SINR для абонентів усереднено для цілої комірки на рівні  $SQI=7$ , який передбачає використання модуляції 16 QAM, з швидкістю коду 0.3691, і відповідною спектральною ефективністю 1.4766 біт/с/Гц. Крім того, використано планувальник ресурсів Round-Robin, який передбачає рівномірний розподіл ресурсів між абонентами в межах одного мережного слайсу. Такі

обмеження дають змогу звести залежність пропускну здатності безпосередньо до ширини смуги частот, яка доступна базовій станції, що дає змогу адекватно оцінити ефективність запропонованого методу інтелектуального управління без зайвих похибок, зумовлених флуктуаціями інших параметрів системи мобільного зв'язку [298,299].

#### 4.5.3. Удосконалений метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом у децентралізованих мережах мобільного зв'язку

Для формалізації процесу розподілу радіочастотного ресурсу введемо матрицю радіочастотного ресурсу  $\underline{\mathbf{W}} \in \mathbb{R}^{J \times L}$ , яка розділена на фрагменти радіочастотного ресурсу:

$$w_{j,l}(t) = \underline{\mathbf{W}}(j,l)_t, \quad (4.28)$$

де  $w_{j,l}(t)$  – радіочастотний ресурс виділений для сервісного слайсу  $j$ , базової станції  $l$ . При цьому сумарний обсяг радіочастотного ресурсу становить:

$$W = \sum_j \sum_l w_{j,l}(t), \quad \forall t. \quad (4.29)$$

Для порівняння, розглянемо статичну модель рівномірного розподілу радіочастотного ресурсу між комітками та мережними слайсами. При використанні такого підходу для кожного слайсу ширина смуги радіочастотного ресурсу незалежно від комітки визначається як:

$$w_{j,l}(t) = \frac{W}{J \cdot L}, \quad \forall t, j \in (1, J), l \in (1, L). \quad (4.30)$$

Більш прогресивний метод передбачає використання прогнозування трафіку для комірок та статичний розподіл ресурсів між мережними слайсами в межах виділеного пулу радіочастот для комірки. При використанні такої моделі, спочатку здійснюється прогнозування значень інформаційних потоків для кожної комірки  $f_i'(t)$ , а вже потім виділяється радіочастотний ресурс для кожного окремого мережного слайсу:



$$w_{j,l}(t) = \frac{f'_l(t) \cdot W}{J \sum_{b=1}^L f'_b(t)}, \quad \forall t, j \in (1, J), l \in (1, L) . \quad (4.31)$$

На відміну від вище представлених випадків, розроблений метод використовує більш гранульовані прогнози трафіку на рівні окремих сервісів. В такому випадку, спочатку здійснюється прогнозування трафіку для усіх типів сервісу в межах кожної комірки  $f'_{j,l}(t)$ . Відповідно, формула для розрахунку необхідних смуг радіочастотного ресурсу запишеться у наступній формі:

$$w_{j,l}(t) = \frac{f'_{j,l}(t) \cdot W}{\sum_{a=1}^J \sum_{b=1}^L f'_{a,b}(t)} \approx \frac{f'_{j,l}(t) \cdot W}{\sum_{a=1}^J f'_a(t)} \approx \frac{f'_{j,l}(t) \cdot W}{\sum_{b=1}^L f'_b(t)}, \quad \forall t, j \in (1, J), l \in (1, L) . \quad (4.32)$$

З виразу (4.32), можна побачити, що на відміну від (4.31), запропонований метод не враховує прогнозування на рівні базових станцій. Це дає змогу гарантувати те, що сервіси з різними вимогами до якості, будуть належним чином обслуговуватись в мережі відповідно до їх поточних потреб, що забезпечить справедливий розподіл радіочастотного ресурсу між базовими станціями. Це забезпечує більш ефективне використання радіочастотного ресурсу операторами, при забезпеченні необхідних вимог щодо якості обслуговування для кожного абонента.

Для дослідження проведемо імітаційне моделювання процесу виділення радіочастотного ресурсу та обслуговування абонентів з трьома різними вимогами до якості сервісу, які розділені на окремі мережні слайси. Для порівняння обрано три варіанти розподілу радіочастотного ресурсу між мережними слайсами: статичний, який аналітично представлений виразом (4.30); напів інтелектуальний, який відображений виразом (4.31); і запропонований інтелектуальний, який відображений у виразі (4.32) [298-301].

Результати моделювання для окремих мережних слайсів представлено на рис. 4.27-4.38. Результати представлені лише для чотирьох комірок із 100 досліджених, проте, вони відображають ключову перевагу запропонованого методу з точки зору забезпечення стабільної якості обслуговування для кожного типу сервісу.

Особливістю процесу моделювання є те, що відсоткова частка абонентів для кожного слайсу змінюється в часі індивідуально для кожної комірки, що зумовлено особливістю розробленої імітаційної моделі з реалістичним переміщенням абонентів між комірками [262].

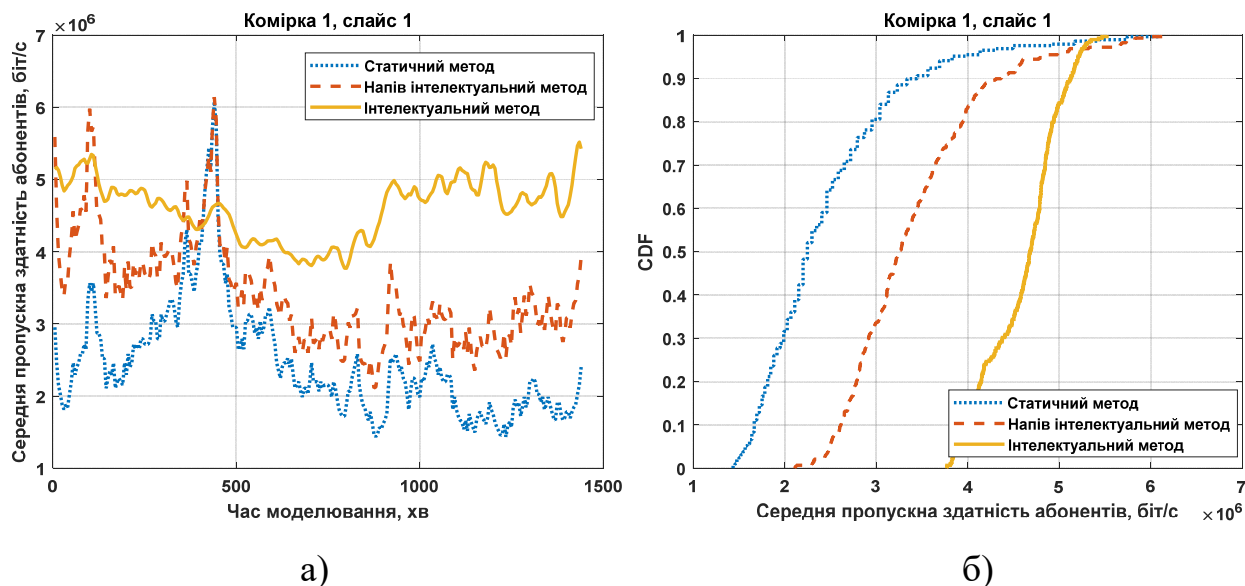


Рис. 4.27. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 1, слайсу 1, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

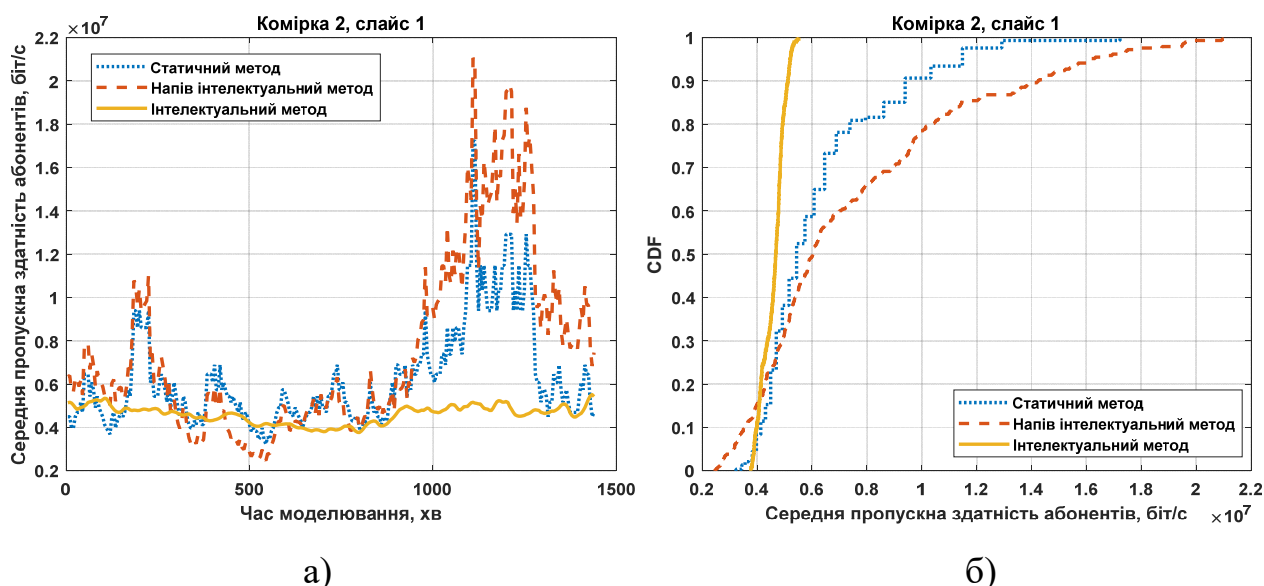
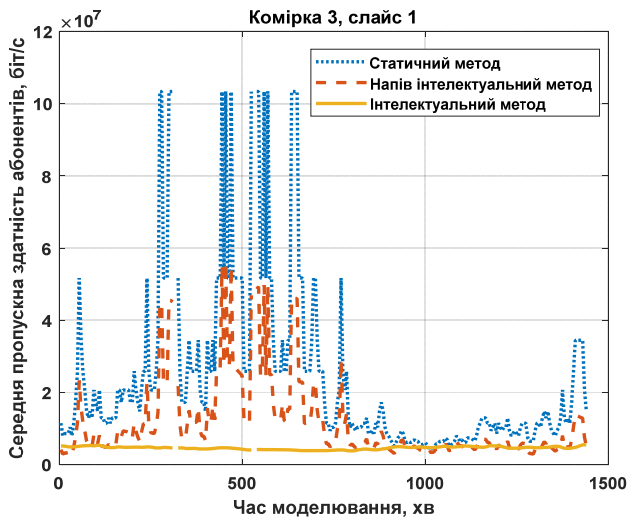
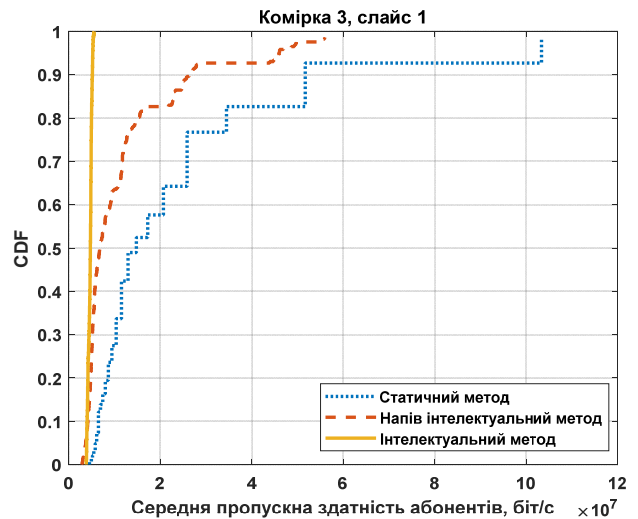


Рис. 4.28. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 2, слайсу 1, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

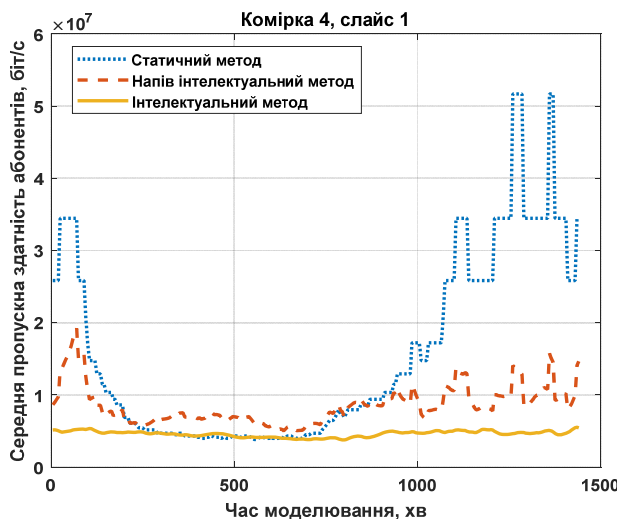


а)

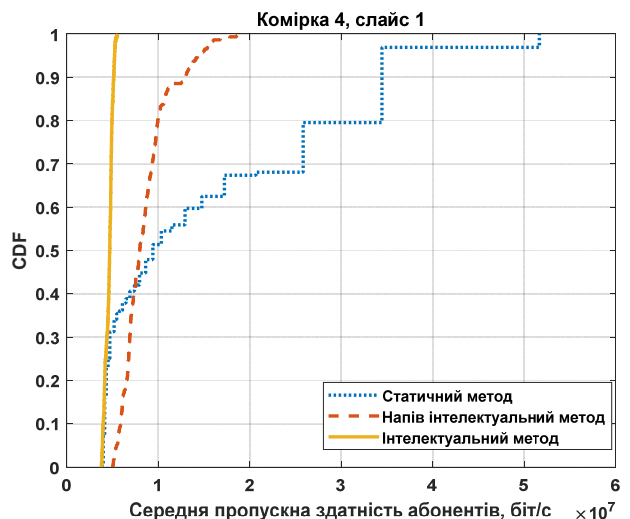


б)

Рис. 4.29. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 3, слайсу 1, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.



а)



б)

Рис. 4.30. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 4, слайсу 1, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

Як можна спостерігати із результатів, які представлені на рис. 4.27-4.38, запропонований метод забезпечує приблизно рівномірний розподіл пропускної здатності для кожного слайсу, у той час як для існуючих альтернатив характерні різкі флуктуації. Особливо різко це проявляється для випадку

статичного розподілу ресурсів, який є чутливим до зміни навантаження у комірках. Напів інтелектуальний метод дає змогу зменшити флуктуації, які пов'язані із загальним навантаженням у комірці, проте не враховує динаміку зміни відсоткової частки кожного слайсу, що впливає на коливання пропускної здатності [298-301].

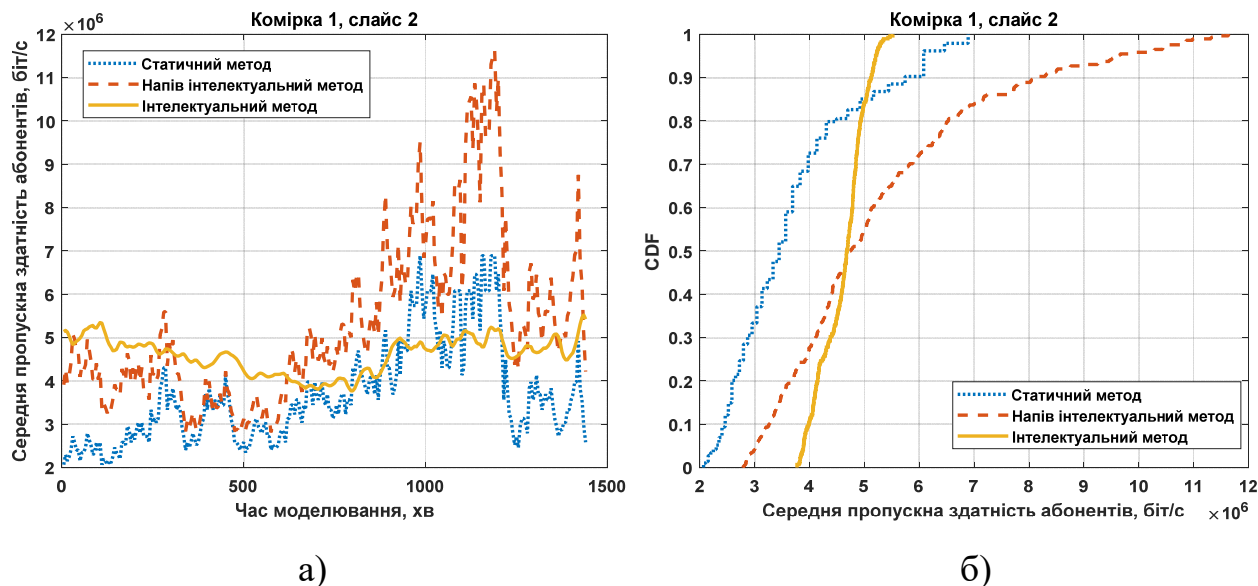


Рис. 4.31. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 1, слайсу 2, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

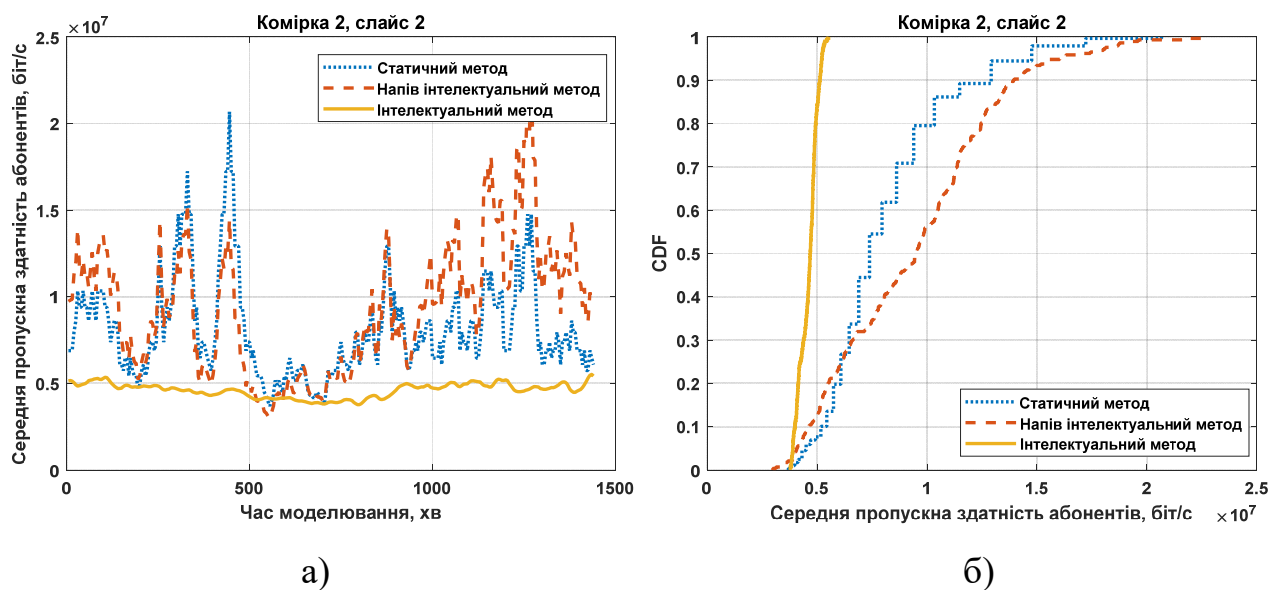


Рис. 4.32. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 2, слайсу 2, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

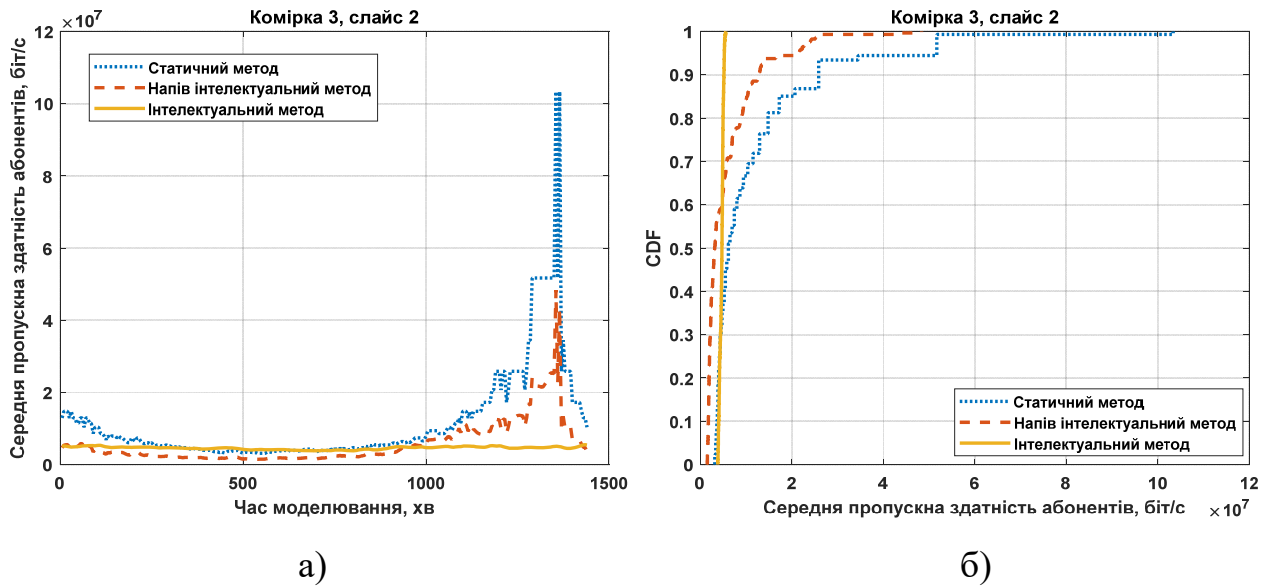


Рис. 4.33. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 3, слайсу 2, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

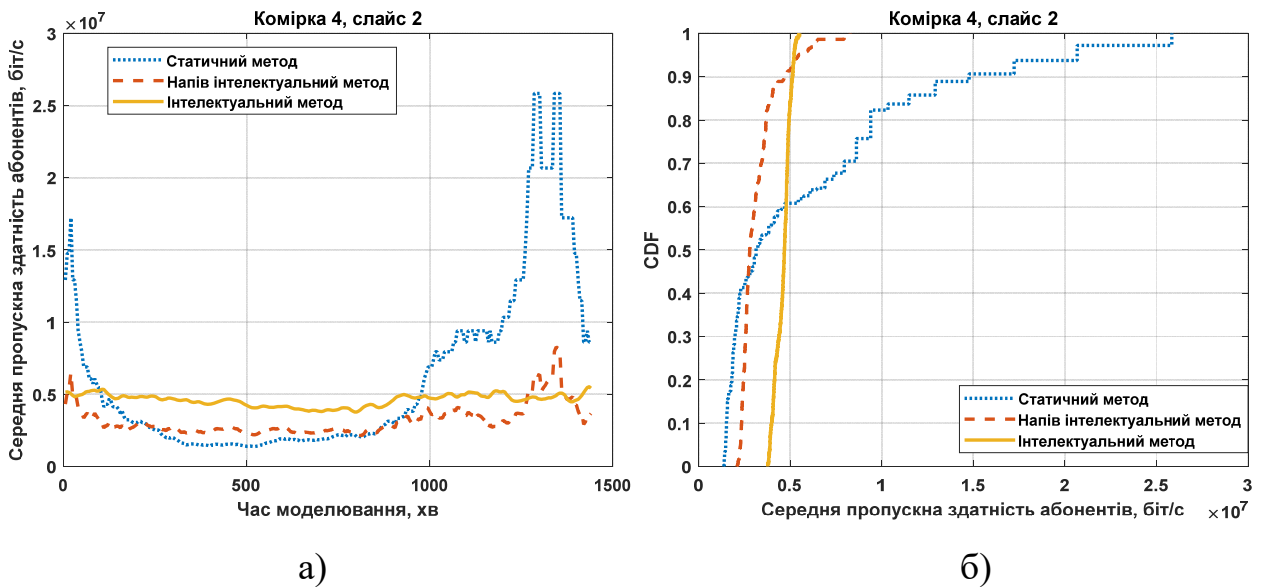


Рис. 4.34. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 4, слайсу 2, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

Для більш наглядного розуміння переваги запропонованого методу, на рис. 4.39 представлено порівняння обсягів радіочастотного ресурсу, які використовуються оператором при обслуговуванні абонентів трьох різних

слайсів. Отримані результати наглядно демонструють перевагу запропонованого методу інтелектуального управління, яка може виражатись як у зниженні обсягів використання радіочастотного ресурсу, так і у підвищенні якості обслуговування для абонентів.

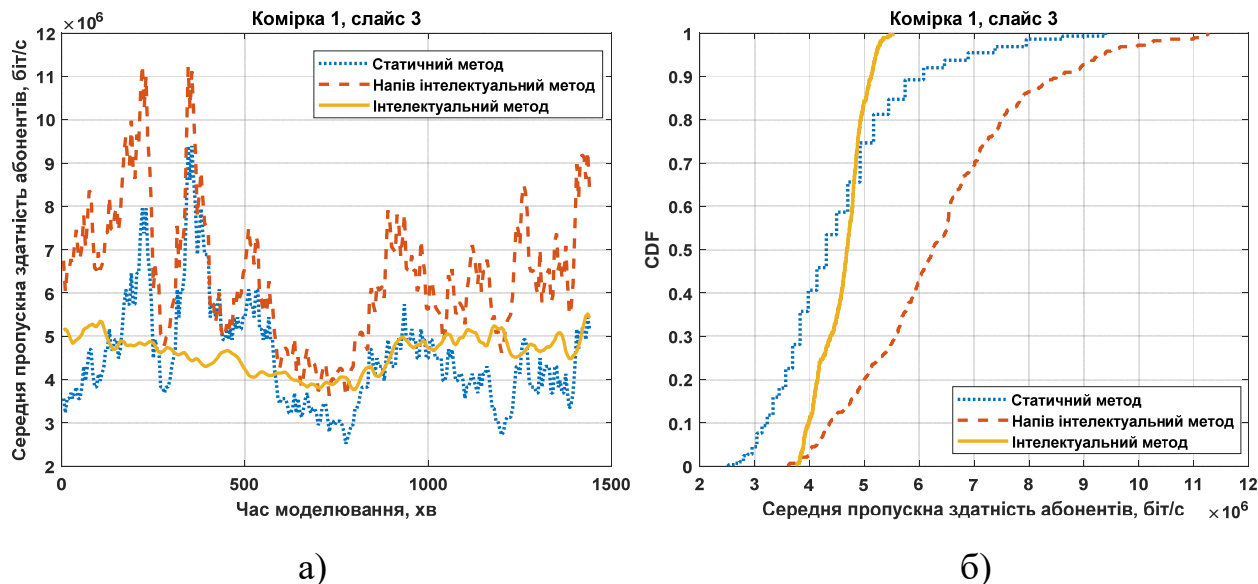


Рис. 4.35. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 1, слайсу 3, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

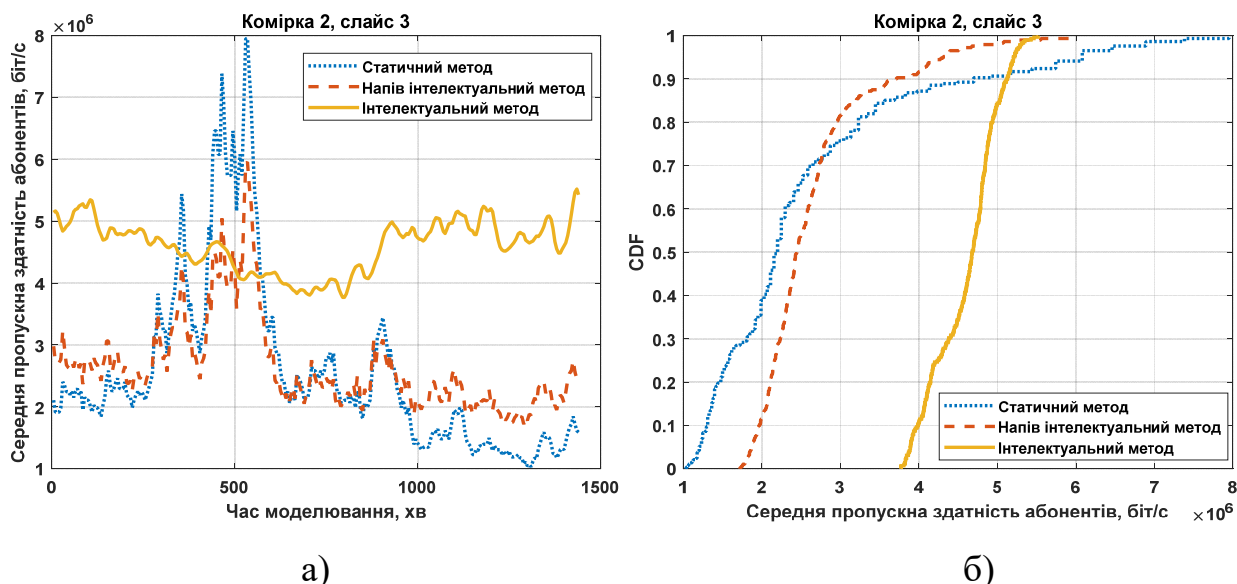


Рис. 4.36. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 2, слайсу 3, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

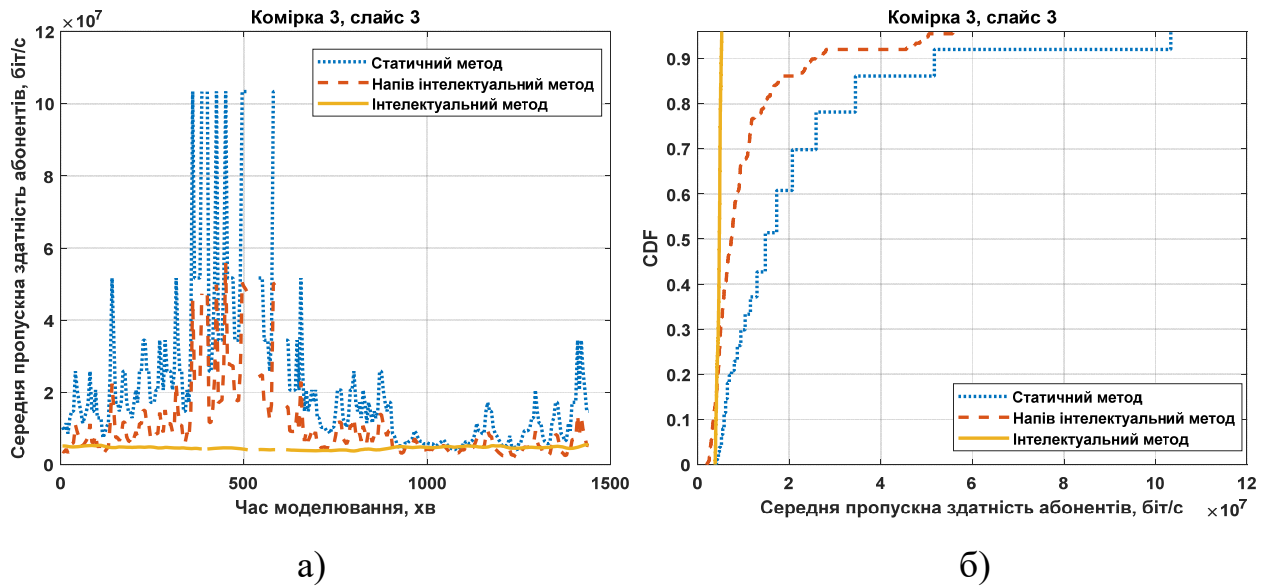


Рис. 4.37. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 3, слайсу 3, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

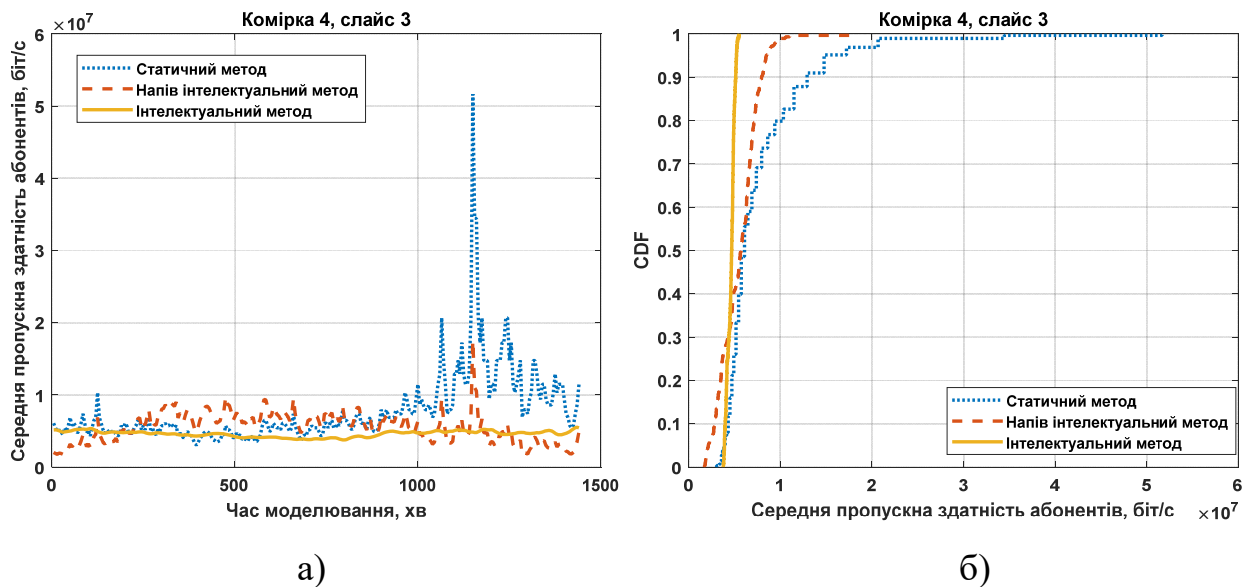


Рис. 4.38. Результати моделювання середньої пропускної здатності для абонентів комірки 4, слайсу 3, при різних методах управління радіочастотним ресурсом: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

Розглядаючи запропонований метод з точки зору техніко-економічних аспектів функціонування децентралізованих мереж, можна припустити, що він дає змогу операторам попередньо резервувати необхідні обсяги радіочастотного ресурсу для обслуговування прогнозованих запитів абонентів.

Це можна здійснювати як напряму при взаємодії із регулятором через блокчейн, так і при використанні запропонованої раніше моделі торгівлі радіочастотним ресурсом між операторами, шляхом адаптації ігрових стратегій операторів. Для визначення показників технічної та економічної ефективності, проведемо моделювання за аналогічним сценарієм до того, який був використаний у підрозділі 2.3.3. (рис. 4.40) [219, 298-301].

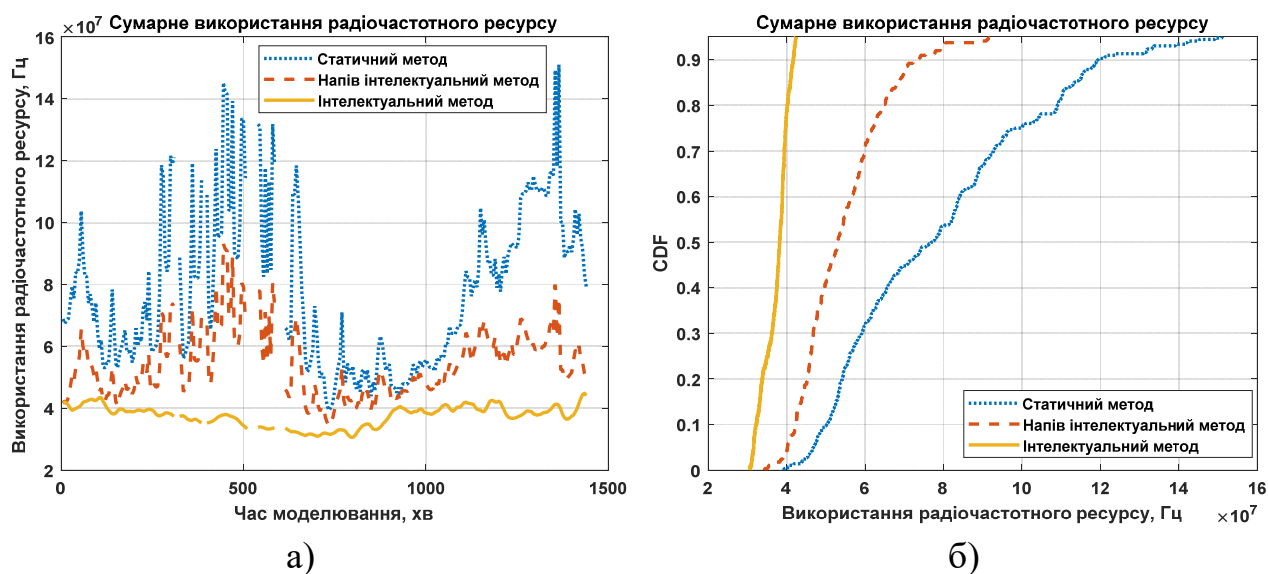


Рис. 4.39. Результати моделювання обсягу використання радіочастотного ресурсу при різних методах управління: а) – часова залежність, б) – кумулятивна функція розподілу.

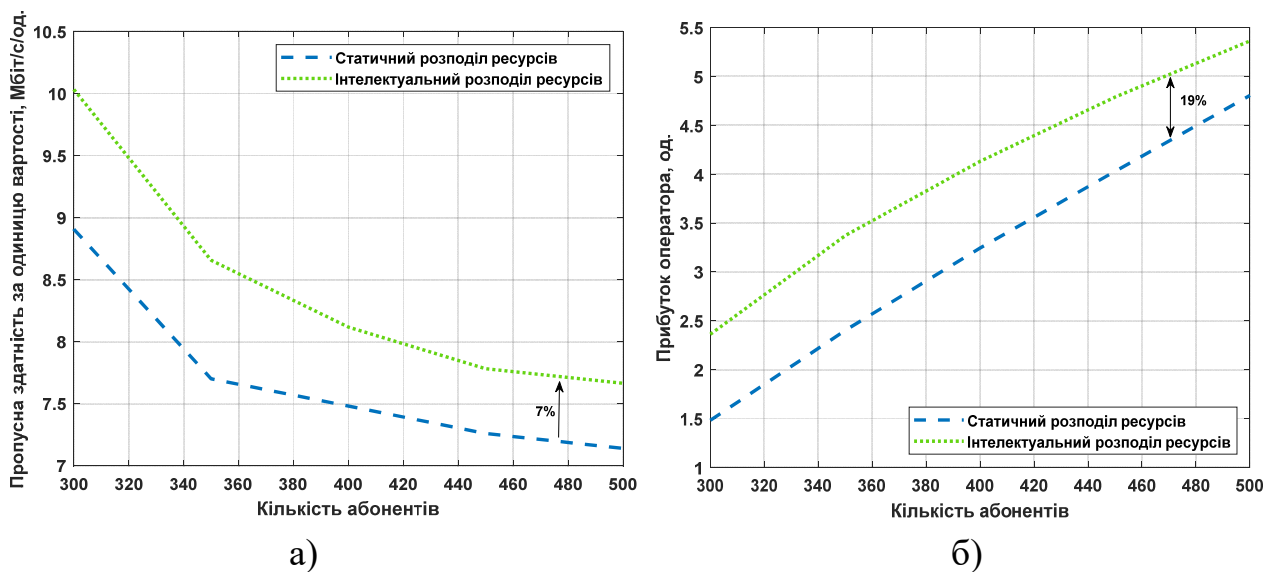


Рис. 4.40. Результати моделювання пропускної здатності абонента – а) та прибутку операторів – б) при інтелектуальному управлінні радіочастотними ресурсами.



З отриманих результатів, можна зробити висновок, що використання прогнозування трафіку дає змогу операторам більш точно виділяти ресурси для обслуговування запитів абонентів, що дає змогу знизити вартість сервісу до 7% при забезпеченні аналогічної якості обслуговування, або навпаки підвищити якість при аналогічній вартості сервісу (рис. 4.34,а). При цьому, варто зазначити, що чистий прибуток операторів при цьому не знижується а навпаки зростає до 19%, за рахунок значно вищої ефективності використання ресурсів, як показано на рис. 4.33 [219]. Крім того, запропонований метод аналогічно можна застосувати для оптимізації використання неліцензійного радіочастотного ресурсу з метою зниження інтерференційних завад між пристроями мереж мобільного зв'язку та пристроями мереж Wi-Fi [297].

Таким чином, синергічне поєднання запропонованих у розділі методів автоматизованого інтелектуального управління ліцензійним та неліцензійним радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку дає змогу забезпечити передумови для децентралізації ринку мобільного зв'язку із забезпеченням його технічної та економічної ефективності.

#### **4.6. Висновки до 4-го розділу**

1. Запропоновано техніко-економічну модель спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку на основі теорії ігор. Особливістю даної моделі є торгівля токенизованими активами радіочастотного ресурсу на основі смарт-контрактів між операторами, за правилами ринкової економіки. Результати моделювання показують, що запропонована модель дає змогу досягти еволюційно-стабільної рівноваги між ціновими політиками операторів, забезпечуючи при цьому лінійну залежність складності алгоритму від кількості абонентів. Експериментальні дослідження підтверджують ефективність розробленої моделі, з точки зору підвищення середньої пропускної здатності для абонентів до 30% та зменшення кількості відмов в обслуговуванні до 14%.

2. Запропоновано модель спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мобільного зв'язку, яка використовує смарт-контракти на основі кооперативної ігрової моделі. Результати моделювання показують, що запропонована модель досягає рівноваги Неша за незначну кількість ітерацій, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл доступу до неліцензійного частотного діапазону незалежно від кількості конкуруючих операторів. Для додаткового підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу в неліцензійному діапазоні розроблено алгоритм координованого прослуховування частотних каналів, який полягає у формуванні окремих груп абонентів з унікальними дискретними інтервалами прослуховування. Таким чином, вдалося знизити ймовірність одночасного передавання даних абонентами в неліцензійному діапазоні від 5 до 30%, а також підвищити середні значення пропускну здатності для абонентів до 35%.

3. Розвинуто метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку, шляхом прогнозування часових характеристик трафіку окремих типів сервісу з використанням глибоких рекурентних нейронних мереж. Розроблений алгоритм прогнозування дав змогу операторам мобільного зв'язку попередньо резервувати необхідні обсяги радіочастотного ресурсу для обслуговування запитів абонентів, що збільшило їх прибутки до 19% та підвищило пропускну здатність для абонентів до 7%.

## **РОЗДІЛ 5. МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ НАСКРІЗНОГО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО УПРАВЛІННЯ ІНФОРМАЦІЙНИМИ ПОТОКАМИ В РОЗПОДІЛЕНІЙ ТРАНСПОРТНІЙ ІНФРАСТРУКТУРІ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНИХ СИСТЕМ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

### **5.1. Проблема наскрізного управління інформаційними потоками в національному масштабі**

Враховуючи тенденції розвитку інфраструктури мереж 5G та перспективи їх подальшого розвитку до стандартів 6G, доцільно припустити, що обсяги трафіку, які будуть циркулювати у транспортних мережах, зростатимуть експоненційно. Саме тому, важливим аспектом при побудові децентралізованих систем мобільного зв'язку є наявність гнучкої та високоефективної транспортної інфраструктури, яка б дала змогу забезпечити передавання терабітних інформаційних потоків в національному та транснаціональному масштабі, забезпечуючи при цьому малий час затримки та високу надійність [302-325].

У попередніх розділах розглянуто принципи побудови та функціонування децентралізованої мережної інфраструктури на рівні сегментів мобільного доступу. Проте, враховуючи національні, і навіть транснаціональні масштаби розгортання децентралізованих мереж мобільного зв'язку, у операторів постає проблема забезпечення належного рівня якості обслуговування не лише в домені радіодоступу, але й у домені транспортної мережної інфраструктури [302-325].

Тому, даний розділ присвячений розробленню нових методів передавання та мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах зв'язку із врахуванням вимог до якості обслуговування різноманітних сервісів у мережах мобільного зв'язку.

Особливо важливим це питання постає в контексті стрімкого розвитку різноманітних мультимедійних сервісів, підвищення об'ємів передаваного контенту, розвитку хмарних обчислень та швидкого розгортання систем

Інтернет речей. Усі ці фактори підвищують абонентський попит на послуги зв'язку і спричиняють зростання сумарного інформаційного трафіку в телекомунікаційних мережах [302].

Для підтримки необхідних вимог до пропускну здатності, у мережах 5G масово використовуються високочастотні діапазони радіосигналів (міліметровий діапазон довжин хвиль), які забезпечують значно ширші смуги пропускання каналів зв'язку [44,45,302]. Проте, особливістю поширення радіохвиль міліметрового діапазону є значно менша відстань їх поширення за рахунок більшого загасання сигналу. Це призводить до того, що радіус дії таких комірок є значно меншим, що потребує значно більшої густини їх встановлення для забезпечення повсюдного високошвидкісного доступу для абонентів [302]. Орієнтовні оцінки експертів, вказують на те, що для забезпечення аналогічної території покриття, кількість базових станцій 5G повинна бути у 30-50 разів більшою, ніж для мереж 4G. Подальший розвиток технологій 6G, передбачає використання терагерцових діапазонів, що зменшить радіус поширення сигналу до кількох метрів, і потребуватиме встановлення у сотні разів більшої кількості елементів інфраструктури мобільного зв'язку навіть у порівнянні зі мережами 5G. Це спричиняє ряд завдань, які необхідно розв'язати для того, щоб забезпечити можливість повсюдного покриття території якісним мобільним зв'язком 5G, а в перспективі також 6G і подальших поколінь [302].

Перше завдання лежить у економічній площині операторів, яким необхідно фізично інвестувати значно більше коштів у розбудову мережної інфраструктури. Розв'язок даного завдання представлений у попередніх розділах роботи шляхом забезпечення можливості локального функціонування операторів, децентралізованого розгортання мережної інфраструктури, а також методів спільного використання радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури усіма операторами [219,233,258].

Проте, є ще одне нерозв'язане завдання, яке полягає у необхідності підключення усієї множини базових станцій до глобальної мережі Інтернет,

враховуючи високу щільність їх встановлення. Враховуючи дані особливості, постає проблема інтеграції децентралізованої мережної інфраструктури мобільного зв'язку в межах існуючої інфраструктури оптичних транспортних мереж та мереж доступу [302-325].

У мережах попередніх поколінь включно до 4G, базові станції взаємодіють із глобальною мережею Інтернет опосередковано через ядро мережі. У даній роботі, розглядається децентралізований підхід, при якому базові станції мають змогу безпосередньо підключатися до мережі Інтернет для взаємодії із віртуалізованими функціями ядра мережі 5G будь-якого оператора, які розгортаються у вигляді віртуальних машин або контейнерів у інфраструктурі хмарних або граничних обчислень. Таким чином, існуючі оптичні транспортні мережі повинні трансформуватись для більш гнучкого управління інформаційними потоками на рівні окремих базових станцій gNB або централізованих вузлів CU [303-307].

Зазвичай, оптична транспортна інфраструктура належить великим приватним або державним операторам, оскільки її побудова та експлуатація є надзвичайно дорогими як з точки зору початкових капіталовкладень, так і з точки зору постійної підтримки в процесі експлуатації. Тому, в рамках даного дисертаційного дослідження приймається припущення про те, що при децентралізованому розгортанні інфраструктури мереж мобільного зв'язку, інфраструктура оптичних транспортних мереж та оптичних мереж доступу вже є в наявності, і може використовуватись для підключення базових станцій [303].

Таким чином, у роботі пропонується удосконалення методів управління інформаційними потоками у існуючій розподіленій транспортній інфраструктурі, для того щоб ефективно пов'язати сегменти децентралізованих мереж мобільного зв'язку із забезпеченням наскрізного управління якістю інформаційних послуг для абонентів, незалежно від того який оператор їх обслуговує [303-309].

Першочерговим завданням є підключення базових станцій до існуючої інфраструктури оптичних мереж доступу. Переважно мережі доступу FTTx (Fiber-to-the-Everything), які функціонують на базі технології пасивних оптичних мереж доступу PON (Passive Optical Networks) вже існують в міських та приміських районах, де буде широко розгортатись інфраструктура мереж мобільного зв'язку. Поточні можливості масштабованості мереж PON дають змогу підключати надзвичайно велику кількість базових станцій 5G, що згідно з дослідженнями Bell Labs, дає змогу операторам мобільного зв'язку знизити вартість розгортання мереж мобільного зв'язку до 50% [302-304].

Процес використання волоконно-оптично інфраструктури операторів фіксованого зв'язку в запропонованій децентралізованій архітектурі технічно та економічно нічим не відрізняється від принципів спільного використання інфраструктури мереж мобільного зв'язку, оскільки його можна реалізувати на основі запропонованої у другому розділі моделі токенизації, яка дає змогу операторам орендувати транспортні канали зв'язку використовуючи транзакції у мережі блокчейн [219]. Проте, окрім фізичної доступності оптичних мереж доступу, важливо гарантувати забезпечення вимог до таких важливих показників якості функціонування як пропускна здатність та затримка, а також підтримують механізми динамічного управління ресурсами для забезпечення наскрізної якості обслуговування інформаційних потоків мереж мобільного зв'язку [310-312].

Сучасні технології дають змогу забезпечити симетричний канал з пропускною здатністю 25 Гбіт/с без суттєвої модернізації існуючої мережної інфраструктури. Це дає змогу розглядати пасивні оптичні мережі, як перспективну технологію для забезпечення транспортної інфраструктури для мереж мобільного зв'язку, що додатково підтверджується рекомендаціями ІТУ (International Telecommunication Union) для розгортання мереж 5G [307].

Іншим аспектом, який потребує вирішення є питання часу затримки в процесі узгодження каналу зв'язку між вузлами OLT (Optical Line Terminal) та ONU (Optical Network Unit). Для цього запропоновано технологію СТІ

(Cooperative Transport Interface), яка на сьогоднішній час знаходиться в стадії стандартизації [313]. Технологія СТІ дає змогу планувальнику ресурсів на стороні базової станції або вузла DU повідомляти вузол OLT про наявність майбутніх запитів на використання транспортних каналів зв'язку. Такий підхід гарантує, що трафік мережі мобільного зв'язку має пріоритет над іншими типами трафіку у мережі PON. За рахунок попереднього резервування ресурсів, затримка в процесі їх розподілу для базової станції знижується з 1500 мкс до 10 мкс, що дає змогу мережі PON відповідати вимогам до затримки для будь-яких відомих на сьогодні сервісів у мережах 5G [56]. Даний метод вдало узгоджується із запропонованим у дисертаційній роботі методом адаптивного вибору оператора, що дає змогу операторам зарезервувати ресурси оптичної транспортної мережі для трафіку абонента ще до початку його обслуговування [219,233].

Крім того, у попередньому розділі запропоновано метод адаптивного розподілу радіочастотного ресурсу з урахуванням вимог окремих мережних слайсів. Для узгодження із даним методом, важливо щоб мережа PON також підтримувала логічне розділення ресурсів на віртуальні слайси, кожен з яких має забезпечувати власні вимоги до пропускної здатності. При цьому, важливо щоб віртуальні слайси можна було розділяти не лише між типами сервісу але й між різними операторами в децентралізованій мережі мобільного зв'язку [304-307].

## **5.2. Розроблення методу інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу**

### **5.2.1. Модель інтеграції децентралізованих систем мобільного зв'язку в рамках інфраструктури розподілених оптичних мереж доступу**

Як вже зазначалося у другому розділі, у мережах 5G використовується ієрархічний принцип побудови мережної інфраструктури. Враховуючи високу щільність базових станцій 5G, використання класичних принципів побудови мережі радіодоступу є суттєво ускладненим як з точки зору сегментів

безпроводного доступу, так і з точки зору оптичної мережної інфраструктури. Тому, у мережах 5G більшість функцій базової станції перенесено до розподілених вузлів DU та централізованих вузлів CU. При цьому, до розподілених вузлів DU переносяться функції планування ресурсів, які є чутливими до затримки, а до вузлів CU – більш загальні функції управління, які є менш чутливими до затримки [145,235]. Загальна архітектура пасивної оптичної мережі доступу, яка інтегрує ієрархічну модель побудови мереж мобільного зв'язку представлено на рис. 5.1. [302,303]

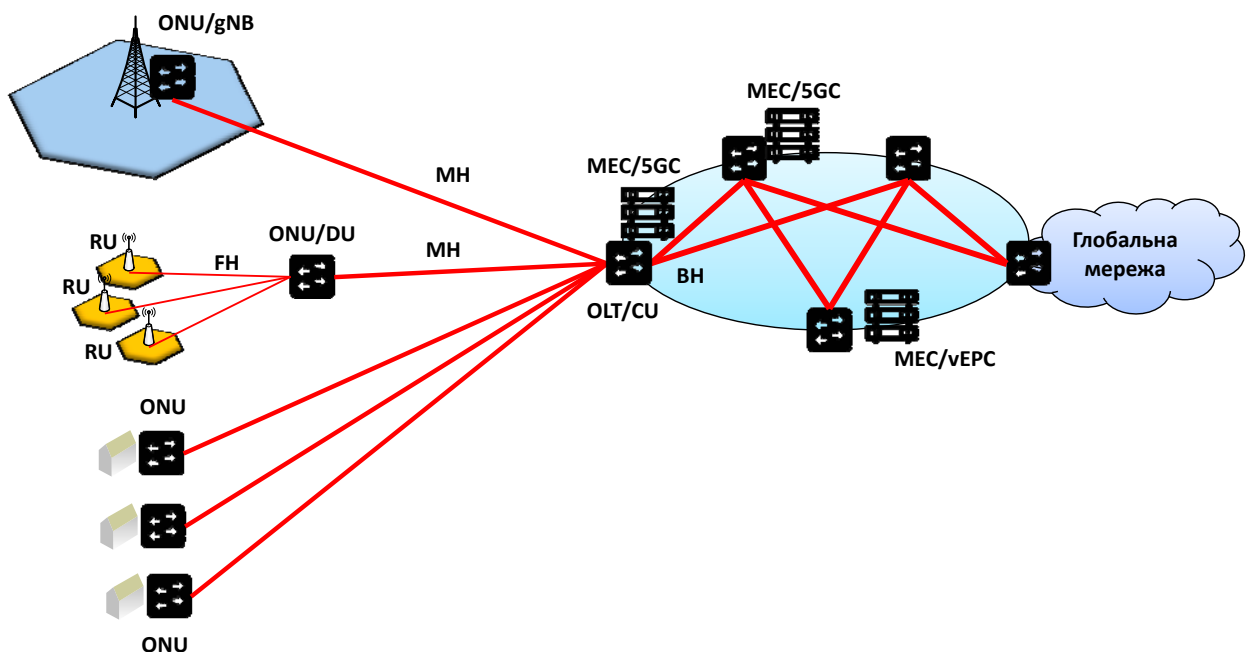


Рис. 5.1. Загальна архітектура пасивної оптичної мережі доступу з інтеграцією децентралізованих мереж мобільного зв'язку.

Представлена на рис. 5.1. архітектура розділяє три типи транспортних каналів зв'язку, з різними вимогами до пропускної здатності та затримки.

До першого відносяться канали ВН (Backhaul), які забезпечують опорну транспортну інфраструктуру для підключення вузлів CU. Такі канали характерні гнучкими вимогами до пропускної здатності та затримки. До другого типу відносяться канали МН (Midhaul), які забезпечують взаємодію вузлів CU з відповідними їм вузлами DU. Канали МН потребують вищої пропускної здатності, і допускають затримку до 8 мс. То третього типу



відносяться канали FH між вузлами DU та кінцевими радіопередавачами RU. Особливістю каналів FH є високі вимоги як до пропускної здатності, так і до затримки. Це пов'язано з тим, що усі функції обробки сигналів на рівнях L1/L2 здійснюються безпосередньо у вузлі DU. Таким чином, готові сигнальні конструкції передаються по каналах FH до відповідних вузлів RU, які передають їх у радіоканали до абонентів. Враховуючи особливості перетворення радіосигналів для їх передавання у волоконно-оптичних лініях зв'язку, канали FH повинні забезпечувати пропускну здатність від 10 до 25 Гбіт/с, в залежності від сумарної пропускної здатності комірок, забезпечуючи при цьому затримку не більше 100 мкс, що дає змогу парі DU-RU функціонувати як одна логічна базова станція [145,235,303,305,307].

### 5.2.2. Методи та моделі мультиплексування потоків мереж мобільного зв'язку в розподілених оптичних мережах доступу

Враховуючи вимоги децентралізованої інфраструктури мобільного зв'язку, безпосереднє мультиплексування трафіку мереж мобільного зв'язку паралельно з вже існуючими мережами доступу є неефективним рішенням для мереж 5G.

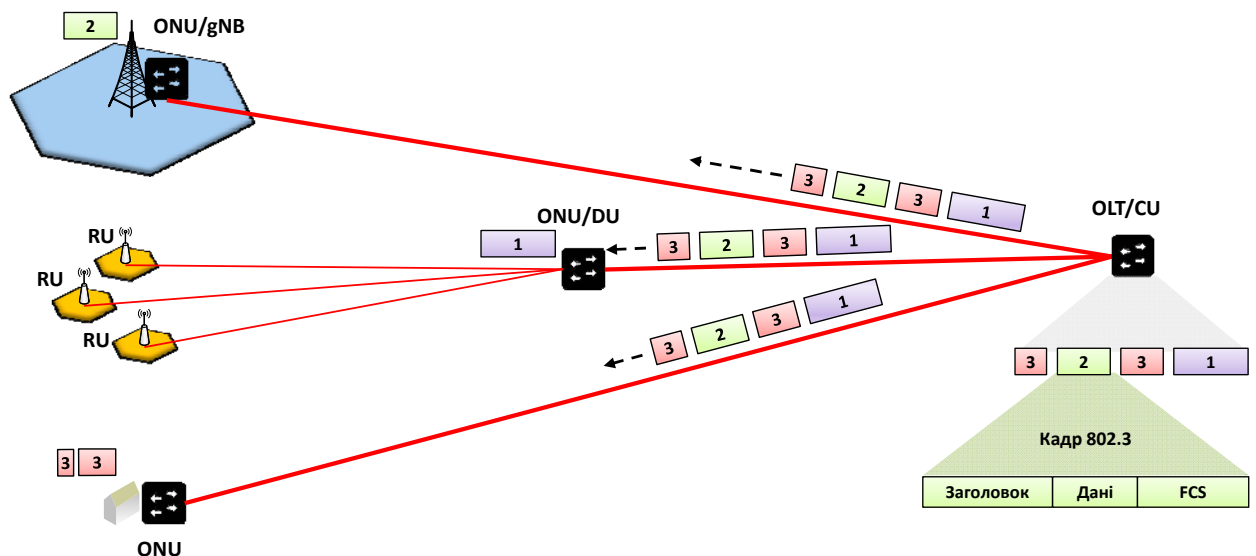


Рис. 5.2. Часове мультиплексування інформаційних потоків мережі PON у низхідному каналі.

Класичний метод мультиплексування достатньо ефективно працює у низхідному каналі, за рахунок того що передавання інформаційного потоку

здійснюється від вузла OLT до усіх вузлів ONU шляхом ширококомовної розсилки. Вузли ONU, в свою чергу, зчитують заголовки кадрів PCBd (Physical Control Block downstream) для того, щоб виявити дані, які призначені для них. Така схема мультиплексування дає змогу OLT гнучко розподіляти інформаційні потоки між ONU у відповідності до поточних потреб відповідних сегментів фіксованого та мобільного зв'язку (рис. 5.2) [303].

Проте, додаткова складність виникає при необхідності передавання даних у висхідному каналі зв'язку. Оскільки, вузли ONU не можуть передавати дані одночасно, для кожного з них виділяється слот фіксованого розміру, який узгоджується між вузлами на основі протоколу MPCP (Multi-Point Control Protocol), що вносить додаткову затримку та знижує ефективність використання пропускної здатності каналів зв'язку (рис. 5.3) [303].

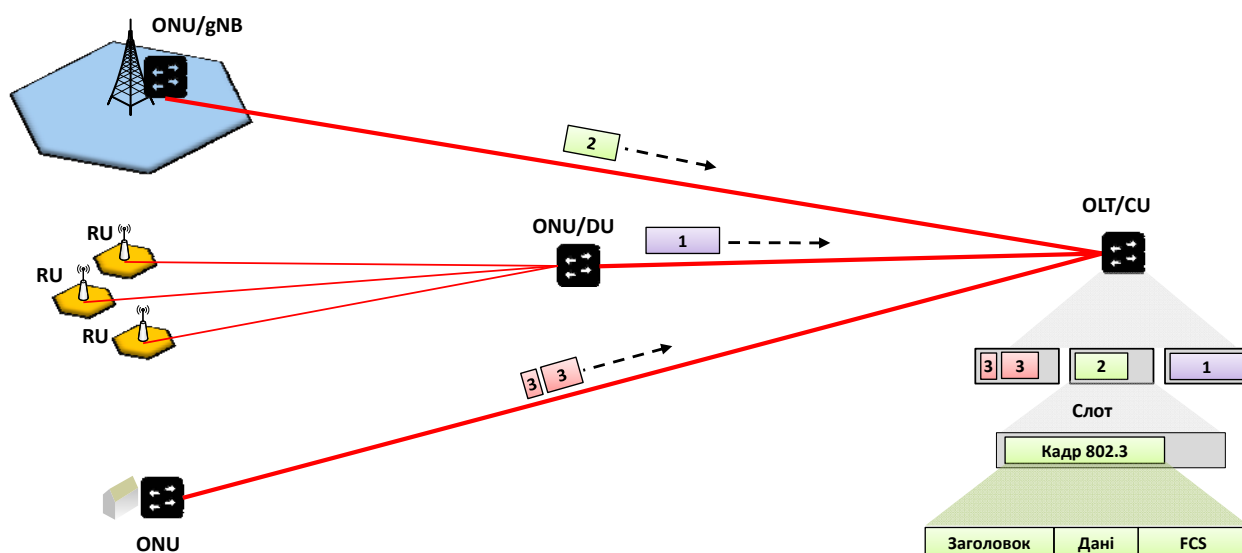


Рис. 5.3. Часове мультиплексування інформаційних потоків мережі PON у висхідному каналі.

Тому, для підвищення ефективності функціонування інфраструктури пасивних оптичних мереж, запропоновано модифікований метод мультиплексування інформаційних потоків на рівні мережі мобільного доступу, який представлено на рис. 5.4-5.5 [303-307].

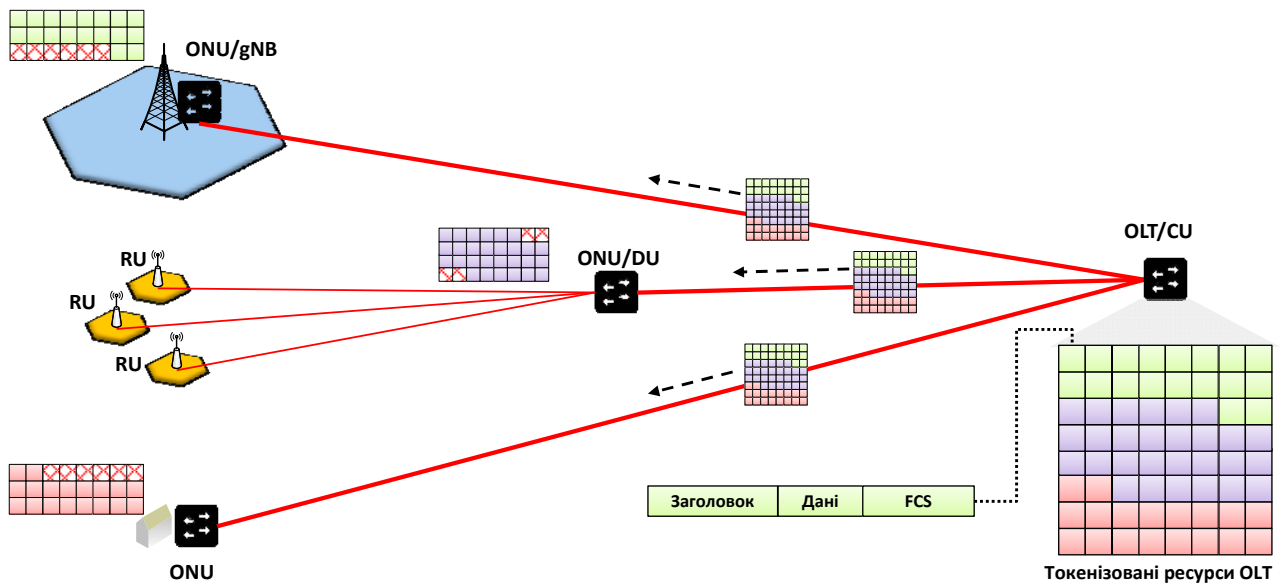


Рис. 5.4. Частотно-часове мультиплексування інформаційних потоків мережі PON у низхідному каналі.

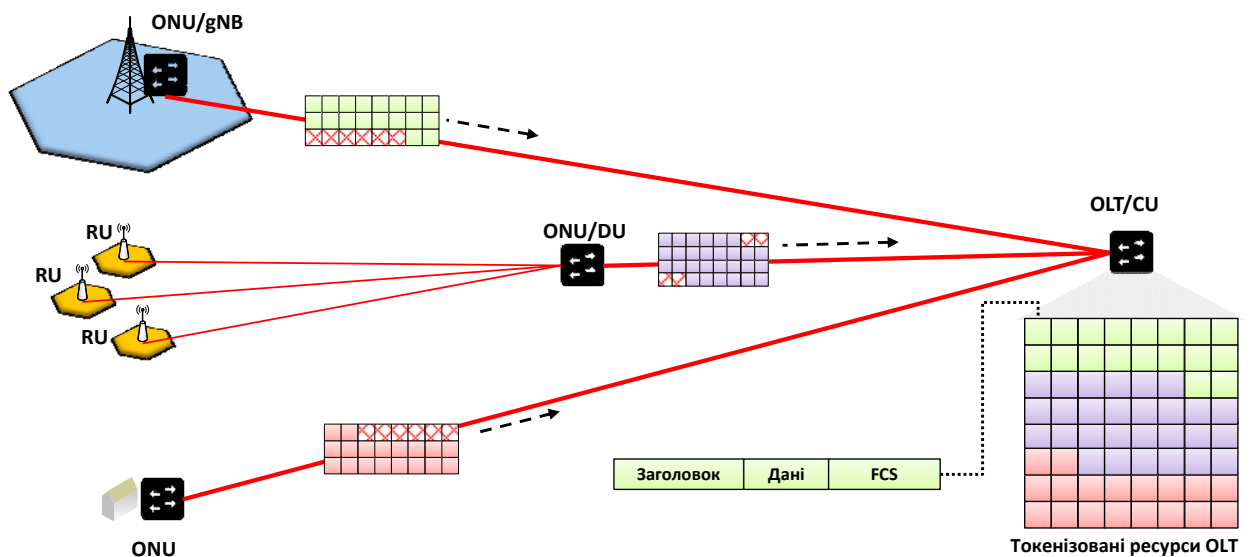


Рис. 5.5. Частотно-часове мультиплексування інформаційних потоків мережі PON у висхідному каналі.

Ключовою відмінністю запропонованого методу, є удосконалений розподіл каналних ресурсів у вузлі OLT на основі формування частотно-часових каналних інтервалів з фіксованою структурою, яка є уніфікованою для обох напрямків передавання.

Математично, каналні ресурси при використанні запропонованого методу представляються у вигляді матриці кадрів  $S \in \mathbb{R}^{A \times T}$ :

$$\underline{\mathbf{S}} = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1T} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{\Lambda 1} & s_{\Lambda 2} & \cdots & s_{\Lambda T} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{\Lambda \times T}, \quad (5.1)$$

де найменша складова ресурсу, яка може виділятися для ONU визначається як часовий канал  $\tau$  на довжині хвилі  $\lambda$  :

$$s_{\lambda, \tau} = \underline{\mathbf{S}}(\lambda, \tau). \quad (5.2)$$

В залежності від розмірів сегменту мережі доступу та кількості ONU, які обслуговуються одним OLT розподіл каналних інтервалів у часовому домені у матриці (5.1) може бути різним для кожного OLT. Розподіл у частотному домені залежить лише від конфігурації спектрального ущільнення каналів, яка використовується в мережі WDM (Wavelength Division Multiplexing)-PON. На даний час, використовуються конфігурації від 4 до 16 довжин хвиль в одному напрямку передавання, але активно ведуться дослідження і тестування більш щільних систем WDM на рівні мереж PON. Проте, структура каналних ресурсів повинна встановлюватись при початковій конфігурації мережі та залишатись постійною до моменту наступної конфігурації [303-307].

Використання запропонованого методу розподілу частотно-часових каналів у вузлі OLT забезпечує ряд переваг над класичним методом, який використовується у мережах PON з точки зору процесу функціонування децентралізованих систем мобільного зв'язку [303-307].

Перша перевага полягає у використанні симетричного розподілу каналів для низхідного та висхідного напрямків передавання, як показано на рис. 5.6. Особливістю такого розподілу, є використання сталої періодичної структури ресурсів, по аналогії із розподілом радіочастотних ресурсів у мережах LTE/5G. Це дає змогу забезпечити автоматизоване резервування ресурсів для висхідного каналу, за рахунок того, що у заголовок PCBd кадру Ethernet у низхідному каналі додається один біт. Даний біт при значенні 1, вказує вузлу ONU на те, що для нього попередньо зарезервованій дзеркальний частотно-часовий канал у висхідному напрямку передавання, а при значенні 0 – на те, що попереднє

резервування дзеркального частотно-часового каналу у висхідному напрямку передавання для даного ONU відсутнє. Відповідно до цього, у висхідному напрямку ONU здійснює передавання даних у попередньо-зарезервованих каналах відповідно до пріоритету сервісу, і повідомляє OLT про свої поточні потреби у ресурсах у висхідному каналі. При необхідності у додаткових ресурсах, або їх надлишку для ONU, OLT здійснює перерозподіл каналів між усіма ONU у наступному фреймі, оновлюючи при цьому інформацію про попереднє резервування ресурсів. Таким чином, OLT може резервувати частину ресурсів для вузлів ONU у висхідному каналі, без додаткової затримки на очікування [303-307].

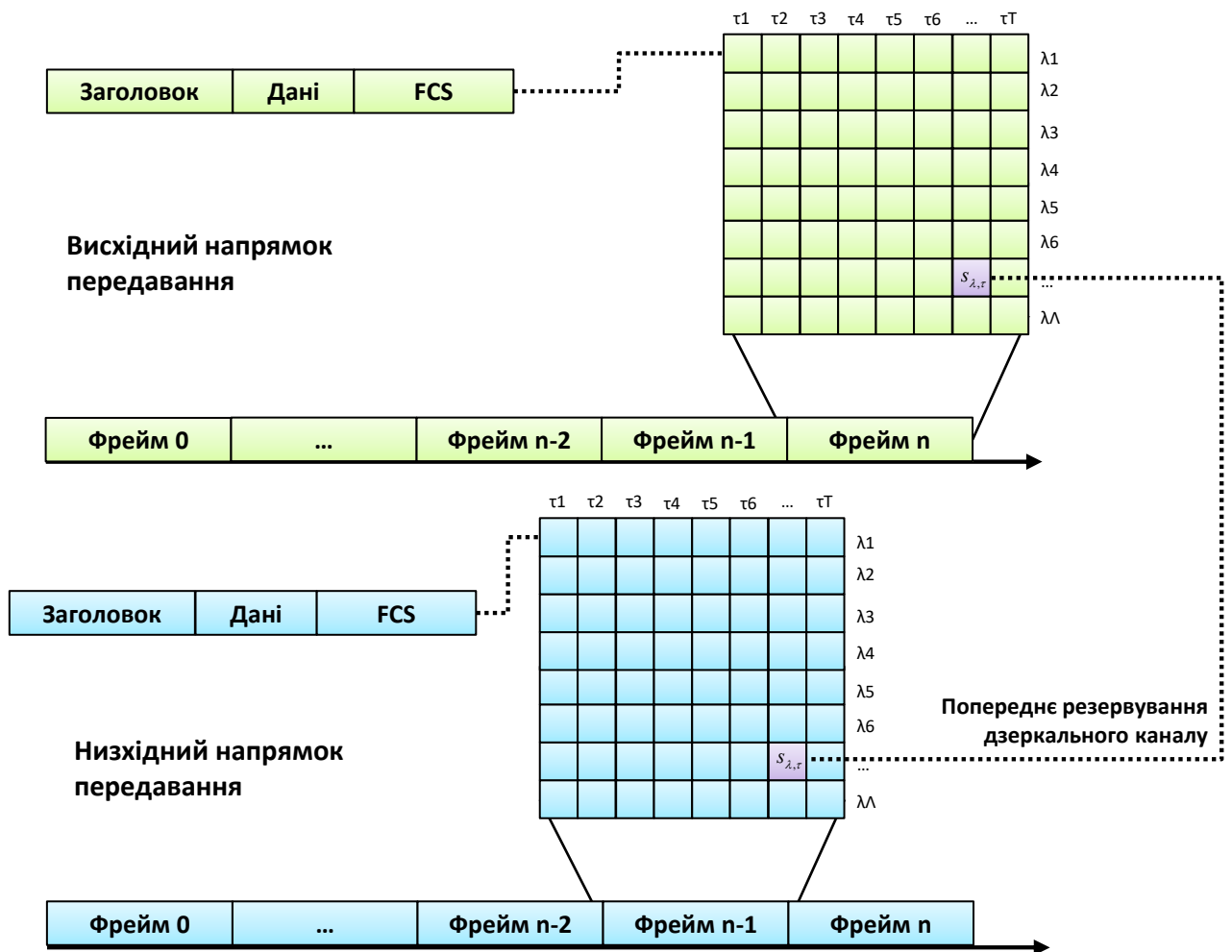


Рис. 5.6. Запропонована модель частотно-часового розділення каналів у пасивній оптичній мережі.

Другою перевагою представленої на рис. 5.6. моделі розподілу є можливість

токенізації ресурсів вузла OLT, для забезпечення можливості їх децентралізованого використання різними операторами мобільного зв'язку [219,240,241,303-307].

Токенізація ресурсів стала можливою за рахунок можливості постійного виділення каналів у фіксованій структурі ресурсів оптичної мережі доступу. Таким чином, окрім забезпечення децентралізації на рівні систем мобільного зв'язку, що було досягнуто у попередніх розділах, у даному розділі забезпечується можливість децентралізації оптичних мереж доступу, шляхом утворення кількох віртуальних мереж різних операторів в рамках спільної інфраструктури оптичних мереж доступу. Відповідно до запропонованої у другому розділі моделі токенізації введемо токен оптичної мережі [2019].

*Токен оптичної мережі (ONT – Optical Network Token)* – це цифровий еквівалент мінімального віртуального каналу в пасивній оптичній мережі доступу, який може торгуватись операторами. ONT формується як хеш-функція, яка враховує пару вузлів  $ONU_m, OLT_n$ , які утворюють канал  $s_{\lambda,\tau}$  відповідно до виразу (5.2):

$$ONT_{m,n,\lambda,\tau} = f(ONU_m, OLT_n, s_{\lambda,\tau}) \quad (5.3)$$

Для більш наглядного представлення, запропонований принцип токенізації оптичної мережної інфраструктури PON, на рис. 5.7 представлено приклади різних комбінацій токенізованих віртуальних каналів. Зокрема, оператор 1 повністю використовує довжини хвиль  $\lambda_2, \lambda_3$  у системі WDM-PON, а також майже усі часові канали на довжині хвилі  $\lambda_1$ , за винятком  $\tau_1$ . В свою чергу, оператор 2, який обслуговує значно більші інформаційні потоки, використовує повністю решту довжин хвиль  $\lambda_4 - \lambda_\lambda$  у системі WDM-PON. Третій оператор, який обслуговує невеликі обсяги трафіку (наприклад системи телеметрії IoT), використовує лише один часовий канал на довжині хвилі  $\lambda_1$  [219,303-307].

Розроблена модель дає змогу застосувати запропоновані у 4 розділі методи спільного використання ресурсів на основі теорії ігор до ресурсів оптичних мереж доступу, шляхом використання аналогічного дискретного простору

цінових стратегій, представленого виразом (4.7), до торгівлі віртуальними каналами оптичної мережної інфраструктури PON [233].

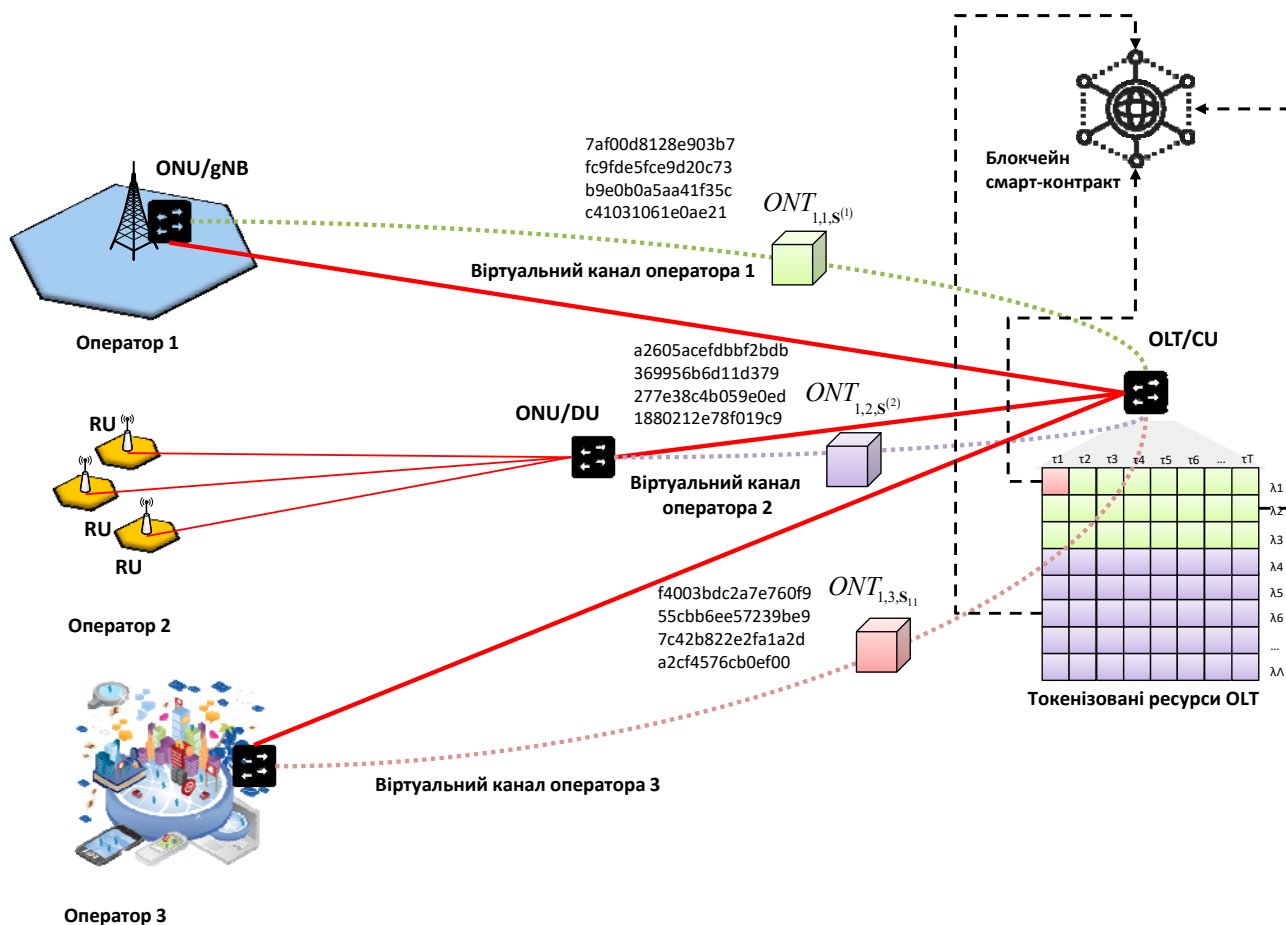


Рис. 5.7. Запропонована модель децентралізованого розподілу ресурсів у пасивних оптичних мережах з використанням токенізації частотно-часових каналів.

### 5.2.3. Удосконалений метод інтелектуального прогнозування потоків в розподіленій оптичній інфраструктурі децентралізованих систем мобільного зв'язку

Враховуючи екзогенну динаміку мережі мобільного зв'язку, а також результати досліджень, які представлені у попередніх розділах, доцільно припустити, що розподіл інформаційних потоків між вузлами ONU аналогічно буде змінюватись в динаміці в залежності від того, як змінюється трафік базових станцій, які до них під'єднані. Тому, важливим аспектом для ефективного функціонування усієї інфраструктури оптичних мереж доступу, є

прогнозування сумарного трафіку у мережі на рівні окремих слайсів та на рівні операторів. Це важливо для того, щоб забезпечити ефективний розподіл частотно-часових каналів у вузлі OLT між вузлами ONU [303-312].

Для формалізації даного завдання важливо представити сумарний інформаційний потік кожного вузла OLT у формі, яка дасть змогу здійснювати адекватне прогнозування значень трафіку, з урахуванням різних комбінацій. Для спрощення математичної моделі, прийнемо, що один вузол ONU відповідає одній базовій станції, яка може обслуговуватись одним оператором. Якщо розглянути усі складові з яких формується інформаційний потік у вузлі ONU, то вираз (2.12), який виведений у 2 розділі, можна спростити до наступного:

$$f_n(t) = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l (f_{i,j,k,l}(t) \cdot c_{l,n}(t)), \text{ при } \sum_l \sum_n c_{l,n}(t) = L, \quad (5.4)$$

де  $l = \{1, 2, \dots, L\}$  та  $n = \{1, 2, \dots, N\}$  – множини базових станцій та вузлів OLT, відповідно,  $\underline{C} \in \mathbb{R}^{L \times N}$  – матриця взаємозв'язків, елементи якої можуть набувати значення 0 або 1:

$$c_{l,n} = \begin{cases} 1, & \text{якщо існує зв'язок між } gNB_l \text{ та } OLT_n \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}. \quad (5.5)$$

Вираз (5.4) представляє суму інформаційних потоків усіх абонентів, які проходять через кожен вузол OLT  $n$ . При цьому, враховуючи, що розглядати трафік одного абонента в контексті управління гігабітними інформаційними потоками недоцільно, вираз (5.4) можна звести до форми:

$$f_n(t) = \sum_j \sum_k \sum_l (f_{j,k,l}(t) \cdot c_{l,n}(t)), \text{ при } \sum_l \sum_n c_{l,n}(t) = L \quad (5.6)$$

Вираз (5.6) представляє суму інформаційних потоків усіх типів сервісу, які проходять через базові станції (вузли DU), що є безпосередньо підключеними до вузла OLT та обслуговуються різними операторами. З точки зору управління ресурсами оптичної мережі доступу важливими є значення сумарних інформаційних потоків для кожного мережного слайсу, для розподілу ресурсів у відповідності до їх пріоритету:



$$f_{j,n}(t) = \sum_k \sum_l (f_{j,k,l}(t) \cdot c_{l,n}(t)), \text{ при } \sum_l \sum_n c_{l,n}(t) = L. \quad (5.7)$$

Аналогічно, враховуючи децентралізацію мережі та можливість спільного використання оптичної мережної інфраструктури усіма операторами важливими є значеннями сумарних інформаційних потоків кожного оператора у вузлі ONU, що дає їм змогу формувати власні стратегії торгівлі ресурсами для балансування витрат та прибутків від обслуговування абонентів:

$$f_{k,n}(t) = \sum_j \sum_l (f_{j,k,l}(t) \cdot c_{l,n}(t)), \text{ при } \sum_l \sum_n c_{l,n}(t) = L. \quad (5.8)$$

Для представлення сумарного інформаційного потоку у вузлі OLT  $n$ , через часткові потоки вузлів ONU  $m$  запишемо вираз наступним чином:

$$f_n(t) = \sum_m (f_{n,m}(t) \cdot c_{n,m}(t)), \text{ при } \sum_n \sum_m c_{n,m}(t) = M \quad (5.9)$$

де  $m = \{1, 2, \dots, M\}$  – множина вузлів ONU,  $\underline{C} \in \mathbb{R}^{M \times N}$  – матриця взаємозв'язків, елементи якої можуть набувати значення 0 або 1:

$$c_{m,n} = \begin{cases} 1, & \text{якщо існує зв'язок між ONU}_m \text{ та OLT}_n \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}. \quad (5.10)$$

Схематичне представлення інформаційних потоків у вузлі OLT для різних варіантів поєднання трафіку представлено на рис. 5.8.

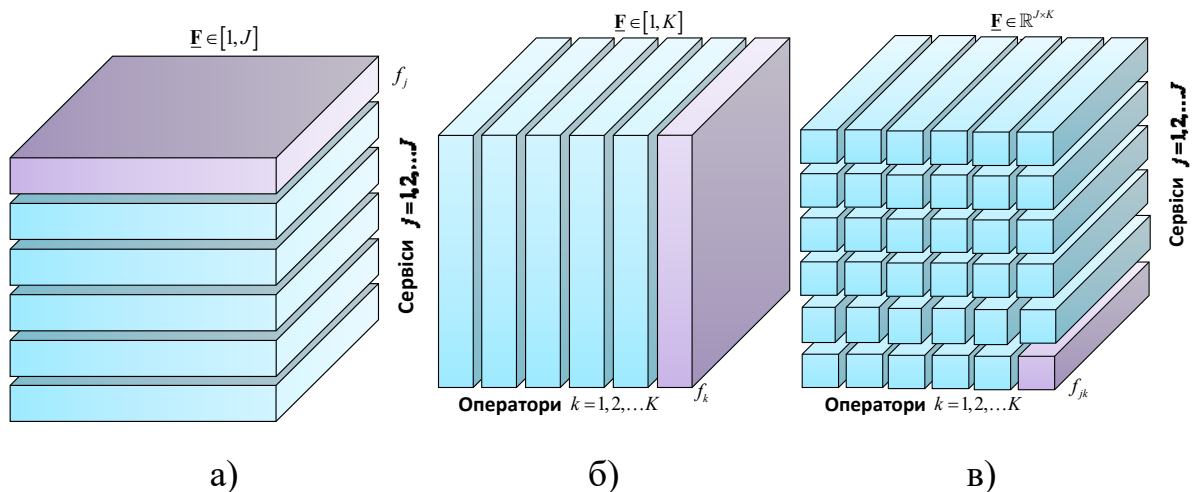


Рис. 5.8. Схематичне представлення інформаційних потоків у вузлі OLT мережі PON.

Для прогнозування трафіку у даному розділі використовується аналогічна модель рекурентної нейронної мережі LSTM, яка використовувалась у 4 розділі [299-301]. Не зважаючи на відмінності у деяких підходах до прогнозування,

метою даної роботи є автоматизація управління децентралізованими системами мобільного зв'язку в національному масштабі, що передбачає тісну інтеграцію методів управління як на рівні мереж мобільного зв'язку так і на рівні оптичних транспортних систем. Тому, при розробленні усіх методів інтелектуального управління інформаційними потоками у даній роботі використовується спільна формалізована модель, яка охоплює усі площини функціонування децентралізованих мереж мобільного зв'язку [308,309].

Результати прогнозування сумарного обсягу інформаційного потоку вузла OLT при його спільному використанні двома операторами, представлено на рис. 5.9.

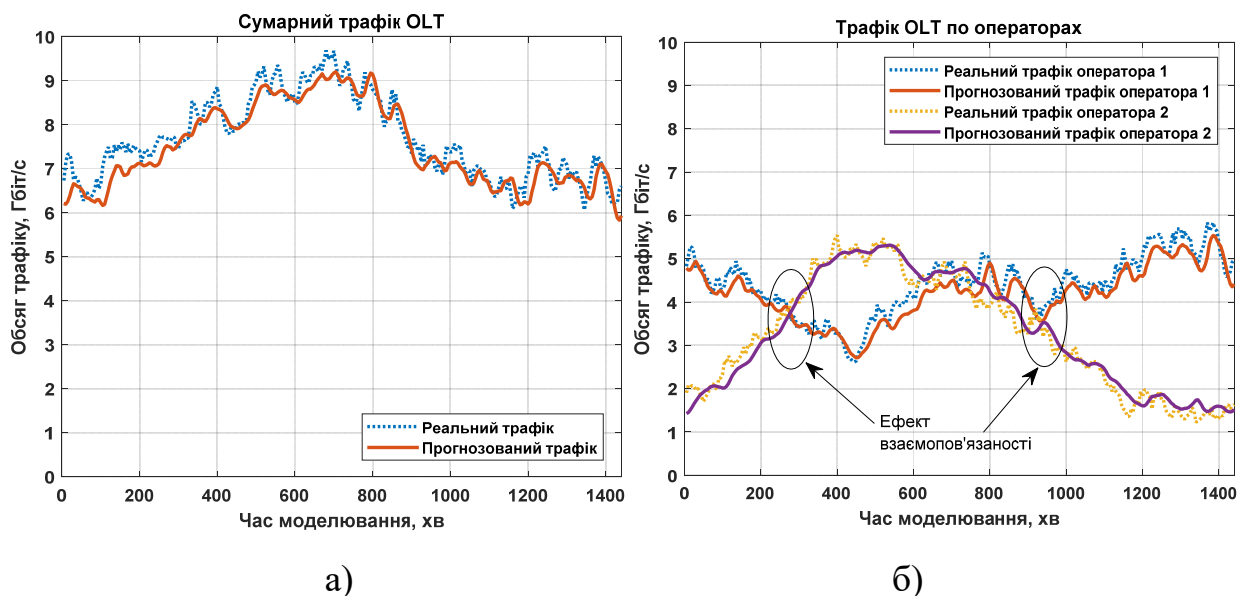


Рис. 5.9. Результати прогнозування сумарного трафіку сегменту мережі мобільного зв'язку – а) та окремих часток операторів – б).

На рис. 5.9,б спостерігається цікавий ефект, який пов'язаний із взаємозалежністю інформаційних потоків у децентралізованій мережі мобільного зв'язку для різних операторів. Це пояснюється тим, що в процесі обслуговування, абоненти мають змогу змінювати оператора, як вже було показано у 2 та 4 розділах роботи [219,233], Крім того, OLT обслуговує сусідні комірки, між якими здійснюється хендовер абонентів, що в свою чергу несуттєво впливає на сумарний обсяг трафіку у вузлі OLT, як можна спостерігати із рис. 5.9,а. Дана властивість архітектури PON, дає змогу

додатково розширити сферу застосування запропонованого методу мультиплексування інформаційних потоків у мережі PON, що буде розглянуто у наступних підрозділах [305,307].

#### 5.2.4. Метод інтелектуального розподілу ресурсів в оптичних мережах доступу

Для формалізації процесу розподілу ресурсів оптичної мережі доступу використовуємо матрицю ресурсів  $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{\Lambda \times T}$ , яка початково представлена у виразі (5.1). На основі (5.1), виводимо сумарний обсяг ресурсів у вузлі OLT:

$$S = \sum_{\lambda} \sum_{\tau} s_{\lambda,\tau}, \text{ при } s_{\lambda,\tau} = \text{const}, \forall \lambda, \tau. \quad (5.11)$$

Для узгодження між частотно-часовою структурою ресурсів у вузлі OLT, матрицю  $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{\Lambda \times T}$  доцільно перетворити у форму  $\mathbf{S} \in \mathbb{R}^{J \times K}$ , приймаючи, що довільний ONU, може обслуговуватись лише одним оператором:

$$S = \sum_{\lambda} \sum_{\tau} s_{\lambda,\tau} = \sum_j \sum_k s_{j,k}(t), \quad (5.12)$$

при  $s_{\lambda,\tau} = \text{const}, K \leq M, \forall \lambda, \tau, t, j, k, j \in (1, J), k \in (1, K)$ .

Отже, при використанні рівномірного розподілу ресурсів OLT між операторами, частка ресурсів для одного оператора у будь-який дискретний момент часу  $t$  становить:

$$s_k(t) = \sum_j s_{j,k}(t) = \left\lfloor \frac{S}{K} \right\rfloor, \forall t, k \in (1, K), j \in (1, J). \quad (5.13)$$

Аналогічно, можемо вивести частку ресурсів для одного мережного слайсу при рівномірному розподілі між ними:

$$s_j(t) = \sum_k s_{j,k}(t) = \left\lfloor \frac{S}{J} \right\rfloor, \forall t, k \in (1, K), j \in (1, J). \quad (5.14)$$

Вираз (5.13) доцільний у випадку спільного використання ресурсів OLT усіма операторами, в той час як вираз (5.14) більш доцільний для випадку коли OLT використовується лише одним оператором. Комбінація двох виразів дає змогу вивести частку ресурсів довільного мережного слайсу для одного оператора:

$$s_{j,k}(t) = \left\lfloor \frac{S}{J \times K} \right\rfloor, \forall t, k \in (1, K), j \in (1, J). \quad (5.15)$$

Запропонований метод інтелектуального мультиплексування полягає у прогнозуванні трафіку для усіх типів сервісу в межах кожного ONU  $f'_{j,k}(t)$ , з подальшим розподілом ресурсів у вузлі OLT, з урахуванням відповідних часток кожного потоку, в залежності від поточного сценарію функціонування децентралізованої мережної інфраструктури:

$$s_j(t) = \frac{1}{S} \frac{f'_j(t)}{s_{\lambda,\tau}}, \text{ при } s_{\lambda,\tau} = const, \forall \lambda, \tau, t, j \in (1, J), k \in (1, K). \quad (5.16)$$

$$s_k(t) = \frac{1}{S} \frac{f'_k(t)}{s_{\lambda,\tau}}, \text{ при } s_{\lambda,\tau} = const, \forall \lambda, \tau, t, j \in (1, J), k \in (1, K). \quad (5.17)$$

$$s_{j,k}(t) = \frac{1}{S} \frac{f'_{j,k}(t)}{s_{\lambda,\tau}}, \text{ при } s_{\lambda,\tau} = const, \forall \lambda, \tau, t, j \in (1, J), k \in (1, K). \quad (5.18)$$

З виразів (5.16-5.18), можна побачити, що є три альтернативні варіанти прогнозування інформаційних потоків, які відповідають схематичним представленням на рис. 5.8,а (5.16), рис. 5.8,б (5.17) та рис. 5.8,в (5.18). Таким чином забезпечується пропорційний розподіл ресурсів вузла OLT між операторами та мережними слайсами, в залежності від поточних вимог ONU.

Для оцінки ефективності запропонованого методу мультиплексування проведено серію експериментів для різної кількості операторів та мережних слайсів, на основі яких визначались частки задіяних ресурсів у вузлі OLT. Для порівняння було обрано статичний метод мультиплексування, який представлений виразами (5.13)-(5.15), інтелектуальний метод мультиплексування на основі прогнозів рекурентних нейронних мереж, який представлений виразами (5.16)-(5.18) та оптимальне мультиплексування на основі реальних даних трафіку.

Відповідно до розробленої моделі представлення інформаційних потоків, проведено моделювання для різних комбінацій то досліджено їх вплив на обсяг використання ресурсів вузла OLT. Зокрема, на рис. 5.10-5.12 представлено результати моделювання розподілу ресурсів для окремих мережних слайсів, на

рис. 5.13-5.14 – для окремих операторів, а на рис. 5.15-5.20 представлено результати для окремих слайсів у мережах різних операторів. Для простоти сприйняття, моделювання проведено лише для двох операторів та трьох мережних слайсів. Результати показують, що використання інтелектуального методу мультиплексування забезпечує високу гнучкість управління інформаційними потоками, забезпечуючи квазі-оптимальний розподіл ресурсів інфраструктури пасивних оптичних мереж [302-307].

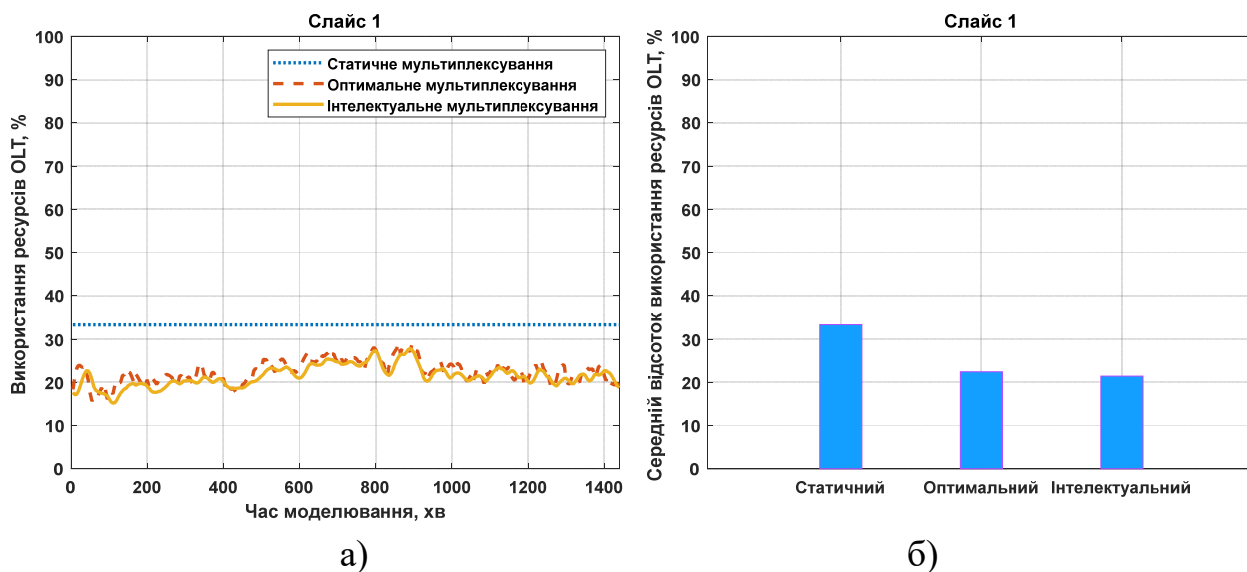


Рис. 5.10. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.

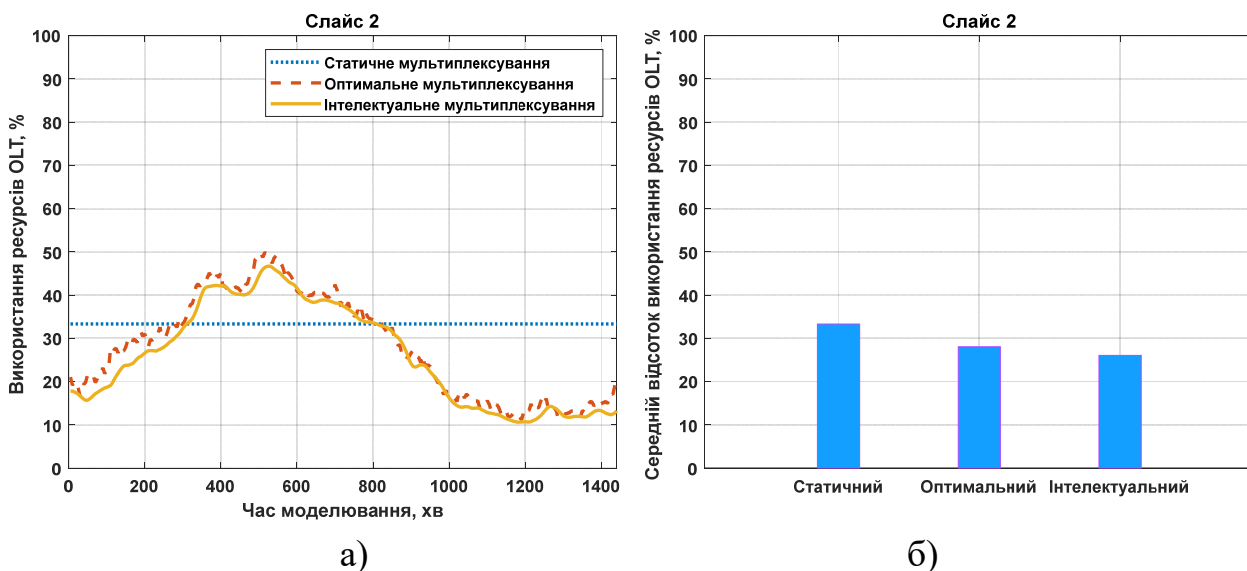
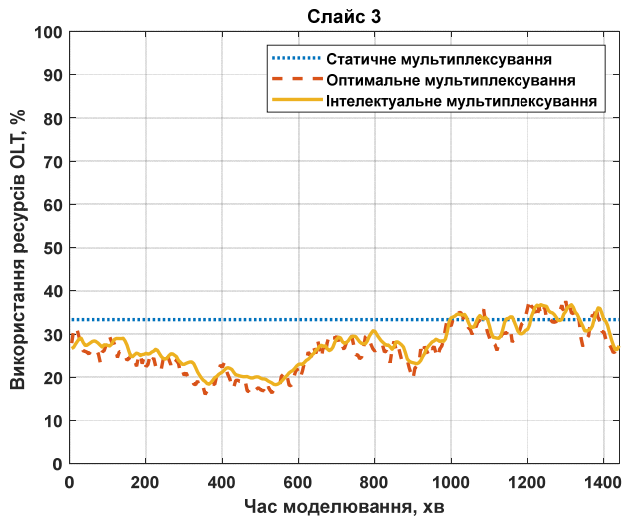
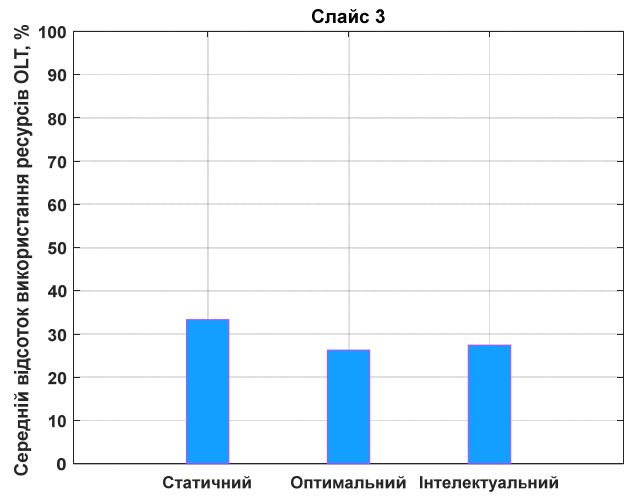


Рис. 5.11. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.

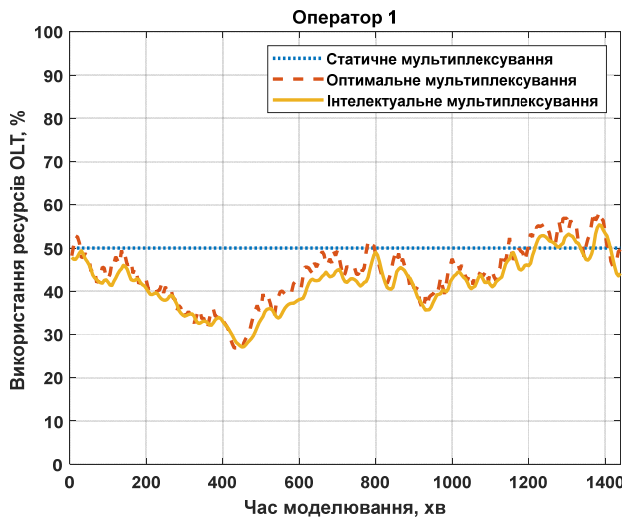


а)

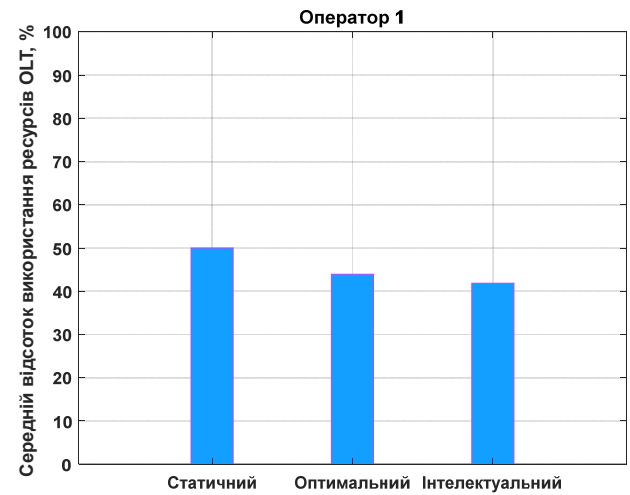


б)

Рис. 5.12. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.

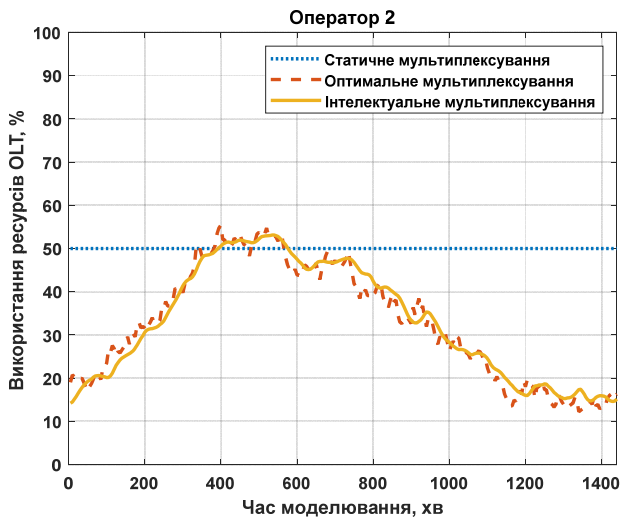


а)



б)

Рис. 5.13. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.

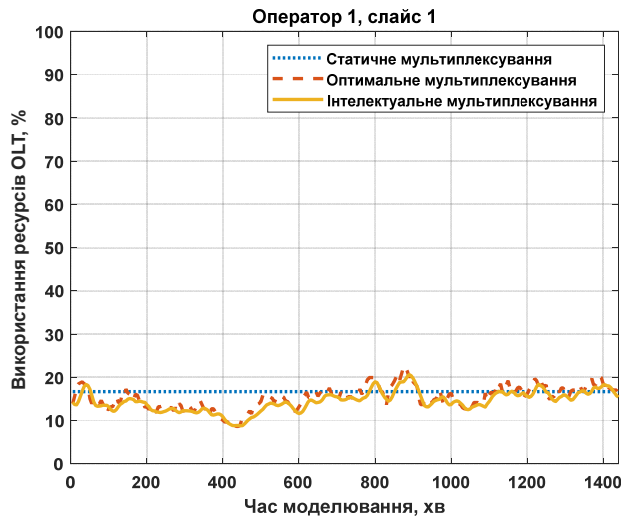


а)

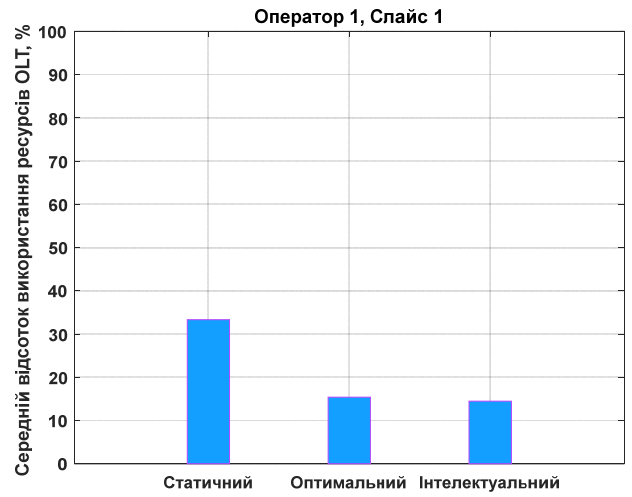


б)

Рис. 5.14. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.

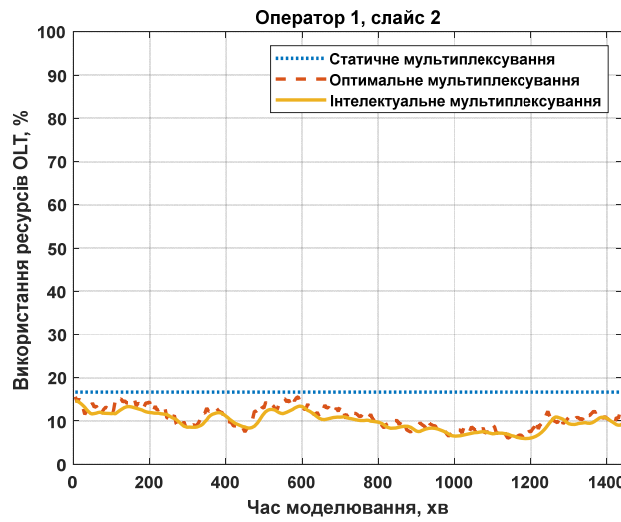


а)

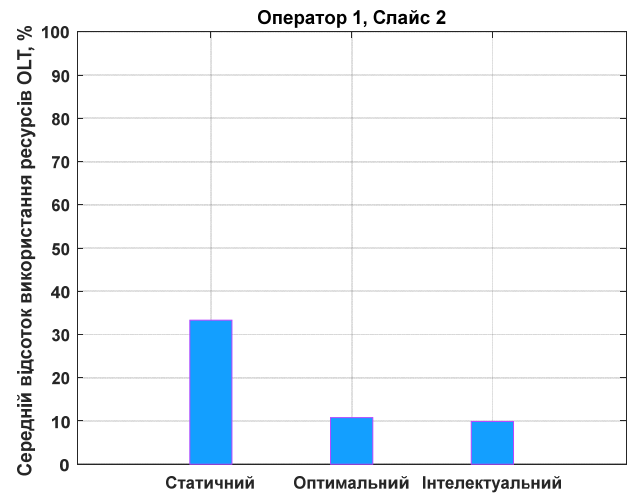


б)

Рис. 5.15. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.

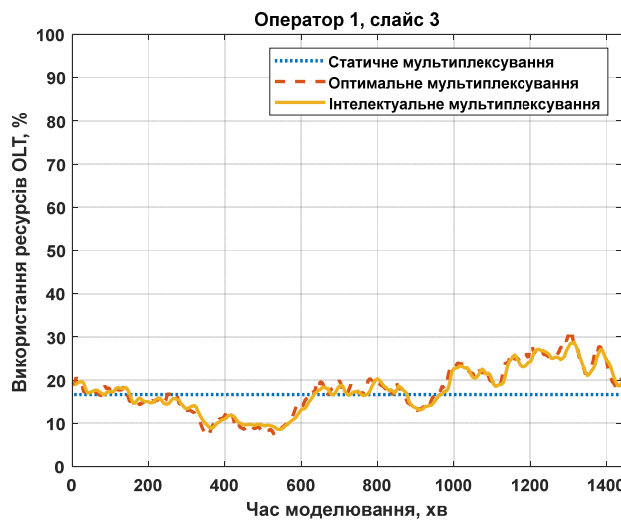


а)

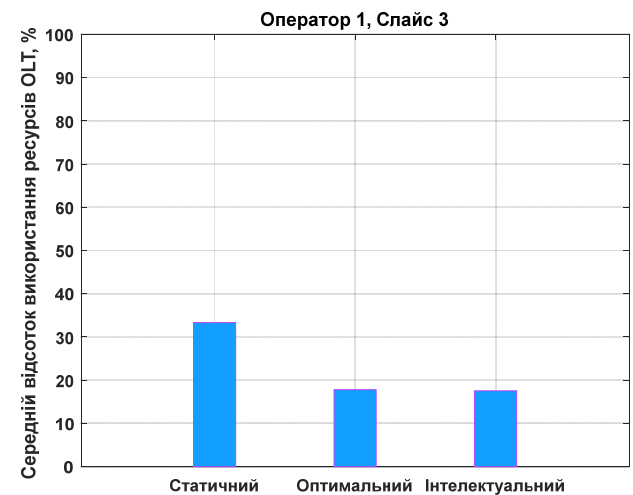


б)

Рис. 5.16. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.

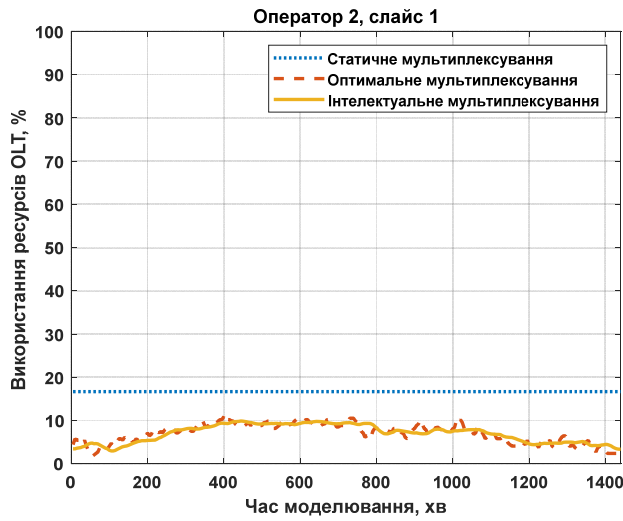


а)

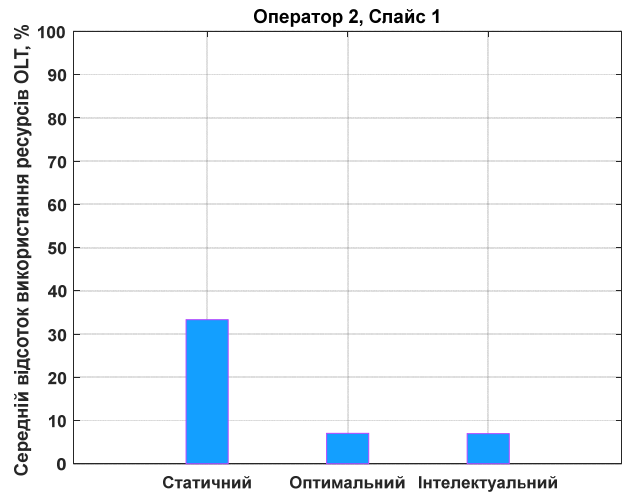


б)

Рис. 5.17. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.

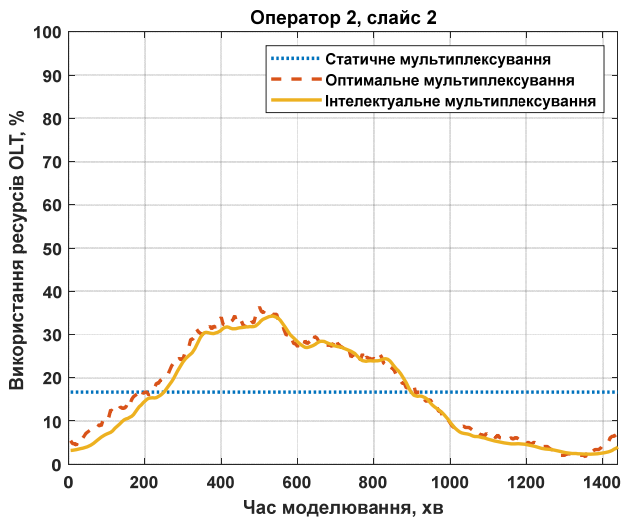


а)

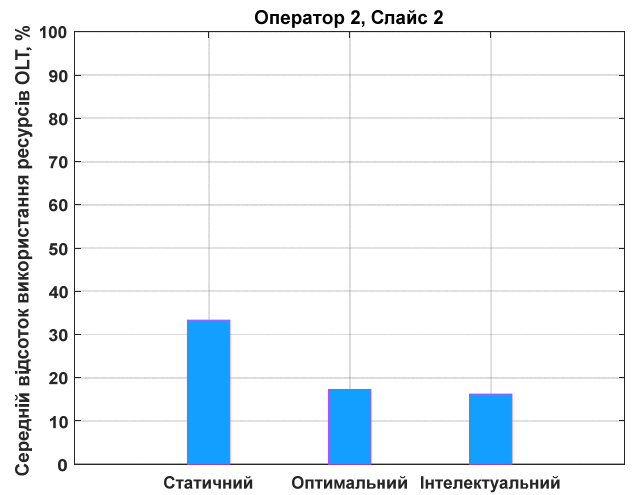


б)

Рис. 5.18. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.

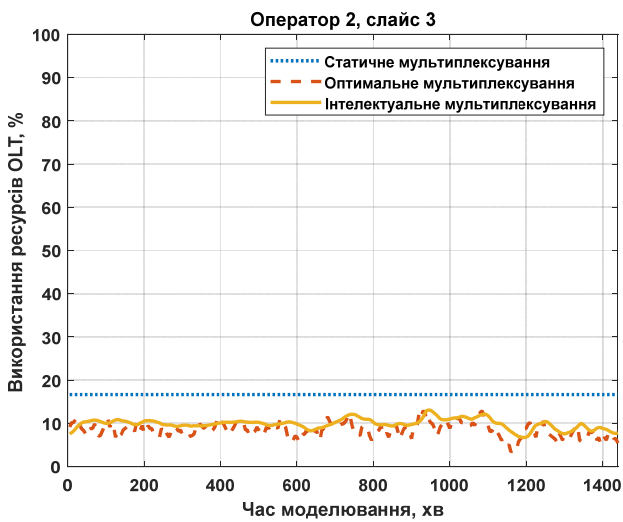


а)

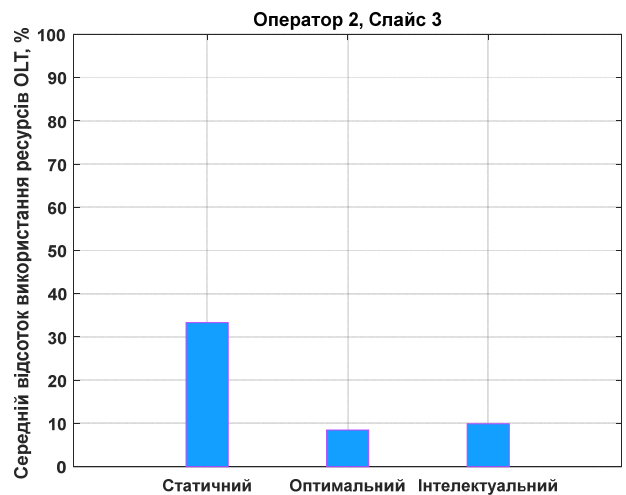


б)

Рис. 5.19. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.



а)



б)

Рис. 5.20. Динаміка – а) та середнє значення – б) використання ресурсів OLT.



### **5.2.5. Алгоритм мультиплексування інформаційних потоків в оптичній мережі доступу при здійсненні хендоверу**

Однією із особливостей процедури хендоверу у мережах мобільного зв'язку є її надлишковість як з точки зору сегменту безпроводного доступу, так і з точки зору навантаження на транспортну інфраструктуру. В мережах LTE для підтримки процедури хендоверу використовується інтерфейс X2, який відповідає за обмін службовою інформацією про абонента, тунелювання пакетного трафіку абонента у низхідному каналі та балансування навантаження між базовими станціями [66]. При високій активності абонентів, даний інтерфейс може створювати надлишок трафіку у транспортній інфраструктурі понад 20%. В окремих випадках, при застосуванні методів координованого обслуговування абонентів з уникненням інтерференції (CoMP – Coordinated Multi-Point), трафік інтерфейсу X2 може становити до 80% від сумарного трафіку транспортного каналу базової станції [305,307].

На відміну від мереж LTE, розподілена архітектура 5G дає змогу уникнути багатьох проблем, які існували до цього. За рахунок використання централізованої обробки сигналів для багатьох приймально-передавальних станцій RU, у мережах 5G вирішується проблема координованого передавання сигналів без використання інтерфейсу X2 [145,235]. Проте, враховуючи надзвичайно високу щільність мережної інфраструктури 5G та невідомо зростаючу кількість абонентів проблема хендоверу залишається однією із ключових у мережах мобільного зв'язку.

Додаткова складність, яка виникає у децентралізованих мережах 5G, пов'язана із великою кількістю операторів [219]. На відміну від класичної моделі обслуговування із прив'язкою абонентів до конкретного оператора, у децентралізованих мережах оператори не мають інформації про переміщення абонентів, поки вони обслуговуються у мережах інших операторів. Таким чином, при раптових зростаннях трафіку, зумовлених активними хендоверами великої кількості абонентів від інших мереж (рис. 5.9,б), вузлу ONU оператора

може бути недостатньо ресурсів, які йому надає OLT для мультиплексування трафіку у висхідному та низхідному напрямках передавання.

Для вирішення даної проблеми, пропонується алгоритм мультиплексування трафіку в мережі PON, який враховує ступінь взаємозв'язку між вузлами ONU, які обслуговують сусідні комірки децентралізованої мережі мобільного зв'язку [305,307]. Розроблений алгоритм базується на запропонованому методі частотно-часового мультиплексування каналів, у якому додатковою особливістю є використання проміжної ланки частотно-часових ресурсів, які виділяються для багатоадресного передавання інформаційних потоків до кількох сусідніх комірок, як показано на рис. 5.21.

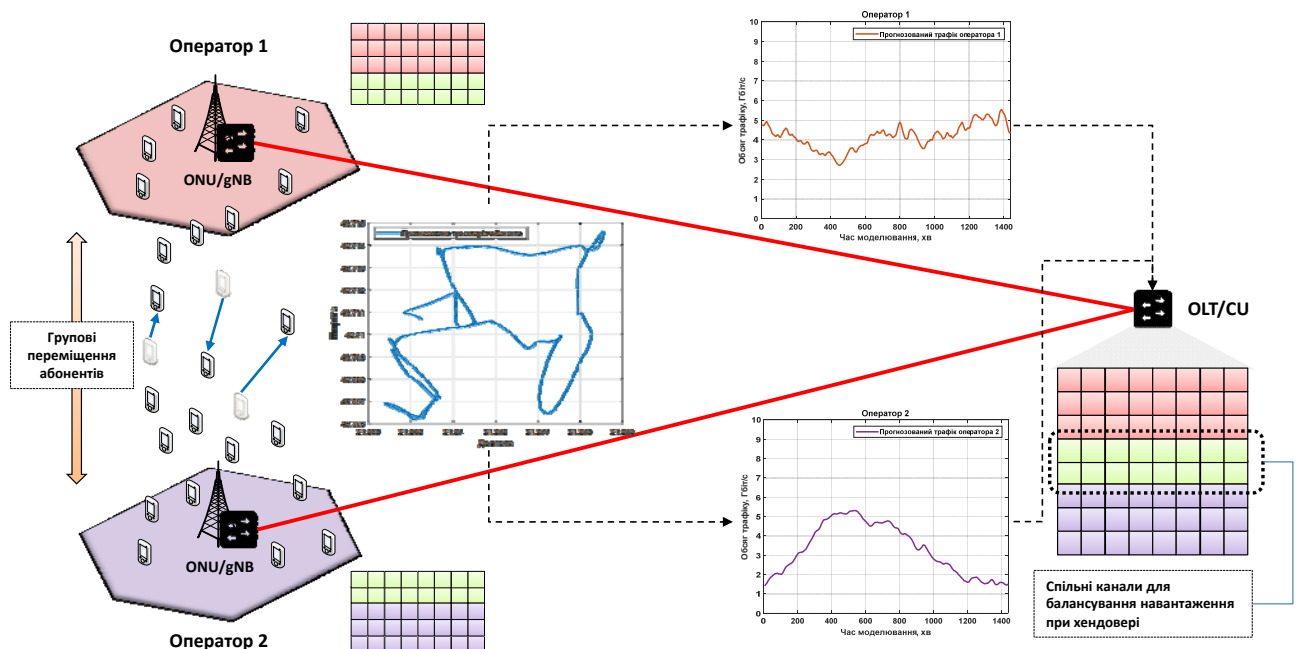


Рис. 5.21. Структурно-функціональна схема алгоритму мультиплексування трафіку при групових переміщеннях абонентів між комірками.

Багатоадресне передавання забезпечує неперервний потік даних для абонентів, які часто переміщуються у околі кількох комірок, і здійснюють частий хендовер. Враховуючи, що у пасивних оптичних мережах дані від OLT до усіх ONU передаються широкомовним способом, процес виділення ресурсів для багатоадресного передавання можна реалізувати шляхом простої зміни заголовків PCVd кадрів у низхідному напрямку передавання, таким чином, щоб

декілька ONU могли одночасно отримувати інформаційні потоки для “мігруючих” абонентів, забезпечуючи при цьому кешування необхідних даних на стороні базових станцій [305,307].

Оскільки мережа є децентралізованою, і вузол OLT, як правило, належить оператору фіксованого зв'язку, то вузли ONU в такому випадку розглядаються як незалежні клієнти, які орендують каналні ресурси для забезпечення транспорту трафіку своїх мереж мобільного зв'язку. Оскільки ONU виступає в ролі замовника сервісу у OLT, він повинен повідомляти про свої потреби у ресурсах на основі поточної кількості абонентів та їх вимог до якості сервісу. Розглянемо більш детально процес розподілу ресурсів у вузлі OLT при використанні розробленого алгоритму [305,307].

**Етап 1.** Оператор аналізує поточні активні сеанси свої абонентів. Під сеансом в даному випадку розуміється будь-яка активність абонента в мережі, включаючи режим очікування.

**Етап 2.** При наявності абонентів, для яких погіршується якість обслуговування за рахунок зниження рівня сигналу, оператор починає процедуру підготовки до хендоверу в межах множини сусідніх базових станцій усіх операторів. При цьому, окрім рівня сигналу, критерієм для хендоверу можуть бути параметри навантаження комірки, зміна сервісу абонента та інші критерії, які визначені у рекомендаціях 3GPP для мереж стандартів LTE та 5G.

Крім того, запропоновано додатковий критерій траєкторії переміщення абонента, який прогнозується на основі його попередньої статистики з використанням штучного інтелекту, як показано на рис. 5.11. З точки зору технічної реалізації, на сьогоднішній час прогнозування траєкторії абонента є надто складним завданням, яке виходить за межі часових рамок процедури хендоверу. Тому, в даному алгоритмі цей підхід можна розглядати як перспективну опцію, яка потребує подальшого розвитку обчислювальних можливостей абонентських пристроїв. Наприклад, в рамках концепції федеративного навчання, абонентський пристрій має змогу локально здійснювати навчання нейронних мереж на основі даних про своє

переміщення, з використанням модуля нейронних обчислень (NPU – Neural Processing Unit), який вже встановлюється в ряді сучасних смартфонів. Таким чином, в перспективі, абонентський пристрій матиме змогу повідомляти базовим станціям свою прогнозовану траєкторію переміщення, забезпечуючи можливість передбачення хендверу заздалегідь, як показано на рис. 5.22. В свою чергу, базові станції отримуючи інформацію про переміщення від усіх абонентів, зможуть прогнозувати групові переміщення абонентів для більш точної оцінки навантаження.

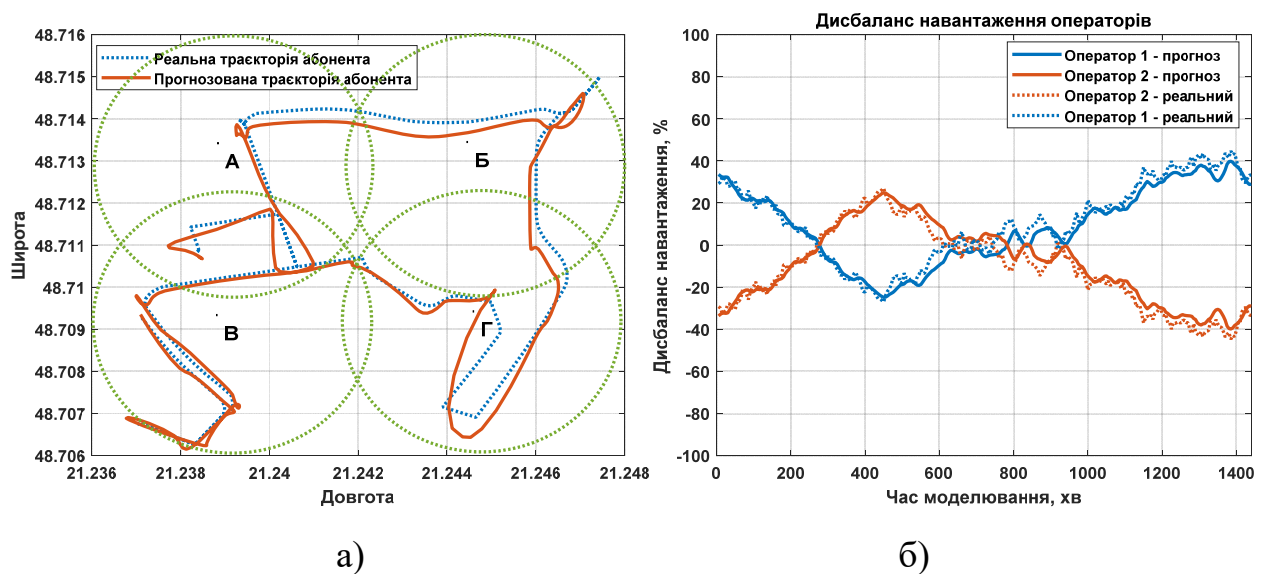


Рис. 5.22. Приклад прогнозування траєкторії переміщення абонента – а) та дисбалансу операторів – б) з використанням рекурентних нейронних мереж.

**Етап 3.** Враховуючи результат попереднього етапу, оператор, який ініціює хендвер, повідомляє OLT про обсяг ресурсів, який необхідно виділити для багатоадресної доставки, враховуючи поточний тип сервісу, який використовує абонент.

**Етап 4.** OLT здійснює мультиплексування інформаційного потоку абонента до множини цільових базових станцій, які є претендентами для здійснення хендверу, використовуючи багатоадресну доставку, як показано на рис. 5.21.

На основі результатів імітаційного моделювання, які представлені на рис. 5.23 та 5.24, можна зробити висновок, що розроблений алгоритм

інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу при здійсненні хендоверу між сусідніми комірками децентралізованої мережі мобільного зв'язку, дає змогу знизити обсяг надлишкового службового трафіку у вузлі OLT в середньому на 20%, за рахунок проактивного переправлення трафіку абонента у канали з багатоадресною доставкою [305,307].



Рис. 5.23. Надлишок використання ресурсів OLT у висхідному напрямку передавання при хендовері абонентів між операторами.



Рис. 5.24. Надлишок використання ресурсів OLT у висхідному напрямку передавання при хендовері абонентів між операторами з використанням запропонованого алгоритму мультиплексування.

### 5.3. Алгоритм персоналізованого кешування контенту з використанням обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв

Запропонований алгоритм персоналізованого кешування контенту базується на основі обчислювальних ресурсів кінцевих пристроїв (рис. 5.25). Запропонований алгоритм дає можливість заздалегідь кешувати контент, який буде потрібен абоненту безпосередньо у пам'яті пристрою [234,314].

**Крок 1.** Клієнтський додаток Інтернет-сервісу (Youtube, Instagram, тощо) у пристрої абонента отримує сповіщення про новий актуальний контент для абонента на основі його підписок та вподобаних сторінок.

**Крок 2.** AI-агент, який знаходиться у пристрої абонента, прогнозує час, коли даний контент буде потрібен користувачеві на основі його попередньої статистики, часу доби, актуальності та пріоритетності даного контенту.

**Крок 3.** Пристрій абонента аналізує свої поточні параметри заряду акумулятора, активність абонента у мережі, завантаження CPU/RAM, обсяг доступної пам'яті та доступні ресурси пропускної здатності поточного з'єднання з мережею Інтернет.

**Крок 4.** Пристрій абонента надсилає запит до оператора про необхідність попереднього кешування даного контенту в пам'яті телефону, Edge-серверах чи базових станціях. При цьому надсилається інформацію про потенційне переміщення абонента протягом доби та очікуваний час, коли контент повинен бути доступний.

**Крок 5.** Оператор приймає рішення про найбільш оптимальну доставку даного контенту до абонента, враховуючи поточне навантаження на мережу, пріоритет абонента, який збережений в базі UDR, а також важливість даного контенту, яка визначається з таблиці 5QI (5G Quality Identifier) [49].

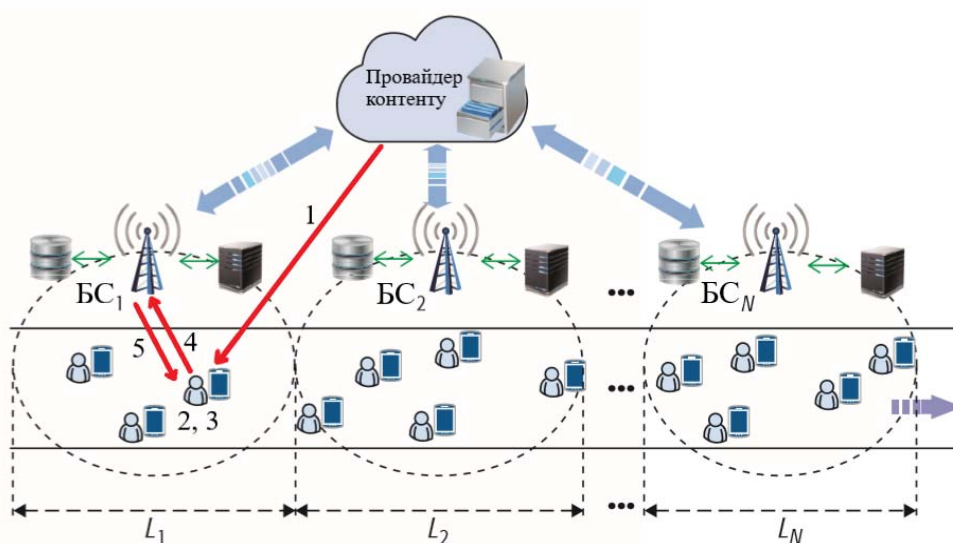


Рис. 5.25. Схема функціонування методу персоналізованого кешування контенту у мережах мобільного зв'язку.

Таким чином, у момент коли користувач почне завантажувати даний контент з мережі (наприклад, перегляд відео із сервісу YouTube), він одразу буде відтворюватись із локальної кеш пам'яті без затримок та з максимальною доступною якістю.

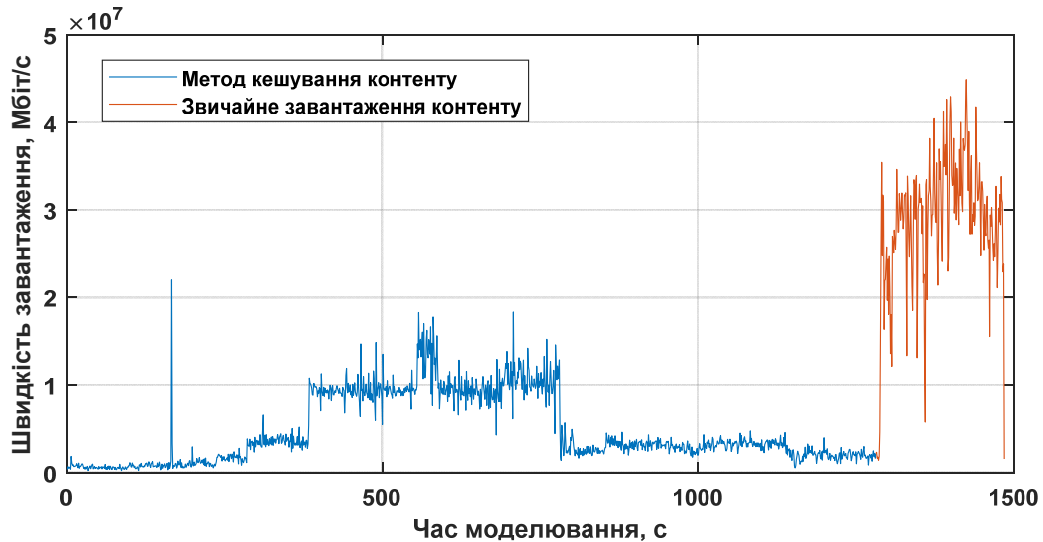


Рис. 5.26. Інтенсивність трафіку при передаванні контенту в мережі мобільного зв'язку звичайним методом та методом з використанням персоналізованого кешування.

На рис. 5.26 показано експериментальні результати перехоплення мережевого трафіку при передаванні контенту в мережі мобільного зв'язку з використанням звичайного завантаження контенту в режимі онлайн та з використанням кешування. Дослідження проводилися шляхом завантаження відеофайлу із сервісу YouTube. Для імітації процесу кешування використано обмеження швидкості та пріоритету завантаження відеофайлу для імітації фоновому режиму роботи. Для аналізу трафіку використано програмне забезпечення Wireshark [314].

Як можна побачити із результатів експериментального дослідження, при використанні звичайного методу передавання, спостерігається пилоподібний характер трафіку, який пов'язаний із періодами буферизації контенту. Натомість, при використанні персоналізованого кешування, середня інтенсивність трафіку є на 70% нижчою, і лише інколи істотно перевищує

фоновий трафік пристрою. Враховуючи потенційну кількість контенту, який може кешуватись безпосередньо у пристроях, можна припустити, що запропонований метод дає змогу суттєво розвантажити ресурси мережі мобільного зв'язку [314].

#### **5.4. Розроблення методу інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі**

##### **5.4.1. Класифікація параметрів якості сервісу для наскрізного управління інформаційними потоками**

Мережі мобільного зв'язку 5G поставлені перед викликом забезпечення різноманітних вимог до параметрів мережі, що пов'язано із значною гетерогенністю їх застосувань. В загальному, вимоги до послуг у мережі 5G поділяються на три категорії. До першої відноситься широкосмуговий доступ із високою пропускною здатністю (eMBB – Enhanced Mobile Broadband) для підтримки мультимедійних послуг, віртуальної та доповненої реальності, та ряду інших сервісів із високими вимогами до швидкості передавання інформації. Такі сервіси характеризуються порівняно невеликою кількістю пристроїв, які повинні одночасно взаємодіяти у мережі. До другої категорії відносяться сервіси масового зв'язку машинного типу (mMTC – Massive Machine Type Communications), що використовуються для підключення різноманітних пристроїв в рамках концепції Інтернет речей (IoT – Internet of Things). Такі сервіси характеризуються низькою пропускною здатністю та невисокими вимогами до затримки передавання даних. Проте, mMTC потребують підтримки одночасного функціонування кількох тисяч кінцевих пристроїв в межах одного квадратного кілометра. Третя категорія стосується сервісів, які потребують ультра-низької затримки та високої надійності доставки даних (URLLC – Ultra-Reliable Low Latency Communications), що пов'язано із важливими застосуваннями на об'єктах критичної інфраструктури (атомні електростанції, системи газопостачання та інші типові об'єкти), або в системах контролю дорожнього руху [56].



У контексті наскрізного управління якістю сервісу для абонентів мобільного зв'язку надзвичайно важливо, щоб параметри QoS були узгоджені між доменами мобільного зв'язку та доменами транспортних мереж. Проте, історично, мережі мобільного зв'язку використовують іншу номенклатуру QoS, ніж мережі фіксованого зв'язку, враховуючи ряд ключових відмінностей у методах забезпечення якості сервісу між фіксованими та мобільними мережами. Тому, для узгодження політики обслуговування трафіку між базовими станціями 5G та крайовими вузлами оптичної транспортної мережі використовується таблиця відповідності ідентифікаторів QCI (QoS Class Identifier)/5QI (5G Quality Identifier), які визначені стандартами 3GPP із ідентифікатором DSCP, який визначений у рекомендації IETF (табл. 5.1-5.3) [49].

Таблиця 5.1

Класифікація та відповідність ідентифікаторів сервісів 5QI та DSCP для сервісів з гарантованою пропускнуою здатністю (GBR)

5QI	Тип	Пріоритет	Приклад сервісу	DSCP	
1	GBR	2	Голос реального часу	44	
2		4	Відео реального часу	35	
3		3	Ігри в реальному часі, V2X повідомлення, контроль електромереж, автоматизація індустріальних процесів	19	
4		5	Відео не реального часу	37	
65		0.7	Критично важливі голосові сервіси РТТ (Push To Talk)	42	
66		2	Не критично важливі голосові сервіси РТТ (Push To Talk)	43	
67		1.5	Критично важливі відео сервіси	33	
75		2.5	V2X повідомлення	17	
71		5.6		Потокове мультимедіа у висхідному каналі	35
72					
73					
74					
76					

Таблиця 5.2

Класифікація та відповідність ідентифікаторів сервісів 5QI та DSCP для критичних до затримки сервісів з гарантованою пропускнуою здатністю (Delay Critical-GBR)

5QI	Тип	Пріоритет	Приклад сервісу	DSCP
82	DC-GBR	1.9	Дискретна автоматизація (малі пакети)	25
83		2.2	Дискретна автоматизація (великі пакети)	27
84		2.4	Інтелектуальні транспортні системи	31
85		2.1	Високовольтні системи електропостачання	23
86		1.8	Інтелектуальні транспортні системи	29

Таблиця 5.3

Класифікація та відповідність ідентифікаторів сервісів 5QI та DSCP для сервісів з негарантованою пропускнуою здатністю (Non-GBR)

5QI	Тип	Пріоритет	Приклад сервісу	DSCP
5	Non-GBR	1	IMS сигналізація	40
6		6	Відео не реального часу, TCP-сервіси (www, email, чат, ftp, p2p)	10
7		7	Голос та відео реального часу, інтерактивні ігри	38
8		8	Відео не реального часу, TCP-сервіси (www, email, чат, ftp, p2p)	12
9		9		14
69		0.5	Критично важлива сигналізація (MC-PTT сигналізація, MC відео сигналізація)	41
70		5.5	Критично важливі сервіси відео не реального часу та TCP-сервіси (www, email, чат, ftp, p2p)	20
79		6.5	V2X повідомлення	21
80		6.8	Надширокосмугові сервіси з низькою затримкою (TCP/UDP), віртуальна та доповнена реальність	32
99*		10	<b>Фонове персоналізоване кешування контенту</b>	<b>0</b>

*\*Ідентифікатор сервісу запропонований у даній роботі*

Отже, існуюча концепція побудови оптичної транспортної мережі повинна бути трансформована відповідним чином для забезпечення автоматизованого наскрізного логічного розділення мережних ресурсів під конкретний тип сервісу в мережах 5G та подальших поколінь [302,315-326].

## 5.4.2. Архітектура та принцип функціонування оптичної транспортної інфраструктури з комутацією блоків

В запропонованій моделі управління розглядається оптична транспортна мережі з комутацією блоків OBS (Optical Burst Switching) (рис. 5.27). У такій мережі, вхідні інформаційні потоки від мереж доступу групують у блоки змінної довжини та передаються до вузлів призначення через попередньо зарезервовані оптичні канали зв'язку з повністю оптичною комутацією [302,315-320]. Резервування наскрізних каналів здійснюється шляхом передавання відокремленого заголовку BHP (Burst Header Packet), який аналізується комутаційними вузлами для комутації каналів. На приймальній стороні блоки деагрегуються на окремі інформаційні потоки у мережі доступу.

Архітектура OBS складається з двох типів функціональних елементів. Перший тип – крайові вузли EN (Edge Node), які призначені для агрегації/деагрегації інформаційних потоків (Ethernet, 4G/5G) та формування заголовків BHP (рис. 5.28) [315-319]. У запропонованій моделі управління потоками, крайовий вузол суміщений із вузлом OLT мережі WDM-PON та вузлом CU мережі 5G [303]. Другий тип – проміжні вузли CN (Core Node), які призначені для наскрізної оптичної комутації блоків на основі інформації, яка приходить у заголовках BHP (5.29) [320-327].

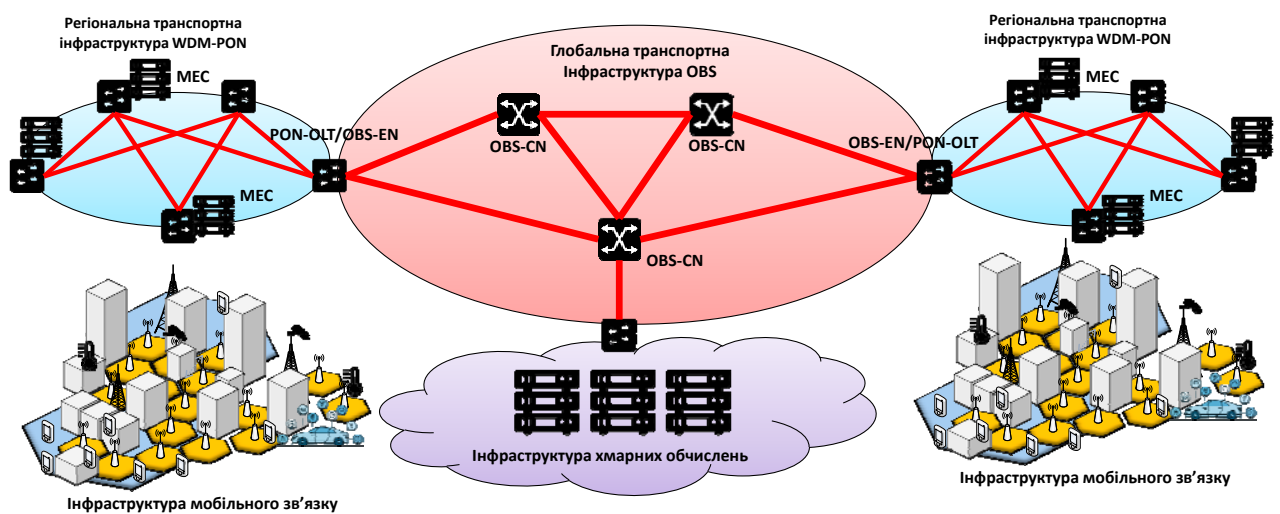


Рис. 5.27. Архітектура оптичної транспортної інфраструктури на основі мереж з комутацією блоків [302,303].

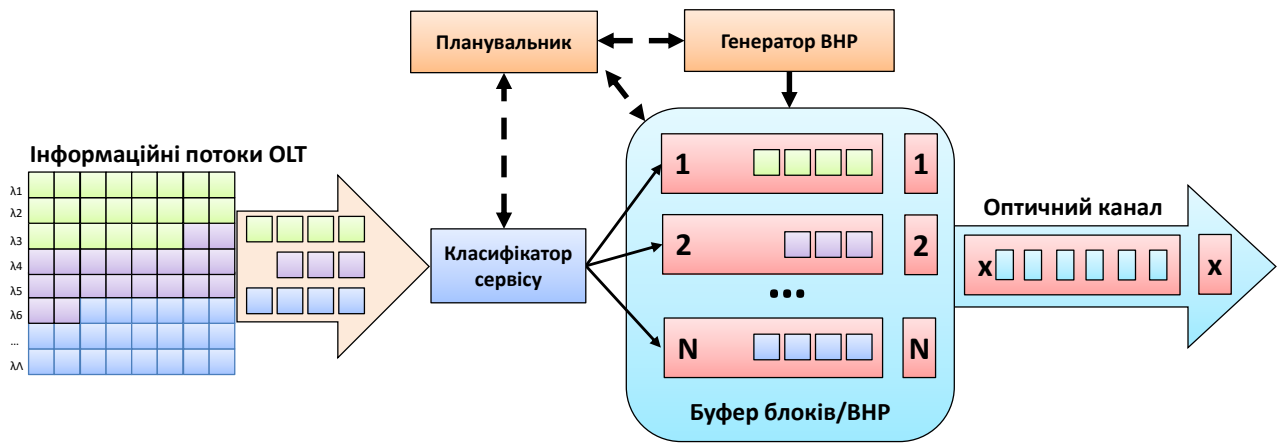


Рис. 5.28. Структурно-функціональна схема крайового вузла OBS-EN [303].

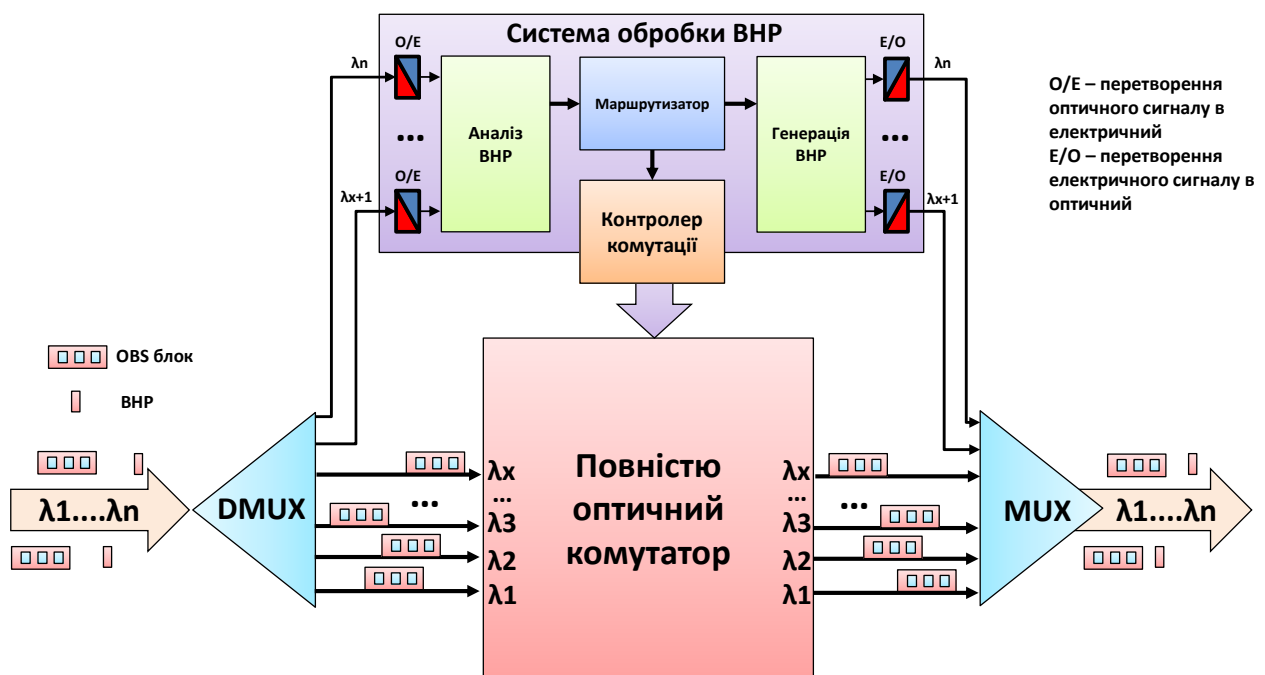


Рис. 5.29. Структурно-функціональна схема проміжного вузла OBS-CN [320].

Представлена на рис. 5.28, модель вузла OBS-EN вказує на послідовність процесу агрегації трафіку з підтримкою диференціювання класів сервісу, що є важливим з точки зору підтримки наскрізного слайсингу мережі. Планувальник формує кожен блок з інформаційних потоків, які мають спільну адресу призначення та однаковий сервісний слайс [315-319]. Заголовок ВНР надсилається перед блоком, для того щоб забезпечити достатньо часу для його аналізу в усіх вузлах OBS-CN які входять у маршрут передавання блоку, і відповідно забезпечити повністю-оптичну комутацію блоків (рис. 5.29) [320-327].

### 5.4.3. Метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі

Для узгодженого диференціювання інформаційних потоків, які надходять від децентралізованих мереж мобільного зв'язку, важливо враховувати додаткові аспекти, які не враховувались раніше у централізованих мережах. Використовуючи загальну математичну модель інформаційних потоків децентралізованих мереж мобільного зв'язку, яка запропонована у другому розділі представимо сумарний агрегований потік у вузлі OBS-EN як [309]:

$$F^{(OBS-EN)} = \sum_i \sum_j \sum_k \sum_l f_{i,j,k,l}, \quad f_{i,j,k,l} \in \mathbb{R}^{I \times J \times K \times L}. \quad (5.19)$$

де  $\mathbb{R}^{I \times J \times K \times L}$  – комбінований простір абонентів  $i = \{1, 2, \dots, I\}$ , сервісів  $j = \{1, 2, \dots, J\}$ , операторів  $k = \{1, 2, \dots, K\}$  та базових станцій  $l = \{1, 2, \dots, L\}$ ;  $f_{i,j,k,l}$  – найменша складова інформаційного потоку абонента  $i$ , з сервісом  $j$ , через базову станцію  $l$ , яка обслуговується оператором  $k$ .

Сумарні інформаційні потоки в децентралізованих мережах мобільного зв'язку обчислюються як:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_i^{(UE)} = \sum_j \sum_k \sum_l f_{i,j,k,l} \text{ - для абонента } i; \\ F_j^{(S)} = \sum_i \sum_k \sum_l f_{i,j,k,l} \text{ - для сервісу } j; \\ F_k^{(O)} = \sum_i \sum_j \sum_l f_{i,j,k,l} \text{ - для оператора } k; \\ F_l^{(gNB)} = \sum_j \sum_k \sum_i f_{i,j,k,l} \text{ - для базової станції } l. \\ F^{(OBS-EN)} = \sum_i F_i^{(UE)} = \sum_j F_j^{(S)} = \sum_k F_k^{(O)} = \sum_l F_l^{(gNB)} \end{array} \right. \quad (5.20)$$

З виразу (5.20) легко бачити, що простір  $\mathbb{R}^{I \times J \times K \times L}$  передбачає прогнозування трафіку у вузлі OBS-EN для будь-яких комбінацій абонентів, сервісів, базових станцій та операторів децентралізованої мережі мобільного зв'язку. На основі прогнозованих значень сумарних інформаційних потоків, приймаються відповідні рішення стосовно управління трафіком у вузлах

транспортної мережної інфраструктури. Наприклад,  $F^{(o)}$  використовується для резервування ресурсів оператором на рівні каналів PON між власними базовими станціями та віртуалізованим ядром в інфраструктурі граничних обчислень;  $F^{(gNB)}$  – для визначення взаємозалежності трафіку між сусідніми комірками та мультиплексування інформаційних потоків при здійсненні хендоверу;  $F^{(UE)}$  – для управління сервісами та кешування контенту на рівні абонентського пристрою;  $F^{(S)}$  – для управління мережними слайсами та наскрізного забезпечення якості передавання інформаційних потоків.

При агрегації інформаційних потоків з мереж мобільного зв'язку у транспортній мережі, класи сервісу 5QI трансформуються у класи DSCP (рис. 5.30) [49]:

$$\underline{\mathbf{F}}(i, j, k, l) \xleftrightarrow{5QI \leftrightarrow DSCP} \underline{\mathbf{F}}(i, j', k, l), \quad (5.21)$$

де  $j' = \{1, 2, \dots, J'\}$  – множина значень ідентифікатора DSCP. Після цього, здійснюється формування агрегованих потоків  $\underline{\mathbf{F}}(:, j', :, :)$ , та прогнозування сумарних обсягів трафіку  $F_{j'}^{(S)}$  з використанням рекурентних нейронних мереж.

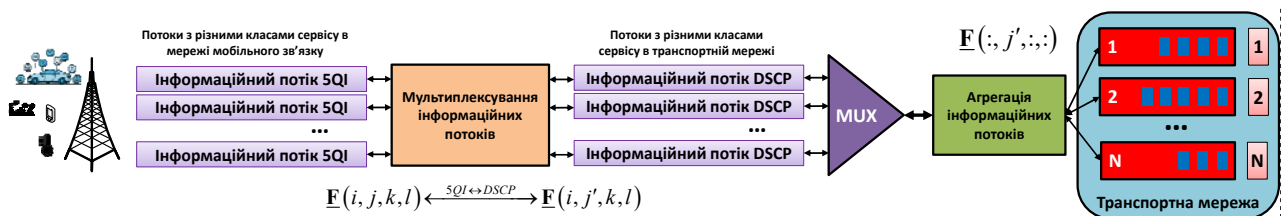


Рис. 5.30. Послідовність агрегації інформаційних потоків у мережі OBS [303].

Враховуючи додаткові параметри операторів та незалежних абонентів, а також наявність нових типів сервісів у мережах 5G/6G класичний підхід до пріоритезації блоків та забезпечення якості обслуговування на основі DSCP (табл. 5.4), є недостатнім для ефективного наскрізного управління потоками.

Порівнявши параметри у таблицях 5.1-5.3, із параметрами у таблиці 5.4. можна зробити висновок, що існуючі методи управління потоками у мережах OBS є неприйнятними для таких важливих сервісів як тактильний інтернет, який потребує ультра низької затримки та ультрависокої надійності (URLLC).

Крім того, з представлених таблиць можна побачити, що сервіси, які з точки зору мережі мобільного зв'язку мають різні пріоритети, у мережі OBS відповідають одному пріоритету блоку.

Таблиця 5.4

Класифікація ідентифікаторів DSCP та відповідних їм пріоритетів блоків у мережі OBS

Клас	DSCP		Пріоритет блоку	
	Двійкове	Десяткове	Індивідуальний	Агрегований
CS0	000 000	0	7	5
CS1	001 000	8	6	4
CS2	010 000	16	5	
CS3	011 000	24	4	3
CS4	100 000	32	3	
CS5	101 000	40	2	2
EF	101 110	46	1	1
CS6	110 000	48	0	0
CS7	111 000	56		

Враховуючи надзвичайно високу складність та неоднозначність класифікації сервісів, у роботі пропонується удосконалити метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі, шляхом використання засобів штучного інтелекту. Запропонований метод полягає у використанні комбінованої архітектури глибоких нейронних мереж, яка складається із класифікатора сервісів, який забезпечує логічне розділення інформаційних потоків між пріоритетами блоків та множини незалежних рекурентних нейронних мереж LSTM, кожна з яких відповідає за прогнозування трафіку окремого для свого пріоритету блоку (рис. 5.31) [298].

Згідно з результатами експериментальних досліджень (рис. 5.32), запропонований метод дає змогу досягти 90% точності прогнозування трафіку, який відповідає певному пріоритету блоку. В свою чергу, це дає змогу планувальнику адаптивно перерозподіляти ресурси оптичних транспортних мереж для окремих слайсів, що забезпечує узгоджене диференціювання

інформаційних потоків між мережами мобільного зв'язку та оптичною транспортною інфраструктурою.

Крім того, використовуючи прогнозування не лише на рівні сервісів, але й на рівні адрес призначення, запропонований метод дає змогу заздалегідь резервувати необхідні ресурси, такі як оптичні волокна, довжини хвиль та комутаційні ланки у вузлах OBS-CN.

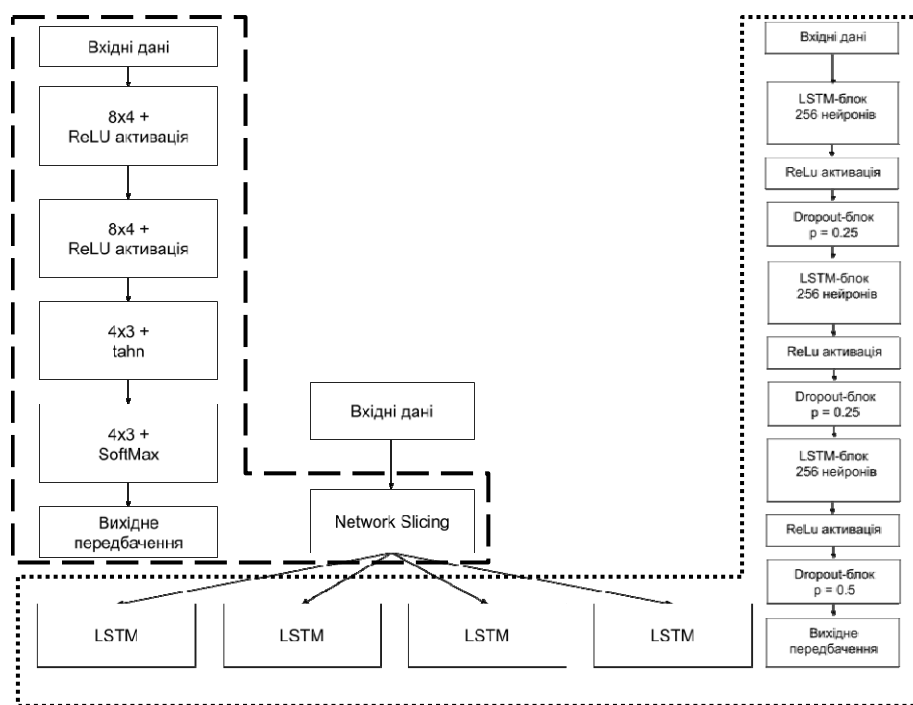


Рис. 5.31. Комбінована архітектура системи логічного розділення інформаційних потоків у вузлі OBS-EN на основі глибоких нейронних мереж [298].

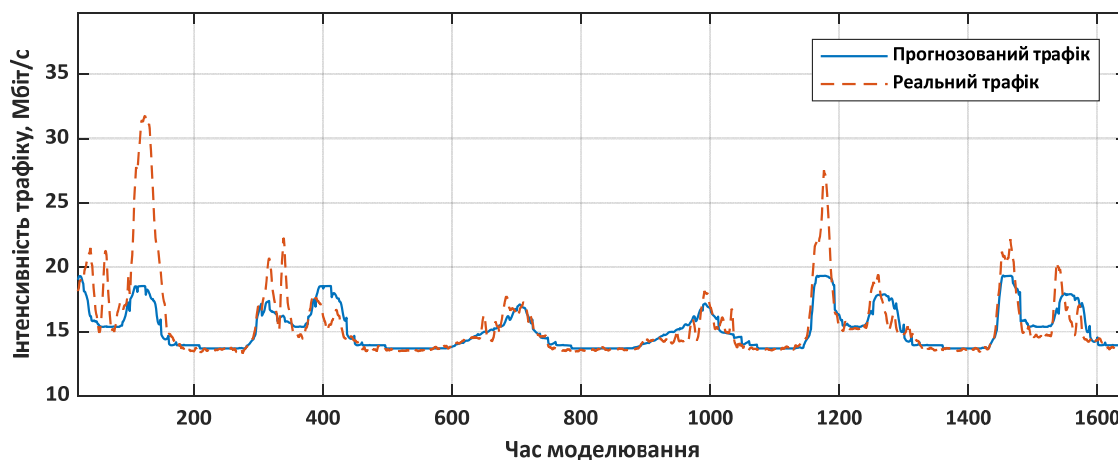


Рис. 5.32. Результати прогнозування трафіку одного типу блоків для методу інтелектуального управління інформаційними потоками.



Для моделювання обрано 3 типи мережних слайсів, а саме: eMBB, URLLC та mMTC. Для навчання моделі інтелектуального управління використано датасет, який містить інформаційні потоки усіх трьох слайсів, які випадковим чином змішані між собою у часі. Структура датасету наведена у додатку. Спочатку здійснюється навчання нейронної мережі для класифікації сервісних слайсів. Після класифікації, формуються часові ряди трафіку для кожного індивідуального слайсу, на основі яких здійснюється навчання окремих моделей рекурентних нейронних мереж. В основі рекурентних блоків використовується технологія LSTM, яка використовує комірки внутрішнього контекстного стану, які забезпечують властивості як довгострокової так і короткострокової пам'яті [298-301]. Дана властивість дає змогу забезпечити прогнозування довготривалих залежностей трафіку, з урахуванням релевантного історичного контексту для кожного логічного слайсу мережі, або для кожної адреси призначення. Результати розподілу ресурсів у вузлі OBS-EN між різними типами сервісів представлені на рис. 5.33-5.35.

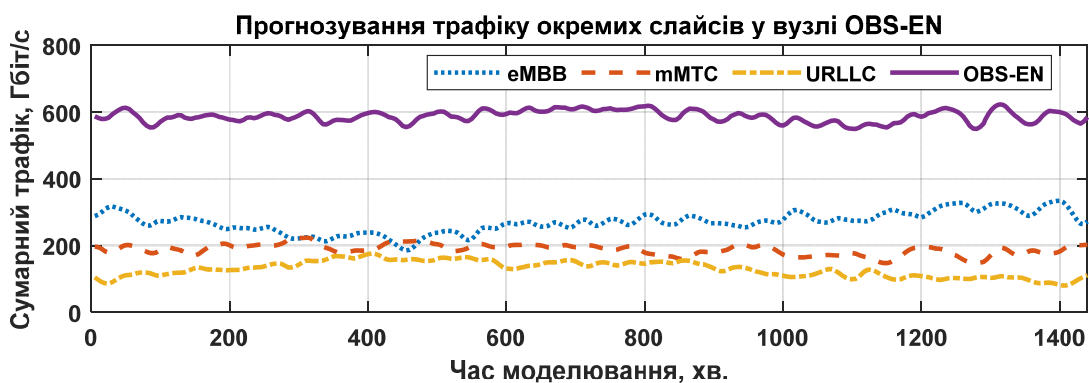


Рис. 5.33. Приклад прогнозування сумарного трафіку у вузлі OBS-EN для окремих слайсів eMBB, mMTC та URLLC.

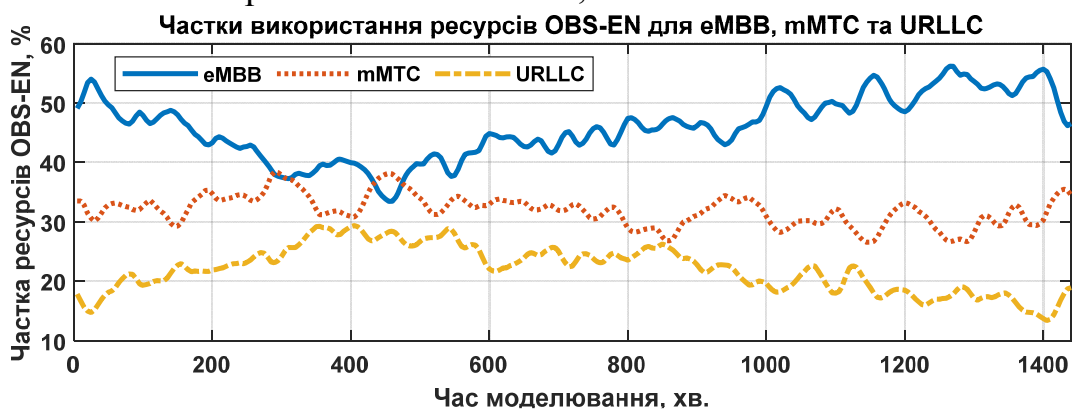


Рис. 5.34. Частки використання ресурсів вузла OBS-EN сервісами eMBB, mMTC та URLLC.

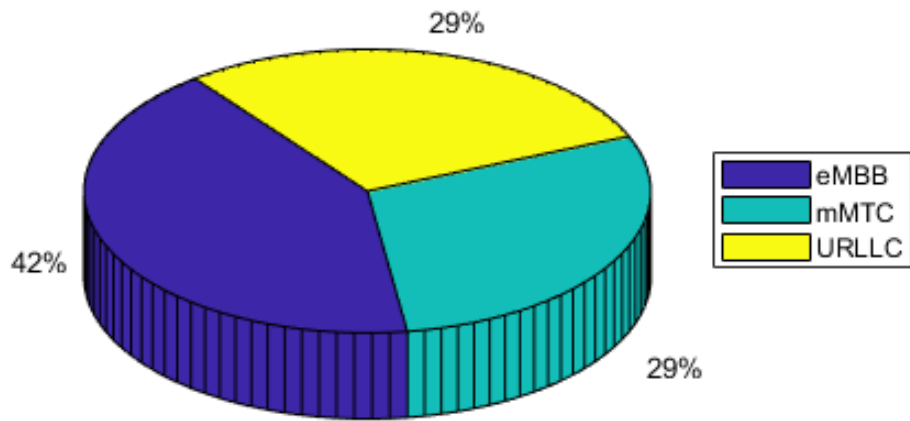


Рис. 5.35. Середній розподіл ресурсів OBS-EN між різними сервісами.

Поєднання розроблених у даному розділі методів управління інформаційними потоками на рівні мереж PON та OBS дає змогу забезпечити інтеграцію децентралізованих систем мобільного зв'язку у цілісну мережну інфраструктуру, із забезпеченням наскрізного управління якістю передавання інформаційних потоків різних операторів та типів сервісу (рис. 5.36) [302-227].

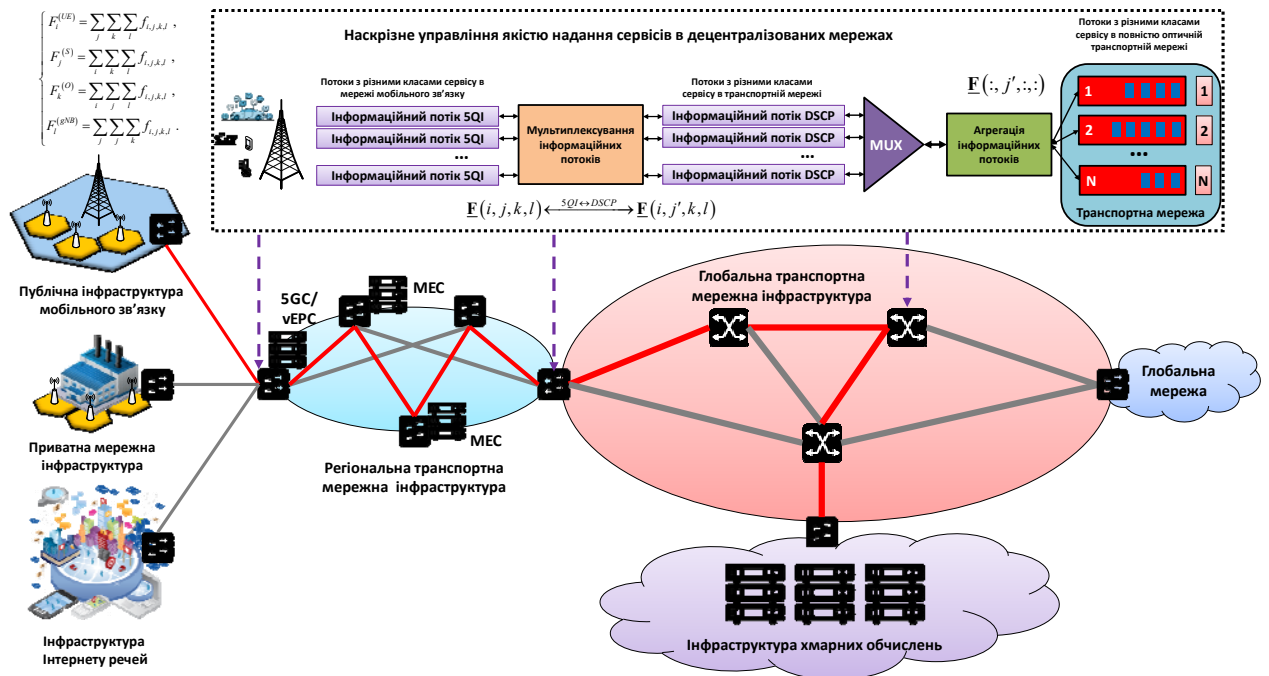


Рис. 5.36. Глобальна інфраструктура оптичних транспортних мереж з наскрізним управлінням інформаційними потоками децентралізованих систем мобільного зв'язку.

## **5.5. Висновки до 5-го розділу**

Розвинуто метод інтелектуального управління інформаційними потоками в транспортній мережній інфраструктурі для наскрізного забезпечення якості надання сервісів. Для цього удосконалено метод інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу, який враховує взаємозв'язок між інтенсивністю трафіку в сусідніх сегментах мережі мобільного зв'язку, при здійсненні хендоверу між ними. Це дало змогу знизити обсяг надлишкового трафіку в оптичних мережах доступу до 20% за рахунок прогнозування переміщення абонентів та проактивної маршрутизації трафіку. Розвинуто метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі, який забезпечує узгоджене диференціювання інформаційних потоків з різними вимогами до якості сервісу на основі штучного інтелекту, що дало змогу забезпечити наскрізне управління інформаційними потоками в децентралізованих системах мобільного зв'язку національного масштабу.

## **РОЗДІЛ 6. МЕТОДОЛОГІЧНІ ТА ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ СИНТЕЗУ ДЕЦЕНТРАЛІЗОВАНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ МЕРЕЖ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ**

### **6.1. Перспективні моделі розгортання децентралізованих мереж мобільного зв'язку приватними організаціями та мікро-операторами**

В загальному варіанти розгортання децентралізованих мереж мікро-операторами можна класифікувати на дві основні групи: приватні та орендовані в оператора [237,239,328]. У випадку приватної мережі, стейкхолдери розгортають автономну мережу, яка є незалежною від публічних мереж операторів мобільного зв'язку. Такий підхід дає змогу повністю відокремити процес управління ресурсами та інфраструктурою та забезпечити підприємствам високу гнучкість з точки зору оптимізації мережної інфраструктури під власні бізнес-процеси. Крім того, технології автоматизації мережі, такі як самовідновлення на основі елементів штучного інтелекту, дає змогу приватним операторам мінімізувати втручання в інфраструктуру для відновлення несправностей та масштабування ресурсів, що значно зменшує операційне навантаження ІТ-персоналу на підприємстві. Таким чином, приватна мережа поєднує в собі найсучасніші технології зв'язку, обчислень та автоматизації для ефективної цифрової трансформації підприємств та секторів економіки. Проте, у такому випадку, підприємства повинні отримати права на використання радіочастотних ресурсів, або використовувати лише неліцензійні частотні діапазони. Для цього, підприємствам необхідно реєструватися, як віртуальним операторам мобільного зв'язку в системі блокчейн, щоб мати доступ до децентралізованого ринку радіочастотних ресурсів.

Для випадку орендованої інфраструктури мережі, стейкхолдери можуть укладати угоди з операторами мобільного зв'язку для локального розгортання інфраструктури на підприємстві та її інтеграції з мережею ядра оператора. В такому варіанті, передбачається функціонування розгорнутої мережі 5G разом з публічною 5G мережею оператора в спільному частотному діапазоні. Така

модель потребує управління ресурсами в мережі оператора для забезпечення необхідного рівня якості обслуговування відповідно до угоди SLA з підприємством. Варто зазначити, що оператор в такому випадку повинен резервувати необхідні обсяги радіочастотних ресурсів шляхом здійснення відповідних транзакцій в мережі блокчейн [219]. Крім того, в залежності від масштабів корпоративної мережі, підприємства можуть одночасно укладати угоди з різними операторами для підтримки різноманітних внутрішніх процесів. Наприклад, один оператора може надавати сервіси ширококутового доступу до мережі Інтернет та інфраструктури граничних обчислень, у той час як інший – інфраструктуру для Інтернету речей та Індустрії 4.0. Нижче розглянуто різні моделі розгортання приватної інфраструктури 5G [219,328].

**1. Розгортання автономної корпоративної інфраструктури мережі 5G приватними компаніями з використанням виділеного локального радіочастотного ресурсу.** В такому випадку приватні компанії розгортають власну повноцінну мережну інфраструктуру 5G, як показано на рис. 6.1. При цьому для радіодоступу використовується окремо виділений локальний радіочастотний ресурс, який відокремлений від радіочастотного ресурсу публічних мереж мобільного зв'язку. На сьогоднішній час окреме виділення локального радіочастотного ресурсу для мереж 5G затверджене на законодавчому рівні в таких країнах як США, Японія та Німеччина [219,328].

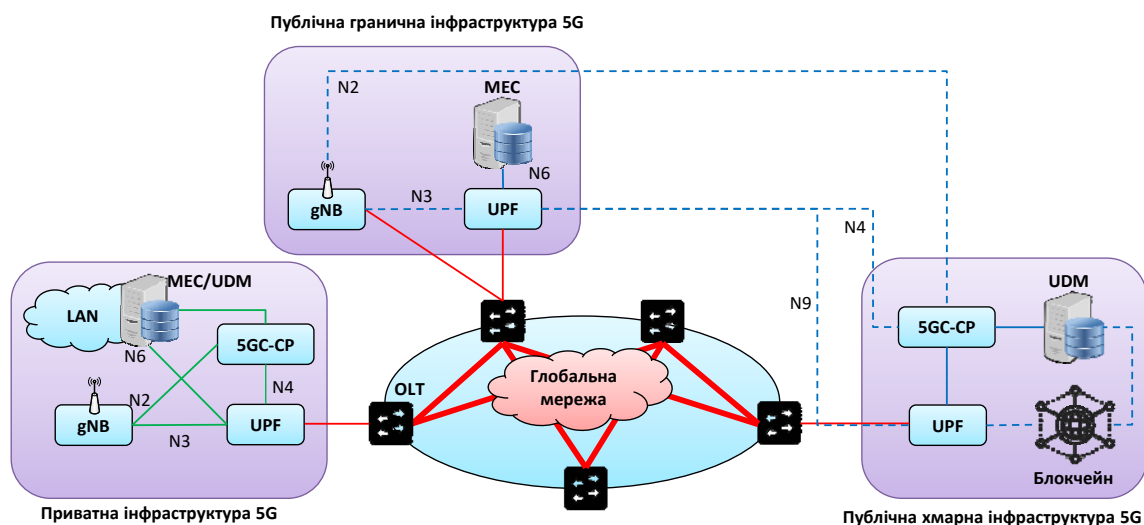


Рис. 6.1. Приклад розгортання автономної інфраструктури мережі 5G.

Така модель розгортання забезпечує надійність зв'язку та конфіденційність приватних даних компанії, за рахунок фізичного відокремлення від мережі публічного оператора, а також наднизьку затримку до 10 мс, що дає змогу реалізувати сервіси URLLC локально в межах підприємства, що є особливо актуальним для автоматизації виробництва (Індустрія 4.0) та контролю критичних об'єктів (електростанції, станції розподілу природного газу, тощо). Проте, з економічної точки зору, така модель потребує значних капіталовкладень, що є прийнятним лише для великих компаній.

**2. Розгортання автономної корпоративної інфраструктури мережі 5G операторами мобільного зв'язку з використанням власного радіочастотного ресурсу.** Така модель аналогічна до попередньої з точки зору архітектури побудови (рис. 6.1). Ключовою відмінністю є те, що розгортання мережної інфраструктури 5G, здійснюється оператором. При цьому для радіодоступу використовується ліцензійний радіочастотний ресурс оператора, який використовується спільно з публічною мережею мобільного зв'язку [219,328]. Така модель дає змогу приватним компаніям забезпечити усі переваги першої моделі, без необхідності значних капітальних затрат. Проте, в такому випадку компанія стає залежною від політики оператора з точки зору тарифікації послуг та розподілу радіочастотного ресурсу. Незважаючи на це, дана модель ефективно реалізується з використанням запропонованих у другому розділі методів для управління SLA на основі смарт-контрактів у мережі блокчейн.

**3. Розгортання із спільним використанням інфраструктури радіодоступу 5G між приватною та публічною мережею.** В такій конфігурації уся мережа ядра 5G є приватною, і відокремлена від публічної мережі 5G, як і в двох попередніх випадках. Проте, базові станції gNB, які знаходяться територіально в межах приватної мережі, можуть спільно використовуватись для передавання даних приватної та публічної мережі відповідно (RAN Sharing) [219,328].

Перевагою такої моделі є гнучкість управління потоками із забезпеченням можливості абонентів одночасно використовувати як публічну так і корпоративну мережу 5G. Такий варіант є особливо ефективним для великих організацій, які займають значну територію. Наприклад, університети, корпуси яких істотно рознесені в межах міста, можуть забезпечити приватний доступ студентів та викладацького персоналу до внутрішніх інформаційних систем, а оператори можуть обслуговувати абонентів в межах домену публічної мережі, спільно використовуючи інфраструктуру базових станцій на основі запропонованої у другому розділі моделі токенизації ресурсів. При цьому, інформаційні потоки в межах gNB логічно розділені між собою, як показано на рис. 6.2.

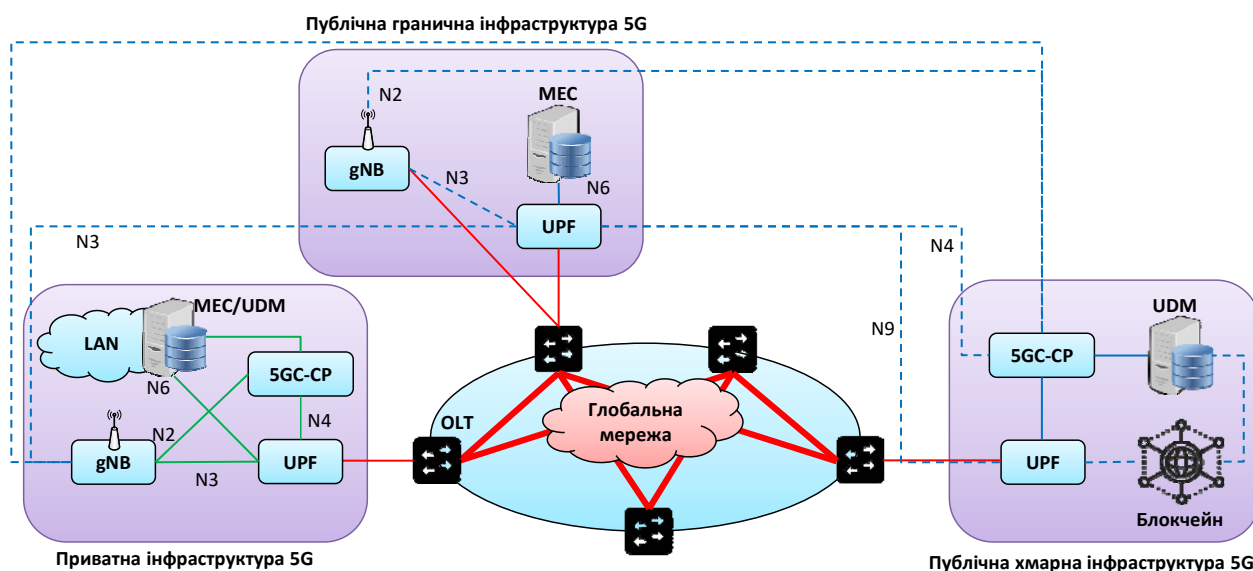


Рис. 6.2. Приклад розгортання автономної інфраструктури мережі 5G із спільним використанням базових станцій.

4. *Розгортання із спільним використанням інфраструктури радіодоступу та площини управління ядра 5G між приватною та публічною мережею.* В даній моделі на стороні приватної компанії залишається лише UPF та MEC для зберігання та обробки приватних даних. Уся інша інфраструктура 5G спільно використовується приватною та публічною мережею (RAN + Control Plane Sharing). Як і в попередньому випадку, інформаційні потоки приватної та публічної мережі логічно розділені між собою. В залежності від динаміки навантаження, розподіл ресурсів на рівні

ядра та на рівні базових станцій може періодично змінюватись, шляхом використання відповідних смарт-контрактів. При цьому, функції управління мобільністю та автентифікації перенесені у мережу ядра оператора. Дана модель забезпечує додаткову гнучкість з точки зору управління у порівнянні із попереднім випадком [219,328].

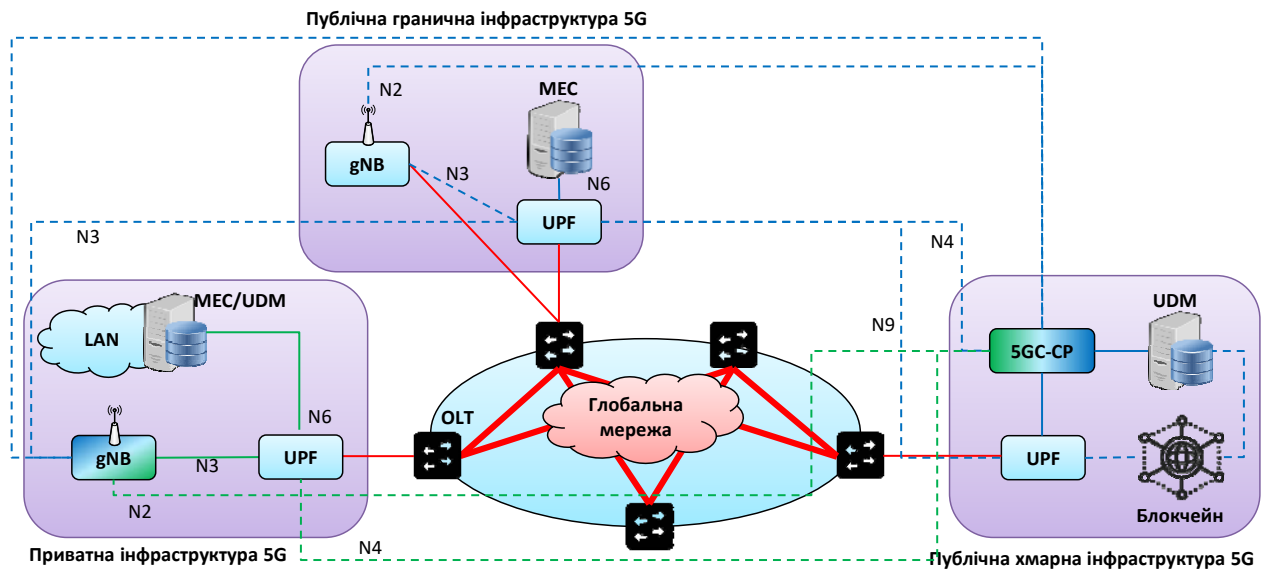


Рис. 6.3. Приклад розгортання інфраструктури мережі 5G із спільним використанням базових станцій та площини управління ядра.

**5. Розгортання із повним спільним використанням інфраструктури 5G між приватною та публічною мережею.** На відміну від попереднього випадку, дана модель передбачає що UPF та MEC розгортаються у граничній інфраструктурі оператора, у той час як у приватній компанії залишаються лише gNB. В такому випадку, взаємозв'язок між локальною корпоративною мережею та корпоративною мережею відсутній, і усі приватні інформаційні потоки проходять через ядро оператора (End-to-End Network Slicing). Така модель передбачає, що усі локальні потоки обслуговуються сервером MEC у граничній інфраструктурі ядра публічної мережі, що призведе до більшої затримки, у порівнянні із попередніми моделями, якщо відстань між ними буде значною. Проте, за рахунок зниження елементів інфраструктури, які необхідно розгорнути приватним компаніям, така модель є найбільш привабливою для швидкого розгортання з економічної точки зору [219,328].



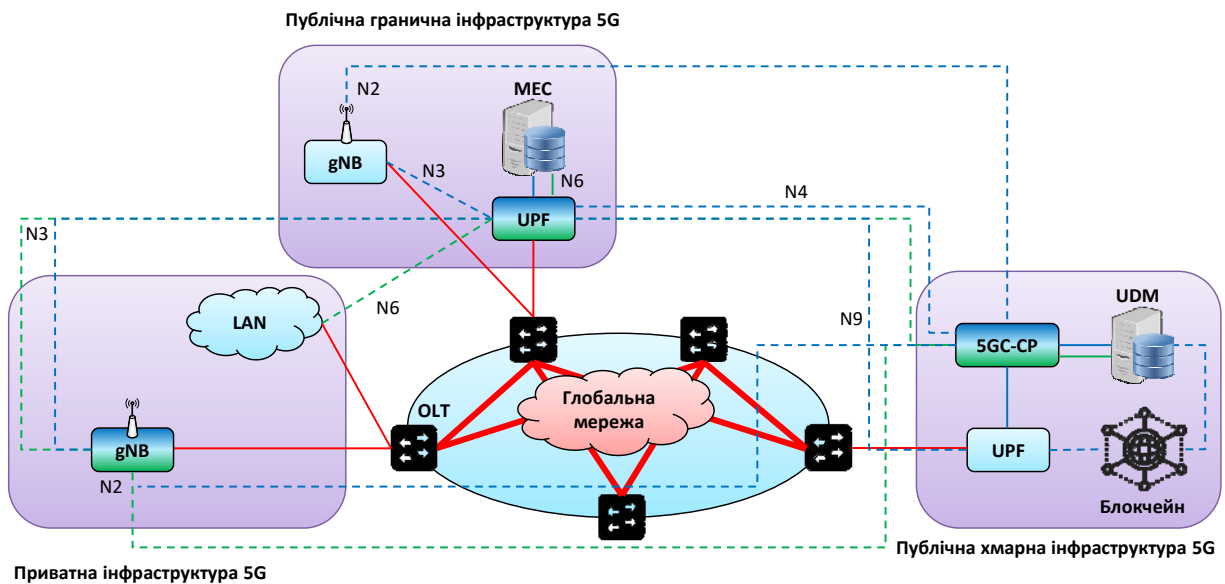


Рис. 6.4. Приклад розгортання інфраструктури мережі 5G із спільним використанням базових станцій та площини управління ядра.

**6. Розгортання із локальною оркестрацією інформаційних потоків gNB між приватною та публічною мережею.** На відміну від попередніх варіантів, дана модель передбачає використання додаткового сервера MEC DP (Data Plane) для локальної оркестрації інформаційних потоків на стороні приватної мережі (рис. 6.5). MEC DP перевіряє IP-адресу призначення для усіх GTP тунелів (GPRS Tunneling Protocol). Якщо адреса призначення відповідає локальній корпоративній мережі, MEC DP здійснює декапсуляцію потоку із GTP та переправлення його у локальну мережу. Якщо адреса призначення відповідає публічній мережі оператора, то MEC DP пропускає даний GTP тунель до UPF оператора (Local Breakout). Незважаючи на те, що такий метод ще не стандартизований 3GPP, він успішно працює на практиці у мережі оператора SK Telecom (Південна Корея). Перевагою такого підходу є зниження навантаження на транспортну інфраструктуру, оскільки немає потреби у логічному розділенні інформаційних потоків, наднизька затримка оскільки MEC DP знаходиться у безпосередній близькості до локальних інформаційних систем та захист від зовнішніх атак [329-331]. Враховуючи, що MEC DP не є стандартизованим пристроєм 3GPP, функції управління мобільністю та доступом залишаються на стороні мережі ядра оператора [219,328].

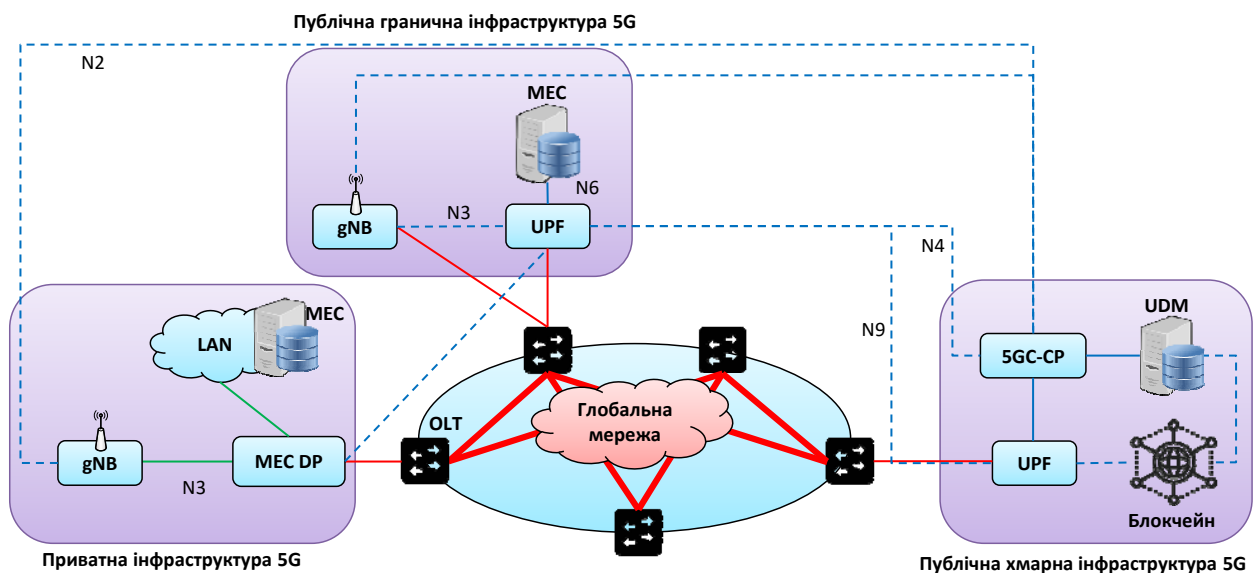


Рис. 6.5. Приклад розгортання інфраструктури мережі 5G із локальною оркестрацією інформаційних потоків gNB.

*7. Розгортання із локальною оркестрацією інформаційних потоків DU між приватною та публічною мережею.* Дана модель є аналогічною до попередньої з точки зору використання вузла MEC DU. Відмінністю є те, що в приватному сегменті розміщуються лише вузли RU та DU, у той час як CU перенесений у граничну інфраструктуру оператора (рис. 6.6). Така модель на практиці використовується оператором КТ (Південна Корея) [219,328].

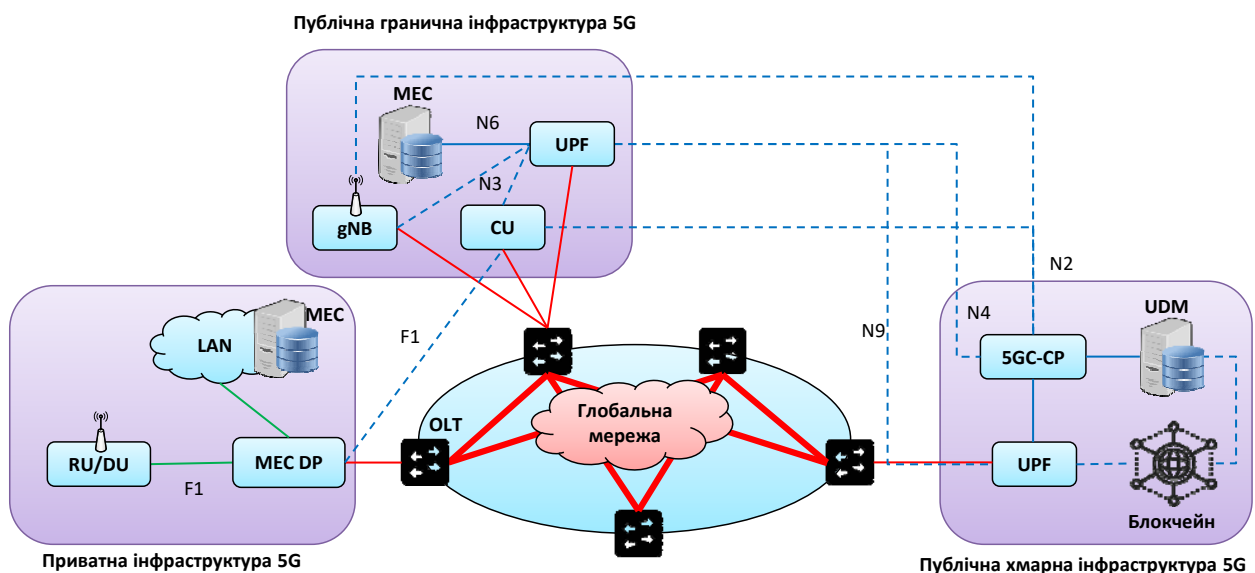


Рис. 6.6. Приклад розгортання інфраструктури мережі 5G із локальною оркестрацією інформаційних потоків DU.

## 6.2. Розроблення прототипу децентралізованої мережі мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням

### 6.2.1. Загальна архітектура розробленого прототипу мережі мобільного зв'язку

Для розроблення прототипу децентралізованої мережі мобільного зв'язку використано програмно-конфігуровані апаратні радіомодулі National Instruments USRP 2900, які є універсальними для реалізації довільної технології радіодоступу. В розробленій системі, на основі USRP 2900 реалізовано базові станції eNB стандарту LTE (3GPP Release 14) та gNB стандарту 5G NR (3GPP Release 16). Для реалізації системи управління децентралізованою мережною інфраструктурою, розгорнуто програмні компоненти віртуалізованих функцій ядра vEPC/5GC, використовуючи хмарну інфраструктуру Google Cloud та сервіс Google Kubernetes Engine. Опис програмної реалізації мережі мобільного зв'язку представлено у додатку А. Для реалізації системи управління смарт-контрактами використано існуючу блокчейн-інфраструктуру Ethereum Test Network. Опис програмної реалізації смарт-контрактів представлено у додатку Б. Загальна архітектура розробленої системи представлена на рис. 6.7 [332].

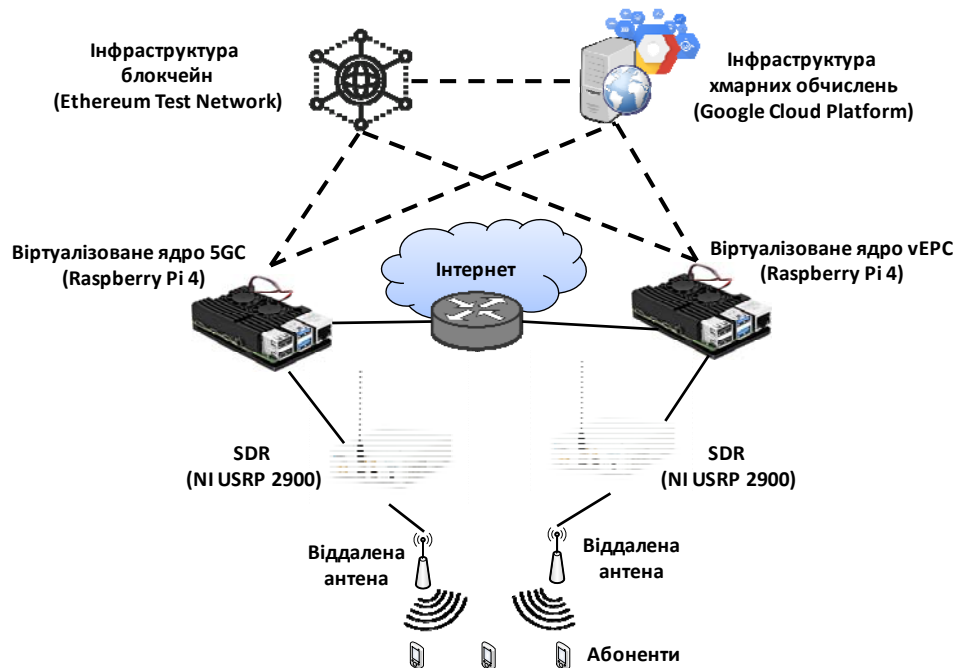


Рис. 6.7. Структурна схема прототипу децентралізованої мережі мобільного зв'язку.

## **6.2.2. Практична реалізація системи інтелектуального управління децентралізованою інфраструктурою мережі мобільного зв'язку**

Для запропонованої архітектури мережі використовується модель «інфраструктура як сервіс» (IaaS – Infrastructure as a Service) постачальника хмарних послуг Google Cloud Platform (GCP). Дана модель включає в собі проміжне програмне забезпечення, мережу, процесори, графічні процесори, оперативну пам'ять, зовнішнє сховище даних, сервери та образи базових операційних систем. Для створення системи інтелектуального управління необхідно забезпечити об'єднання усіх вищезгаданих елементів в одну цілісну хмарну інфраструктуру, яка задовольняє відповідним вимогам [298,332].

Використання запропонованої архітектури дає змогу підвищити гнучкість управління інфраструктурою мережі 5G з точки зору розподілу радіочастотних ресурсів, налаштування параметрів хендоверу, контролю політик якості обслуговування, координації та уникнення інтерференційних завад, а також багатьох інших параметрів мережі [49-66].

Для побудови хмарної інфраструктури використано сервіс GCP Virtual Private Cloud (VPC), який забезпечує функціонал для управління хмарними ресурсами. VPC – це аналог фізичної мережі у віртуалізованому представленні в середовищі Google Cloud. Зв'язок між всіма хмарними ресурсами реалізований через VPC мережу [298,332].

Середовищем для розробки та роботи системи обрано сервіс Google Kubernetes Engine (GKE). GKE забезпечує кероване середовище для розгортання, керування та масштабування контейнеризованих програм за допомогою інфраструктури Google. GKE середовище складається з множини віртуальних машин сервісу Google Compute Engine, згрупованих в кластер. Кожен кластер керується системою менеджменту кластерів Kubernetes. За допомогою ресурсів та команд Kubernetes можна розгорнути та керувати програмами, виконувати завдання адміністрування, встановлювати політики та контролювати стан розгорнутих застосувань. Kubernetes базується на аналогічній структурі, яка використовується популярними службами Google,

що надає йому ряд переваг, таких як автоматичне керування, моніторинг та контроль активності для контейнерів з додатками, автоматичне масштабування, впровадження оновлень тощо. Загальна архітектура кластера GKE складається з як мінімум одного головного вузла (master node) та з кількох робочих вузлів (worker nodes) [298,332].

Головний вузол керує площиною управління Kubernetes, включаючи сервер Kubernetes API, планувальник та контролери основних ресурсів. Життєвим циклом головного вузла керує GKE під час створення або видалення кластера. Цей цикл включає в себе оновлення версії Kubernetes, що працює на головному вузлі, яке GKE виконує автоматично, або вручну за запитом. Всі взаємодії з кластером проводяться через запити Kubernetes API напряду через HTTP/gRPC, або за посередництвом клієнта командної стрічки kubectl чи за допомогою інтерфейсу абонента в хмарній консолі GCP. Головний вузол також відповідає за розподіл завдань та функцій між робочими вузлами кластера. Як правило, кластер має один або декілька робочих вузлів, які виконують контейнеризовані програми та функції [298,332].

Робочими вузлами керує головний вузол, який отримує оновлення про стан кожного вузла. Це включає як безпосередній контроль над життєвим циклом вузла, так і автоматичні оновлення на усіх вузлах кластера. Робочий вузол запускає служби, необхідні для підтримки контейнерів Docker, які складають навантаження кластера. До них відносяться Docker runtime та агент вузла Kubernetes (kubelet), який спілкується з головним вузлом і відповідає за запуск та підтримку контейнерів Docker, запланованих на відповідному робочому вузлі. При флуктуації робочого навантаження, яке пов'язано із кількістю активних абонентів кластер автоматично змінює кількість вузлів в пулі, базуючись на поточних потребах [298,332].

Реалізація інтелектуального управління мережею 5G передбачає використання методів машинного навчання та штучного інтелекту. Тому, для підтримки таких алгоритмів використано обчислювальну інфраструктуру з графічними та тензорними процесорами (NVIDIA Tesla) [298,332].

Важливим аспектом системи є системи збереження великих обсягів даних мереж 5G. Вибір варіантів зберігання даних програм, що працюють в Google Kubernetes Engine (GKE) залежить від їх гнучкості та простоти використання. Крім цього, Kubernetes надає абстракцію сховища даних, яка використовується для підтримки функціонування кластера [298,332].

Для реалізації алгоритмів на основі нейронних мереж в запропонованій системі розгортається фреймворк TensorFlow, який складається із набору програмних бібліотек для машинного навчання та вирішення завдань побудови і тренування нейронної мережі. Основний інтерфейс для роботи з даною бібліотекою реалізований на мові Python. Загальна архітектура побудованої системи управління мережами 5G представлена на рис. 6.8 [298,332].

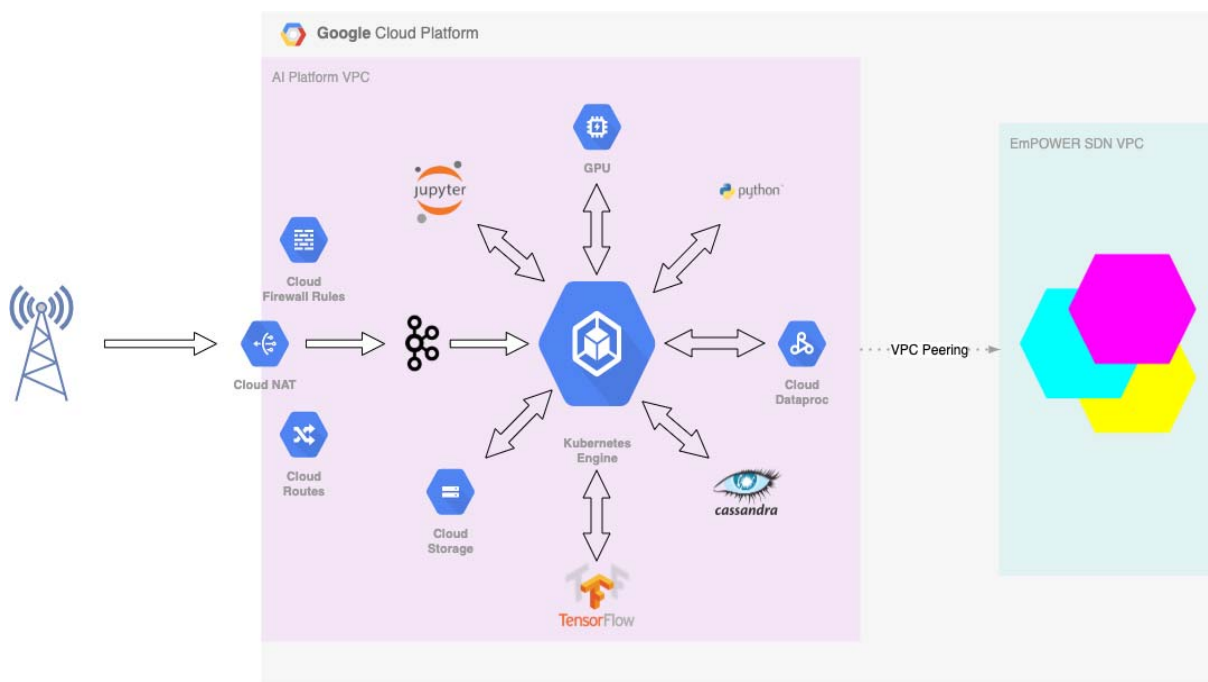


Рис. 6.8. Загальна архітектура хмарної інфраструктури інтелектуальної платформи.

Процес функціонування мережі відбувається наступним чином. Кінцеві користувачі підключаються до базових станцій, створюючи тим самим певний паттерн використання ресурсів. В залежності від розташування базової станції та типу послуги, яка надається, здійснюється логічне розділення віртуалізованих ресурсів мережі. Вся статистика при цьому записується у відповідні лог-файли, які перенаправляються на IP адресу інтелектуальної

хмарної системи управління. Весь трафік, що поступає до Cloud NAT фільтрується за правилами мережевого екрану та правилом пересилання, і направляється до сервісу Apache Kafka в GKE кластері. Дані з базових станції перенаправляються в Datarproc кластер на обробку і після цього зберігаються в базі даних Cassandra. Відповідно, навчальні вибірки для нейронних мереж формуються напряму із даних, які доступні в Cassandra [298,332].

Навчені нейронні мережі використовуються для прогнозування параметрів трафіку в мережі 5G, які безпосередньо передаються до контролера SDN (Software Defined Network) через інтерфейс VPC Peering для прийняття рішення стосовно необхідної конфігурації інфраструктури мобільного зв'язку [298,332].

### **6.2.3. Розроблення системи автоматизованого управління віртуалізованою мережною інфраструктурою на основі архітектури SDN**

Для управління гетерогенними мережами мобільного зв'язку використано SDN-платформи 5G-EmPOWER та Open5GS, які працюють на основі протоколу OpenEmpower разом із колекцією вбудованих функціоналів та сервісів [333].

Платформа 5G-EmPOWER чітко відокремлює операції на площині управління, які залишаються на радіоінтерфейсі, та операції на площині управління, які консолідується поверх рівня операційної системи. Агент вводиться в eNB для здійснення управлінських дій, визначених операційною системою. Зв'язок між агентом та операційною системою здійснюється через протокол OpenEmpower, який є адаптованою версією OpenFlow з підтримкою віддаленого керування елементами гетерогенної інфраструктури радіодоступу довільного типу (Wi-Fi AP, LTE eNB або 5G gNB). В процесі практичної реалізації системи управління, було виявлено, що в поточній версії протоколу OpenEmpower не реалізована можливість віддаленого управління параметрами радіоканалу на базі стеку srsLTE [333]. Тому, для розширення функціоналу SDN платформи, розроблено програмне забезпечення для зміни конфігурації eNB, з урахуванням потреб у адаптивному управлінні радіочастотним ресурсом

на основі розробленої у другому розділі моделі токенизації. Веб інтерфейс SDN контролера представлено на рис. 6.9 [219,332].

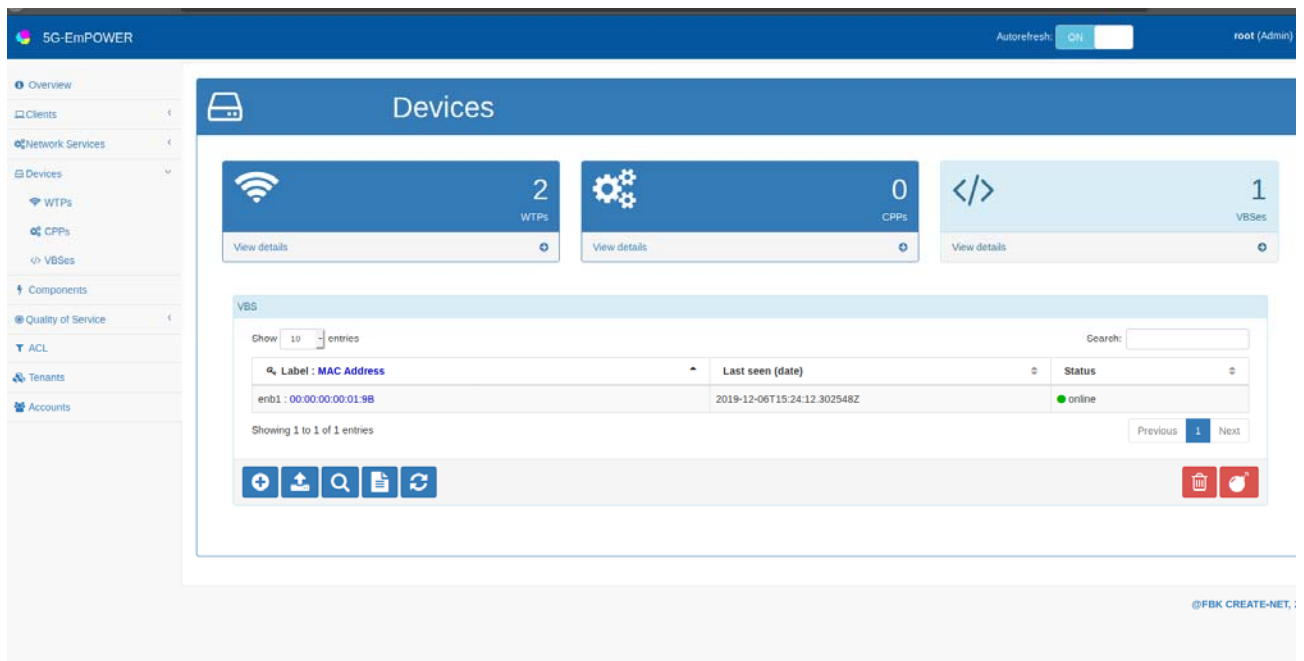


Рис. 6.9. Приклад інтерфейсу SDN контролера для управління базовими станціями.

Крім того, розроблена система управління інтегрована з графічним інтерфейсом децентралізованої системи моніторингу на основі хмарної платформи ThingsBoard. Особливістю даного інтерфейсу є можливість гнучкої конфігурації для потреб операторів, абонентів та системних адміністраторів, які здійснюють контроль за процесом функціонування мережної інфраструктури. Причому, кожен оператор може налаштувати власний інтерфейс та інтегрувати його з відповідними функціями в децентралізованій системі моніторингу та управління з використанням спеціалізованих функцій API. Приклад інтерфейсу для моніторингу рівня сигналу, який отримують різні абоненти від базової станції представлено на рис. 6.10 [218,229, 334].

Окрім того, розроблено інтерфейс взаємодії із картами для територіально-залежної візуалізації даних мережної інфраструктури (рис. 6.11) [218,258]. Для цього використано відкриту геоінформаційну систему OpenStreetMaps, яка



інтегрована в рамках платформи ThingsBoard. Поєднання бібліотеки OpenStreetMaps із розробленою системою дає змогу візуалізувати методи моделювання мобільності абонентів та планування покриття в межах досліджуваної місцевості, які запропоновані у третьому розділі дисертаційної роботи [258].

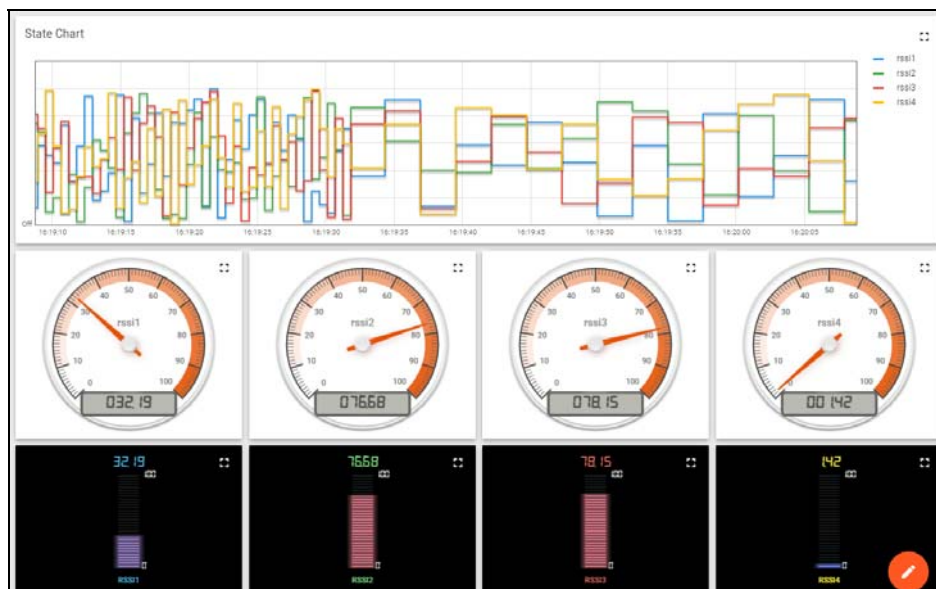


Рис. 6.10. Приклад графічного інтерфейсу для моніторингу параметрів сигналу абонентів.

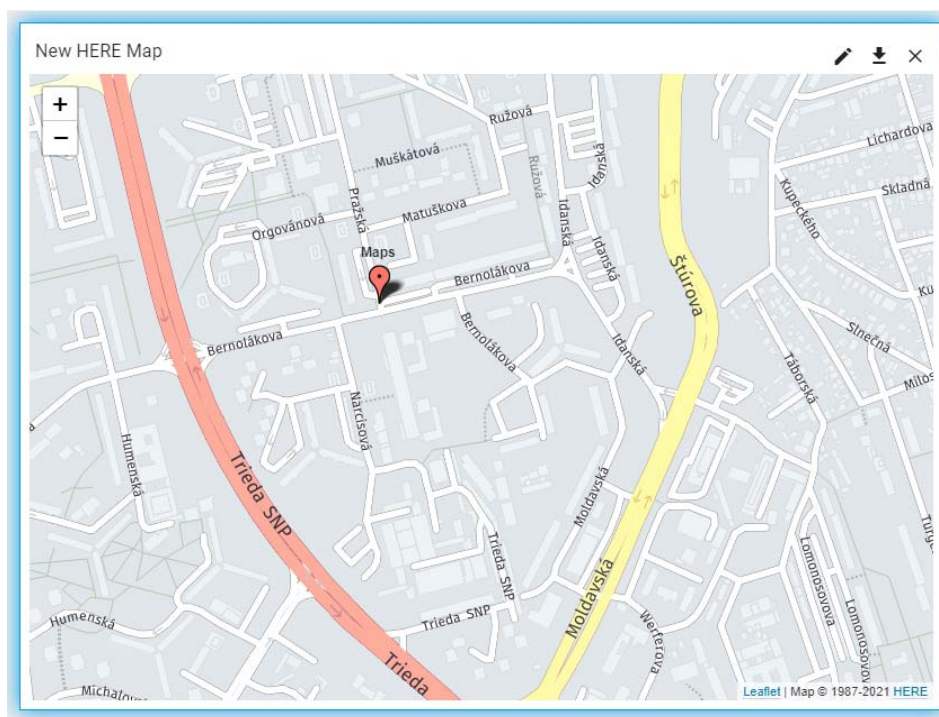


Рис. 6.11. Приклад візуалізації траєкторії абонента з використанням бібліотеки OpenStreetMaps.

Для забезпечення двосторонньої взаємодії між децентралізованою мережною інфраструктурою та інтерфейсом системи управління, реалізовано функціонал віддаленого управління параметрами мережної інфраструктури з використанням протоколу виклику віддалених процедур RPC (Remote Procedure Call). Приклад керування представлено на рис. 6.12 [332].

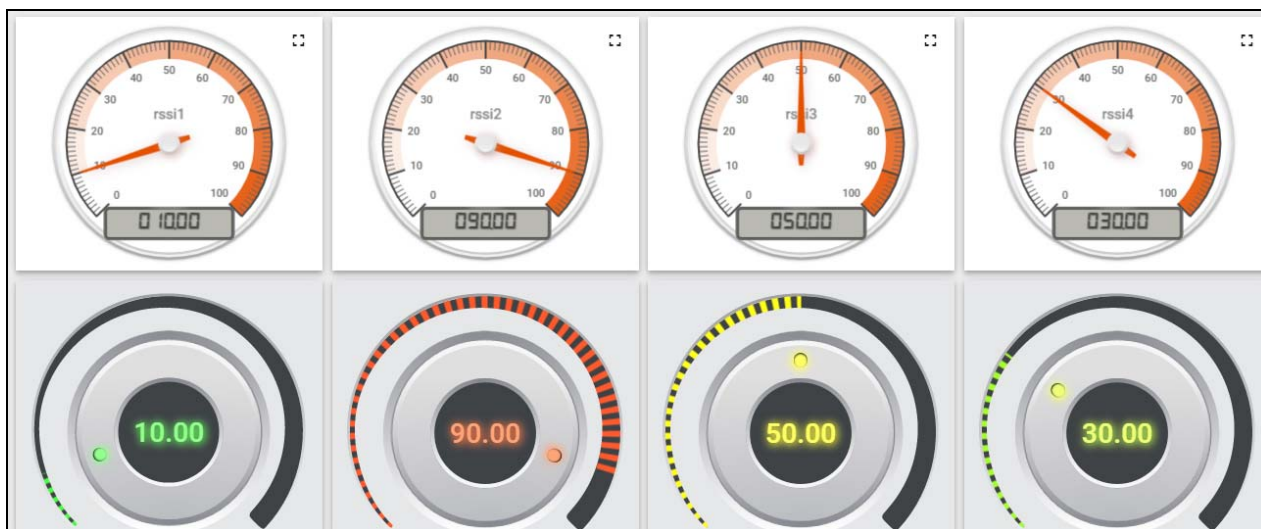


Рис. 6.12. Приклад віддаленого управління параметрами мережної інфраструктури з використанням розробленої системи управління.

#### **6.2.4. Практична реалізація смарт-контрактів на основі інфраструктури блокчейн**

Як вже згадувалось у другому розділі, для реалізації смарт-контрактів у роботі використовується тестова інфраструктура Ethereum Test Network. Ethereum – це перша та найбільш розвинута блокчейн інфраструктура, яка підтримує розгортання та виконання смарт-контрактів [163-168,219]. Усі транзакції у блокчейні Ethereum використовують власну криптовалюту ETH. Для розрахунку вартості комісії за проведення транзакцій у мережі Ethereum використовується додаткова одиниця – Gas. Вартість однієї одиниці Gas визначається в ETH та використовується для винагороди валідаторам (майнерам) за використання їх обчислювальних ресурсів. Незалежно від мови програмування, на якій написані смарт-контракти, їх вихідний код компілюється у байт-код, який може бути виконаний віртуальною машиною Ethereum (EVM). Такий підхід дає змогу забезпечити інтероперабельність

децентралізованої платформи управління мережами мобільного зв'язку для різних операторів та абонентів, які можуть використовувати власне програмне забезпечення [165].

EVM – це стекова віртуальна машина, де кожен байт-код додається в стек і виконується. При виконанні коду EVM використовує Gas, і здійснює облік його використання. Витрата Gas на обчислення EVM визначається в залежності від типу операції та встановлюється організацією Ethereum Foundation відповідно до трьох факторів: зберігання даних, використання мережних ресурсів та використання обчислювальних ресурсів [335]. Детальна таблиця з актуальними даними про витрати Gas для кожної операції наведена у додатку.

Відповідно до архітектури Ethereum, у запропонованій системі використовується два типи облікових записів: приватні облікові записи абонентів, операторів та інших сторін, і облікові записи смарт-контрактів. Для виконання смарт-контракту транзакція, яка складається з адреси контракту, вхідних даних, параметрів GasPrice та GasLimit, підписується та надсилається в блокчейн. Майнери, які працюють у даному блокчейні, виконують відповідний код, використовуючи EVM. При успішному виконанні, здійснюється модифікація усіх необхідних змінних у реєстрах. Коди розроблених смарт-контрактів представлено у додатку Б.

В процесі виконання даного дисертаційного дослідження використовувалась перша версія блокчейну Ethereum, яка базується на використанні алгоритму консенсусу PoW (Proof-of-Work). При цьому, 1 грудня 2020 року успішно стартувала нульова фаза переходу на Ethereum 2.0, який базується на використанні алгоритму консенсусу PoS (Proof-of-Stake). Враховуючи, що PoS вже забезпечує значно вищу пропускну здатність транзакцій у порівнянні із PoW, а також план поступового удосконалення Ethereum 2.0 та інших перспективних блокчейнів, можна зробити припущення, що ефективність запропонованих у роботі технічних рішень з використанням смарт-контрактів у перспективі буде лише зростати, що дасть змогу в

подальшому досягти прогресу і з точки зору управління децентралізованими системами мобільного зв'язку.

У таблиці 6.1. представлено порівняння деяких перспективних блокчейн інфраструктур з точки зору їх характеристик [148-214,219,335,336]. Варто зазначити, що окрім алгоритму консенсусу, важливим аспектом який визначає швидкодію блокчейну є його тип. З точки зору доступу до децентралізованого реєстру даних, блокчейни поділяються на відкриті публічні, закриті публічні та закриті приватні. Аналогічно, за типом оброблення транзакцій блокчейни розділяються на:

- Публічні, які є повністю відкритими, і дають змогу будь-кому приймати участь у процесі майнінгу/валідації транзакцій.
- Консорціумні, які визначають певну групу вузлів, які можуть приймати участь у процесі майнінгу/валідації транзакцій.
- Приватні, у якій усі транзакції обробляються в централізованому порядку.

Характерною особливістю є те, що чим нижчий ступінь децентралізації процесу оброблення транзакцій, тим вищою є швидкість функціонування блокчейну. З іншого боку, чим вищий ступінь децентралізації, тим вищою є захищеність блокчейну від атак «типу 51%», а також ступінь взаємної довіри між учасниками [148-214,219,335,336].

Враховуючи реалії функціонування децентралізованих мереж мобільного зв'язку, можна зробити висновок, що для реалізації різних функцій управління можна використовувати різні типи блокчейн інфраструктур, які забезпечують оптимальне співвідношення між швидкістю обробки транзакцій, безпекою та ступенем децентралізованості, масштабованістю, енергетичною ефективністю, підтримкою стандартів токенизації та багатьма іншими характеристиками. На сьогоднішній час у світі вже працює понад 1000 блокчейнів та понад 100 алгоритмів консенсусу, і їх кількість стрімко зростає [148-214,219,335,336]. При цьому, сама індустрія розподілених реєстрів знаходиться у своїй початковій стадії розвитку, і має значний потенціал на майбутнє, враховуючи, що перші смарт-контракти з'явилися лише у 2014 році з появою блокчейну Ethereum.

Тому для подальшого розвитку методів децентралізованого управління інформаційно-комунікаційними системами необхідні нові методи інтеграції приватних та публічних блокчейн-інфраструктур з урахуванням потреб окремих функцій управління [148-214,219,335,336].

Таблиця 6.1.

Порівняння алгоритмів консенсусу в блокчейн [148-214,219,335,336].

<b>Алгоритм/ Блокчейн</b>	<b>Транзакції/с</b>	<b>Затримка підтвердження</b>	<b>Властивості</b>
PoW/Bitcoin, Ethereum 1.0	10-50	6-60 хв	Висока захищеність Низька пропускна здатність
PoS/Ethereum 2.0, Polkadot, Cardano	100-10000	1-30 хв	Висока захищеність Висока пропускна здатність
Byzantine Fault Tolerance (BFT)/ Hyperledger Fabric, Stellar	1000-2000	1-60 с	Низька захищеність Висока пропускна здатність
Delegated Proof-of-Stake (DPoS)/EOS	1000-2000	<1 с	Низька захищеність Висока пропускна здатність
Proof-of- Formulation (PoF)/FLETA	Понад 10000	<1 с	Висока захищеність Висока пропускна здатність

### **6.3. Правові аспекти використання смарт-контрактів та технології блокчейн в системах децентралізованого управління мережною інфраструктурою**

Недавній розвиток технології блокчейн дав змогу здійснювати токенизацію фізичних активів та випускати токени цінних паперів. Порівняно з криптовалютами (наприклад Bitcoin) та початковими пропозиціями монет (ICO), які не мають чітко визначених процедур регулювання, токенизація потребує обов'язкової наявності активу. Таким активом може бути або частка цінних паперів компанії або частина певного фізичного (мережа

інфраструктура), або логічного (радіочастотний ресурс) активу. Таким чином, токени повинні бути більш надійними, оскільки вони підтримуються певною формою матеріальних або фінансових активів, які гарантуються смарт-контрактом [219,240,241].

Варто зазначити, що не зважаючи на термін "смарт-контракт", цей контракт насправді не має жодної юридичної сили з точки зору чинного законодавства. На практиці, смарт-контракт це лише фрагмент коду програми, яка зберігається у блокчейні, і може автоматично виконуватись після розгортання. В такому випадку, є технічна можливість володіти токенованим активом у мережі блокчейн, наприклад базовою станцією gNB, не зважаючи на те, що насправді даної gNB може і не існувати. Тому, забезпечення взаємодії блокчейну, смарт-контрактів та законодавчих нормативно-правових актів є надзвичайно важливим для регулювання ринку токенованих активів у децентралізованих мережах мобільного зв'язку [219,240,241].

Зокрема, у 2019 році ініціативою Європейської комісії запропоновано ряд напрямків для регулювання індустрії блокчейн. Існуючі стратегії розвитку ЄС розглядають технологію блокчейн, як одну з ключових для створення Єдиного цифрового ринку Європи та впровадження інновацій.

Таким чином, в рамках концепції децентралізованих мереж мобільного зв'язку варто виділити ряд основних принципів, яких треба дотримуватись при використанні технології блокчейн.

1. Створення простих та зрозумілих до використання визначень понять «блокчейн» та «смарт-контракт» на законодавчому рівні, які будуть однаково інтерпретуватися усіма регуляторними органами та урядовими установами в національному та міжнародному масштабі.

2. Уряди усіх країн повинні докласти зусиль для широкого прийняття технології блокчейн регуляторами даних, наприклад eIDAS (Electronic Identification, Authentication and Trust Services) або GDPR (General Data Protection Regulation), забезпечуючи таким чином спільне розуміння та використання технології для всього ринку.

3. Вибір необхідних підходів до правового регулювання сфери блокчейн. Зокрема, є три варіанти правового регулювання. Перший варіант полягає у застосуванні існуючих законів та норм регулювання ринку мереж мобільного зв'язку до нових технологічних умов. Другий варіант, полягає у модифікації існуючих законів, враховуючи нові особливості токенизації радіочастотного ресурсу та його обміну між операторами. І третій, найбільш радикальний, полягає у розробленні принципово нових нормативно-правових актів та правил регулювання, які враховують специфіку окремих застосувань технології блокчейн не лише в сфері мобільного зв'язку, але й у інших галузях економіки та державного управління.

4. Забезпечення розуміння технології блокчейн на політичному рівні. Однією із ключових проблем технології блокчейн є відсутність повного розуміння та негативний імідж Біткоїна з точки зору відмивання грошей, фінансування злочинності та анонімність. Таким чином, важливо забезпечити ряд зусиль для поширення знань про технології та екосистеми блокчейн.

5. Особливість незмінності технології блокчейн призвела до багатьох питань та сумнівів щодо узгодження законодавства блокчейн з політиками Загального регламенту захисту даних GDPR (General Data Protection Regulation), який прийнятий у країнах ЄС. Зокрема, слід розглянути три ключові питання: (1) Складність визначення контролерів даних та забезпечення виконання вимог GDPR щодо контролю даних. (2) Створення підходів для аудиту ідентичності кожної транзакції через її незмінність. (3) Дані, записані в блокчейні, не можуть бути змінені або видалені, що ускладнює здійснення деяких політик GDPR стосовно виключення даних із реєстрів. Тому, важливо досягти узгодження між технологією блокчейн та політиками GDPR.

7. Використання блокчейну як інструменту регулювання. Регулятори, наприклад НКРЗІ повинні контролювати та регулювати галузь шляхом підключення до блокчейн платформ та моніторингу транзакцій з точки зору законодавчих та економічних обмежень.

#### **6.4.Методологія синтезу та інтеграції децентралізованих систем мобільного зв'язку в рамках національної інформаційно-комунікаційної інфраструктури**

На сьогоднішній час, усі об'єкти соціальної та економічної інфраструктури держави потребують окремого структурно-функціонального підходу для організації відповідних взаємозв'язків як на рівні телекомунікаційної мережі, так і на рівні інформаційної інфраструктури спільного доступу до державних реєстрів даних. Тому, важливо не лише фізично розбудувати мережі мобільного зв'язку, але і забезпечити їх ефективне функціонування шляхом гнучкого управління інформаційними потоками для забезпечення належної якості надання різних сервісів цифрової економіки незалежно від способу підключення громадян до мережі Інтернет. Іншим важливим завданням є розвиток інфраструктури Інтернет речей, яка є однією з ключових технологій для цифрової трансформації не лише в Україні, але й у світі. Незважаючи на різноманіття існуючих стандартів радіозв'язку для Інтернету речей, на сьогодні одним із головних стримуючих факторів є складність регулювання радіочастотного ресурсу, велике різноманіття технологій зв'язку, а також відсутність належної обчислювальної інфраструктури. Відповідно, створення національної інфраструктури хмарних обчислень, для передавання, збереження, систематизації та аналізу великих обсягів даних, є важливим аспектом для забезпечення ефективної синергії мереж мобільного зв'язку 5G/6G, інфраструктури Інтернету речей та технологій штучного інтелекту в масштабах держави. Основна складність на сьогодні полягає у відсутності механізмів електронного інформаційного обміну не лише між різними соціально-економічними сферами, але і в рамках взаємодії суб'єктів однієї сфери (освіта, медицина, тощо). Це, в свою чергу, потребує інтегрального системного підходу до цифровізації та структурування державних реєстрів, і забезпечення ефективного доступу до них для всіх абонентів, операторів та інших суб'єктів господарювання. Одним із стратегічних напрямків вирішення даного завдання в рамках держави є використання технології блокчейн для всіх ділових процесів,



а також розвиток платформи інтероперабельності “Трембіта”. Серед численної кількості блокчейн-інфраструктур можна відзначити основні відмінності їх реалізації з точки зору способу розгортання або алгоритму консенсусу, які визначають такі властивості системи як швидкодія, масштабованість, безпека та приватність особистих даних. Дані аспекти суттєво впливають на ефективність застосування блокчейн-інфраструктури в рамках цифрової економіки, у зв’язку із різними потребами окремих сфер. Тому, важливим аспектом є створення нових підходів до інтеграції приватних та публічних блокчейн-інфраструктур в рамках національної децентралізованої мережі мобільного зв’язку. Зокрема, важливо врахувати загальну структуру мережі, яка в горизонтальній площині поділяється на територіальні зони обслуговування, а у вертикальній на окремі приватні мережі різних сфер економічного, соціального та державного управління, які в свою чергу можуть бути як національного, так і регіонального масштабу. Такий структурний поділ мереж мобільного зв’язку дасть змогу забезпечити ефективне управління процесами обміну та зберігання даних, за рахунок обмеження доменів обміну інформацією в межах окремих приватних мереж. Відповідно, поєднання усіх вищезгаданих аспектів в рамках єдиної децентралізованої національної інфраструктури мереж мобільного зв’язку є важливим завданням для забезпечення інтелектуального автоматизованого управління процесом їх функціонування в режимі реального часу.

Методологія синтезу децентралізованих систем мобільного зв’язку здійснюється шляхом поетапного децентралізованого структурно-функціонального синтезу мережної інфраструктури, з виділенням основних структурних елементів та відповідних функціональних зв’язків між ними.

1. На першому етапі досліджується існуюча інфраструктура мереж мобільного та фіксованого зв’язку, стандарти її функціонування та поточний стан нормативної бази стосовно регулювання радіочастотного ресурсу між операторами.

2. Наступним етапом є модернізація існуючої інфраструктури оптичних мереж для забезпечення ієрархічної агрегації інформаційних потоків та

наскрізного управління магістральними інформаційними потоками між регіональними мережами мобільного зв'язку. Дані аспекти є важливими в контексті подальшого децентралізованого синтезу мереж мобільного зв'язку в масштабах держави [302-327].

3. На третьому етапі необхідно розгорнути ефективну блокчейн-інфраструктуру з підтримкою смарт-контрактів та токенизації ресурсів для інтеперабельності між операторами та регулятором з точки зору спільного управління радіочастотним ресурсом, адаптивного використання мережної інфраструктури та наскрізної автентифікації абонентів. Зокрема пропонується комбіноване використання приватних та публічних блокчейн-інфраструктур, з адаптивним вибором алгоритму консенсусу в залежності від типу транзакцій та її вимог до швидкодії, надійності та захисту інформації [216,219,233,236,240,241].

4. Для автоматизації управління необхідно забезпечити розподілену обчислювальну інфраструктуру для інтеграції методів збереження та аналізу великих обсягів даних, а також інтеграції елементів штучного інтелекту для вирішення ключових завдань таких як, наскрізне управління інформаційними потоками у децентралізованих мережах, інтелектуальне управління радіочастотним ресурсом в ліцензійному та неліцензійному діапазонах, інтелектуальне планування покриття, управління мобільністю та програмно-конфігуроване управління інфраструктурою мереж мобільного зв'язку [216-218, 220,221,246-250,298-327].

5. Заключним етапом є перехід ринку мобільного зв'язку у фазу децентралізованого техніко-економічного саморегулювання з використанням запропонованих у роботі методів, моделей та алгоритмів. При достатньо тривалому періоді функціонування, децентралізовані мережі мобільного зв'язку досягатимуть еволюційно стабільної рівноваги за рахунок статистичних закономірностей поведінки абонентів та також інших екзогенних факторів, які притаманні ринку мобільного зв'язку [219,233].

У підсумку реалізація запропонованих рішень дасть змогу досягти синергетичного ефекту розвитку економіки, створення нових інформаційних сервісів в національному та регіональному масштабах, стимулювати розвиток інформаційного суспільства та сфери штучного інтелекту, покращити соціальні стандарти життя населення, та підвищити конкурентоздатність економіки України.

### **6.5. Висновки до 6-го розділу**

Запропоновано ряд стратегій розгортання приватних мереж мобільного зв'язку. Розглянуто основні принципи правового регулювання ринку мобільного зв'язку та сформовано основні рекомендації стосовно правового регулювання технології блокчейн для надання їй чіткого статусу з точки зору управління відкритим ринком мобільного зв'язку.

Для перевірки запропонованих у роботі технічних рішень, розроблено прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку з використанням програмно-конфігурованих радіомодулів, тестової блокчейн-інфраструктури Ethereum та системи інтелектуального управління на основі хмарної інфраструктури Google Cloud.

Розроблено методологічні та практичні рекомендації для синтезу децентралізованої інфраструктури мереж мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням, шляхом поетапного децентралізованого структурно-функціонального синтезу мережної інфраструктури, з виділенням основних структурних елементів та відповідних функціональних зв'язків між ними.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-прикладну проблему розроблення методів, моделей та засобів інтелектуального управління децентралізованою мультиоператорною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку, з метою підвищення її техніко-економічної ефективності для операторів та абонентів, в умовах відкритого ринку радіочастотного ресурсу та мережної інфраструктури.

1. Систематизовано основні аспекти інтелектуального управління, автоматизації та децентралізації мультиоператорної інфраструктури мереж мобільного зв'язку. Сформовано сукупність окремих завдань, розв'язок яких дав змогу досягти синергетичного ефекту підвищення ефективності функціонування мультиоператорних мереж мобільного зв'язку за множиною технічних та економічних критеріїв, в умовах децентралізованого розгортання інфраструктури, відкритого ринку радіочастотного ресурсу та адаптивного обслуговування абонентів без прив'язки до оператора.

2. Запропоновано структурно-функціональну модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку, яка базується на відокремленні площини абонентів, площини мережної інфраструктури, площини операторів, площини децентралізації та площини інтелектуального управління, що дало змогу операторам автоматизовано координувати процес спільного використання мережної інфраструктури, на основі смарт-контрактів, токенизації активів та методів штучного інтелекту. В рамках моделі визначено основних учасників ринку мобільного зв'язку, які взаємодіють між собою, а саме: регулятор, власники радіочастот, власники інфраструктури та абоненти.

3. Розроблено систему децентралізованого краудсорсингового моніторингу просторових характеристик мережі мобільного зв'язку на основі протоколів HTTP та MQTT, що дає змогу передавати будь-яку мережну інформацію як від абонентів, так і від операторів із заданою періодичністю. Розроблена система дає змогу передавати важливу статистичну інформацію, не перевантажуючи при цьому мережу та забезпечує операторам гнучкий процес збору даних із

статистичною повнотою інформації для аналітичних засобів машинного навчання.

4. Запропоновано модель токенизації радіочастотного та інфраструктурного ресурсу на основі стандарту невзаємозамінних токенів ERC 721, що дало змогу оцифрувати мережні активи операторів та сторонніх стейкхолдерів, для їх подальшого обміну шляхом фінансових транзакцій у мережі блокчейн. Зокрема, запропоновано токен LRRT – як цифровий еквівалент мінімального ліцензійного радіочастотного ресурсу, токен URRT – як цифровий еквівалент неліцензійного радіочастотного ресурсу, токен IRT – як цифровий еквівалент ресурсів мережної інфраструктури, таких як базова станція, віртуальна машина, довжина хвилі у волоконно-оптичних каналах зв'язку, тощо. Для торгівлі токенами використовується національна криптовалюта CBDC, яка емітується центральним банком як еквівалент фіатної валюти.

5. Розроблено метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу на основі смарт-контрактів у мережі блокчейн. Ключовою особливістю запропонованого методу є унікальна функція корисності абонента, яка аналітично виведена на основі інтегрального параметру якості сервісу, параметру вартості сервісу та компромісного коефіцієнту між ними. Розроблений метод функціонує на основі децентралізованої блокчейн-платформи управління смарт-контрактами, що забезпечує повсюдне обслуговування абонентів з використанням їх публічних ключів у мережі блокчейн. Такий підхід дав змогу підвищити пропускну здатність для абонентів до 11% при незмінній вартості сервісу, а також збільшити прибутки операторів до 27%.

6. Запропоновано алгоритм моделювання мобільності абонентів, який використовує генеративно-змагальні нейронні мережі. Особливістю запропонованого алгоритму, є можливість адаптації до довільного середовища та індивідуальних атрибутів кінцевих абонентів. Для моделювання просторово-часових статистичних характеристик трафіку, запропонований алгоритм використовує геоінформаційну систему OpenStreetMaps, яка дає змогу

представити досліджувану територію у вигляді графа маршрутів, на основі якого генеруються траєкторії переміщення абонентів. Такий підхід, дав змогу врахувати особливості цільової зони покриття території з точки зору не лише маршрутів переміщення абонентів, але й типу району, що в свою чергу забезпечує адекватність моделі просторово-часової локалізації абонентів. Використання даної моделі, в процесі синтезу коміркової структури, дало змогу підвищити системну спектральну ефективність мережі мобільного зв'язку на 7%.

7. Розвинуто метод проектування покриття мережі мобільного зв'язку на основі самоорганізованих карт Кохонена. Ключовими відмінностями методу є використання метрики співвідношення сигнал/шум, замість метрики Евклідової відстані, що дало змогу враховувати просторові характеристики зони покриття із щільною забудовою, а також використання фіксованих вагових коефіцієнтів нейронної мережі, що дало змогу врахувати існуючі базові станції в процесі проектування нової мережної інфраструктури. Таким чином, забезпечується децентралізований синтез цілісної топологічної структури мережі мобільного зв'язку різними операторами. Для дослідження, розроблено імітаційну модель фізичної інфраструктури мережі мобільного зв'язку, яка враховує тривимірну копію забудови місцевості на основі геоінформаційної системи OpenStreetMaps та реальне розташування базових станцій на основі бази OpenCellID. Запропонований підхід дав змогу на 20% підвищити ймовірність обслуговування абонентів із прийнятним співвідношенням сигнал/шум, за рахунок моделювання просторових характеристик радіоканалів з багатопроблемним поширенням хвиль на етапі синтезу складних топологічних структур.

8. Запропоновано техніко-економічну модель спільного використання ліцензійного радіочастотного ресурсу в мультиоператорній мережі мобільного зв'язку на основі теорії ігор. Особливістю даної моделі є торгівля токенизованими активами радіочастотного ресурсу на основі смарт-контрактів між операторами, за правилами ринкової економіки. Результати моделювання

показують, що запропонована модель дає змогу досягти еволюційно-стабільної рівноваги між ціновими політиками операторів, забезпечуючи при цьому лінійну залежність складності алгоритму від кількості абонентів. Експериментальні дослідження підтверджують ефективність розробленої моделі, з точки зору підвищення середньої пропускної здатності для абонентів до 30% та зменшення кількості відмов в обслуговуванні до 14%.

9. Запропоновано модель спільного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мобільного зв'язку, яка використовує смарт-контракти на основі кооперативної ігрової моделі. Результати моделювання показують, що запропонована модель досягає рівноваги Неша за незначну кількість ітерацій, забезпечуючи при цьому рівномірний розподіл доступу до неліцензійного частотного діапазону незалежно від кількості конкуруючих операторів. Для додаткового підвищення ефективності використання радіочастотного ресурсу в неліцензійному діапазоні розроблено алгоритм координованого прослуховування частотних каналів, який полягає у формуванні окремих груп абонентів з унікальними дискретними інтервалами прослуховування. Таким чином, вдалося знизити ймовірність одночасного передавання даних абонентами в неліцензійному діапазоні від 5 до 30%, а також підвищити середні значення пропускної здатності для абонентів до 35%.

10. Розвинуто метод інтелектуального управління радіочастотним ресурсом в мультиоператорних мережах мобільного зв'язку, шляхом прогнозування часових характеристик трафіку окремих типів сервісу з використанням глибоких рекурентних нейронних мереж. Розроблений алгоритм прогнозування дав змогу операторам мобільного зв'язку попередньо резервувати необхідні обсяги радіочастотного ресурсу для обслуговування запитів абонентів, що збільшило їх прибутки до 19% та підвищило пропускну здатність для абонентів до 7%.

11. Розвинуто метод інтелектуального управління інформаційними потоками в транспортній мережній інфраструктурі для наскрізного забезпечення якості надання сервісів. Для цього розвинуто метод

інтелектуального мультиплексування інформаційних потоків у оптичних мережах доступу, який враховує взаємозв'язок між інтенсивністю трафіку в сусідніх сегментах мережі мобільного зв'язку, при здійсненні хендоверу між ними. Це дало змогу знизити обсяг надлишкового трафіку в оптичних мережах доступу до 20% за рахунок прогнозування переміщення абонентів та проактивної маршрутизації трафіку. Розвинуто метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі, який забезпечує узгоджене диференціювання інформаційних потоків з різними вимогами до якості сервісу на основі штучного інтелекту, що дало змогу забезпечити наскрізне управління інформаційними потоками в децентралізованих системах мобільного зв'язку національного масштабу.

12. Для перевірки запропонованих у роботі технічних рішень, розроблено прототип децентралізованої мережі мобільного зв'язку з використанням програмно-конфігурованих базових станцій стандартів LTE та 5G на основі універсальних програмно-апаратних платформ NI USRP 2900, віртуалізованих мікросервісів ядра мереж 4G та 5G на основі платформи Raspberry Pi, тестової блокчейн інфраструктури Ethereum та системи інтелектуального управління на основі хмарної інфраструктури Google Cloud.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. A. Ghosh, A. Maeder, M. Baker and D. Chandramouli, "5G Evolution: A View on 5G Cellular Technology Beyond 3GPP Release 15," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 127639-127651, 2019.
2. T.-K. Le, U. Salim and F. Kaltenberger, "An Overview of Physical Layer Design for Ultra-Reliable Low-Latency Communications in 3GPP Releases 15, 16, and 17," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 433-444, 2021.
3. X. Meng, J. Li, D. Zhou and D. Yang, "5G technology requirements and related test environments for evaluation," in *China Communications*, vol. 13, no. Supplement2, pp. 42-51, 2016.
4. X. Xu, H. Zhang, X. Dai, Y. Hou, X. Tao and P. Zhang, "SDN based next generation Mobile Network with Service Slicing and trials," in *China Communications*, vol. 11, no. 2, pp. 65-77, Feb 2014, doi: 10.1109/CC.2014.6821738.
5. J. Mei, X. Wang and K. Zheng, "An intelligent self-sustained RAN slicing framework for diverse service provisioning in 5G-beyond and 6G networks," in *Intelligent and Converged Networks*, vol. 1, no. 3, pp. 281-294, Dec. 2020.
6. I. Afolabi, M. Bagaa, W. Boumezer and T. Taleb, "Toward a Real Deployment of Network Services Orchestration and Configuration Convergence Framework for 5G Network Slices," in *IEEE Network*, vol. 35, no. 1, pp. 242-250, January/February 2021.
7. I. Afolabi, T. Taleb, P. A. Frangoudis, M. Bagaa and A. Ksentini, "Network Slicing-Based Customization of 5G Mobile Services," in *IEEE Network*, vol. 33, no. 5, pp. 134-141, Sept.-Oct. 2019.
8. J. Carneiro, R. J. F. Rossetti, D. C. Silva and E. C. Oliveira, "BIM, GIS, IoT, and AR/VR Integration for Smart Maintenance and Management of Road Networks: a Review," *IEEE International Smart Cities Conference*, 2018, pp. 1-7.

9. S. Paul, S. Hamad and S. Khalid, "The Role of AR/VR in an IoT Connected Digital Enterprise for Smart Education," *Sixth HCT Information Technology Trends (ITT)*, 2019, pp. 305-308.
10. L. Cominardi, T. Deiss, M. Filippou, V. Sciancalepore, F. Giust and D. Sabella, "MEC Support for Network Slicing: Status and Limitations from a Standardization Viewpoint," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 4, no. 2, pp. 22-30, June 2020.
11. M. Jo, T. Maksymyuk, R. L. Batista, T. F. Maciel, A. L. F. de Almeida and M. Klymash, "A survey of converging solutions for heterogeneous mobile networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 54-62, December 2014.
12. J. Hong, Y. H. Cho, S. K. Kim, J. -H. Na and J. Kwak, "Spatio-Temporal Degree of Freedom: Interference Management in 5G Edge SON Networks," *2021 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, 2021, pp. 491-494.
13. G. R. Murthy, "Optimization of Quadratic Forms: NP Hard Problems: Neural Networks," *2013 International Symposium on Computational and Business Intelligence*, 2013, pp. 217-220.
14. C. Zhang, Y. Ueng, C. Studer and A. Burg, "Artificial Intelligence for 5G and Beyond 5G: Implementations, Algorithms, and Optimizations," in *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 10, no. 2, pp. 149-163, June 2020.
15. C. Zhang, P. Patras and H. Haddadi, "Deep Learning in Mobile and Wireless Networking: A Survey," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 3, pp. 2224-2287, thirdquarter 2019.
16. M. Chen, U. Challita, W. Saad, C. Yin and M. Debbah, "Artificial Neural Networks-Based Machine Learning for Wireless Networks: A Tutorial," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 4, pp. 3039-3071, Fourthquarter 2019.
17. Y. Arjoun and S. Faruque, "Artificial Intelligence for 5G Wireless Systems: Opportunities, Challenges, and Future Research Direction," *2020 10th*

*Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, 2020, pp. 1023-1028.

18. Z. M. Fadlullah et al., "State-of-the-Art Deep Learning: Evolving Machine Intelligence Toward Tomorrow's Intelligent Network Traffic Control Systems," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2432-2455, Fourthquarter 2017.

19. C. Benzaid and T. Taleb, "AI-Driven Zero Touch Network and Service Management in 5G and Beyond: Challenges and Research Directions," in *IEEE Network*, vol. 34, no. 2, pp. 186-194, March/April 2020.

20. K. Kweon, D. M. Gutierrez-Estevez, J. Pujol-Roig and S. Jeong, "Automated Multi-service 5G Session Timer via AI-based Network Data Analytics Function," *2020 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, 2020, pp. 1-6.

21. S. M. A. Zaidi, M. Manalastas, H. Farooq and A. Imran, "SyntheticNET: A 3GPP Compliant Simulator for AI Enabled 5G and Beyond," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 82938-82950, 2020.

22. C. Törnevik, T. Wigren, S. Guo and K. Huisman, "Time Averaged Power Control of a 4G or a 5G Radio Base Station for RF EMF Compliance," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 211937-211950, 2020.

23. O. Yaremko, B. Stryhalyuk, T. Maksymyuk, O. Lavriv, D. Kozhurov, "The optimal power control method in multiuser cellular networks," *An International Quarterly Journal on Economics in Technology, New Technologies and Modelling Processes*, vol. 2, no. 1, pp. 63-67, 2013.

24. 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*, 2015, pp. 481-483.

25. T. Maksymyuk, M. Brych and A. Masyuk, "Fractal geometry based resource allocation for 5G heterogeneous networks," *2015 Second International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, 2015, pp. 69-72.

26. T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok, "Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks," *Smart Computing Review*, vol. 5, no. 2, pp. 89-101, 2015.
27. Т.А. Максимюк, Р.А. Бурачок, І.Б. Чайковський, М.В. Брич, "Моделі стохастичної геометрії для гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління", *Комп'ютерні технології друкарства*, №33, С. 112-119, 2015.
28. S. Sadr and R. S. Adve, "Tier Association Probability and Spectrum Partitioning for Maximum Rate Coverage in Multi-Tier Heterogeneous Networks," in *IEEE Communications Letters*, vol. 18, no. 10, pp. 1791-1794, Oct. 2014.
29. T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo, "Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands," in *Smart Computing Review*, vol. 5, no.4, pp. 346-355, 2015.
30. П. О. Гуськов, Т. А. Максимюк, М. М. Климаш, "Метод динамічного формування структури рівня радіодоступу", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*, №818, С. 220-230, 2015.
31. Т. А. Максимюк, М. В. Брич, М. М. Климаш, "Оптимізація параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі", *Наукові записки УНДІЗ*, № 4 (38), С. 5-16, 2015.
32. Z. Khan, H. Ahmadi, E. Hossain, M. Coupechoux, L. A. Dasilva and J. J. Lehtomäki, "Carrier aggregation/channel bonding in next generation cellular networks: methods and challenges," in *IEEE Network*, vol. 28, no. 6, pp. 34-40, Nov.-Dec. 2014, doi: 10.1109/MNET.2014.6963802.
33. Y. Rui, P. Cheng, M. Li, Q. T. Zhang and M. Guizani, "Carrier aggregation for LTE-advanced: uplink multiple access and transmission enhancement features," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, no. 4, pp. 101-108, August 2013.
34. J. Liu and W. Xiao, "Advanced carrier aggregation techniques for multi-carrier ultra-dense networks," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 7, pp. 61-67, July 2016.

35. R. Khdhir, B. Cousin, K. Mnif and K. Ben Ali, "Neural network approach for component carrier selection in 4G/5G networks," *2018 Fifth International Conference on Software Defined Systems (SDS)*, 2018, pp. 112-117.
36. H. -J. Kwon et al., "Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum in LTE Release 13," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 201-207, February 2017.
37. M. Jo, M. Klymash, T. Maksymyuk and R. Kozlovskiy, "Dynamic spectrum sharing algorithm for combined mobile networks," *2014 20th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (MIKON)*, 2014, pp. 1-3.
38. G. Hampel, C. Li and J. Li, "5G Ultra-Reliable Low-Latency Communications in Factory Automation Leveraging Licensed and Unlicensed Bands," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 5, pp. 117-123, May 2019.
39. X. Lu, V. Petrov, D. Moltchanov, S. Andreev, T. Mahmoodi and M. Dohler, "5G-U: Conceptualizing Integrated Utilization of Licensed and Unlicensed Spectrum for Future IoT," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 7, pp. 92-98, July 2019.
40. E. Pateromichelakis, O. Bulakci, C. Peng, J. Zhang and Y. Xia, "LAA as a Key Enabler in Slice-Aware 5G RAN: Challenges and Opportunities," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 29-35, March 2018.
41. M. M. Bin Tariq, K. Faizan, M. Ali and F. Qamar, "LTE-Unlicensed and WiFi: Sharing Unlicensed Spectrum in 5GHz Band," *2019 15th International Conference on Emerging Technologies (ICET)*, 2019, pp. 1-6.
42. Y. Song, K. W. Sung and Y. Han, "Coexistence of Wi-Fi and Cellular With Listen-Before-Talk in Unlicensed Spectrum," in *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 161-164, Jan. 2016.
43. P. A. Guskov, R. Z. Kozlovskiy, T. A. Maksymyuk and M. M. Klymash, "Methods and techniques of spectrum refarming for LTE network deployment," *2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*, 2013, pp. 474-475.

44. N. Patriciello, S. Lagén, B. Bojović and L. Giupponi, "NR-U and IEEE 802.11 Technologies Coexistence in Unlicensed mmWave Spectrum: Models and Evaluation," *in IEEE Access*, vol. 8, pp. 71254-71271, 2020.
45. X. Lu et al., "Integrated Use of Licensed- and Unlicensed-Band mmWave Radio Technology in 5G and Beyond," *in IEEE Access*, vol. 7, pp. 24376-24391, 2019.
46. D. Cvetkovski, E. Grass, T. Hälsig and B. Lankl, "Hardware-in-the-loop demonstration of a 60GHz line-of-sight 2×2 MIMO link," *IEEE EUROCON 2017 - 17th International Conference on Smart Technologies*, 2017, pp. 631-636.
47. U. Challita, L. Dong and W. Saad, "Proactive Resource Management for LTE in Unlicensed Spectrum: A Deep Learning Perspective," *in IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 17, no. 7, pp. 4674-4689, July 2018.
48. J. Tan, L. Zhang, Y. -C. Liang and D. Niyato, "Intelligent Sharing for LTE and WiFi Systems in Unlicensed Bands: A Deep Reinforcement Learning Approach," *in IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 5, pp. 2793-2808, May 2020.
49. 3GPP TS 23.501, version 15.3.0, Release 15, "5G; System Architecture for the 5G System," Sep. 2018.
50. 3GPP TS 33.512, version 16.4.0, Release 16, "5G Security Assurance Specification (SCAS); Access and Mobility management Function (AMF)," Dec. 2020.
51. 3GPP TS 29.508, version 15.0.0, Release 15, "5G; 5G System; Session Management Event Exposure Service," June, 2018.
52. 3GPP TS 33.513, version 16.2.0, Release 16, "5G Security Assurance Specification (SCAS); User Plane Function (UPF)," Dec. 2020.
53. 3GPP TS 29.503, version 15.0.0, Release 15, "5G; 5G System; Unified Data Management Services," July, 2018.
54. 3GPP TS 29.504, version 15.3.0, Release 15, "5G; 5G System; Unified Data Repository Services," May, 2019.

55. 3GPP TS 29.598, version 16.1.0, Release 16, “5G; Unstructured data storage services,” July, 2020.
56. 3GPP TS 29.531, version 15.0.0, Release 15, “5G; 5G System; Network Slice Selection Services,” Sep. 2018.
57. 3GPP TS 23.503, version 15.2.0, Release 15, “5G; Policy and Charging Control Framework for the 5G System,” July, 2018.
58. 3GPP TS 29.522, version 15.3.0, Release 15, “5G; 5G System; Network Exposure Function Northbound APIs,” April, 2019.
59. 3GPP TS 29.510, version 15.3.0, Release 15, “5G; 5G System; Network function repository services,” April, 2019.
60. 3GPP TS 29.517, version 16.3.0, Release 16, “5G System; Application Function Event Exposure Service,” Dec. 2020.
61. 3GPP TS 29.540, version 15.0.0, Release 15, “5G; 5G System; SMS Services,” Sep. 2018.
62. 3GPP TS 24.502, version 15.0.0, Release 15, “5G; Access to the 3GPP 5G Core Network (5GCN) via non-3GPP access networks,” June, 2018.
63. 3GPP TS 23.002, version 13.5.0, Release 13, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Network architecture,” March, 2016.
64. 3GPP TS 29.303, version 12.4.0, Release 12, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Core Network and Terminals; Domain Name System Procedures,” Sep. 2014.
65. 3GPP TS 29.273, version 12.9.0, Release 12, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Core Network and Terminals; Evolved Packet System (EPS); 3GPP EPS AAA interfaces,” Dec. 2015.
66. 3GPP TS 29.213, version 10.3.0, Release 10, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Core Network and Terminals; Policy and Charging Control signalling flows and Quality of Service (QoS) parameter mapping,” Sep. 2011.

67. 3GPP TS 23.682, version 13.6.0, Release 13, "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+) (GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Architecture enhancements to facilitate communications with packet data networks and applications," July, 2016.
68. 3GPP TS 33.501, version 16.5.0, Release 15, "Security architecture and procedures for 5G System," Dec. 2020.
69. 3GPP TS 29.511, version 15.1.0, Release 15, "5G; 5G System; Equipment Identity Register Services," Oct. 2018.
70. 3GPP TS 22.016, version 16.0.0, Release 16, "International Mobile station Equipment Identities (IMEI)," July, 2020.
71. RFC 7540, "Hypertext Transfer Protocol Version 2 (HTTP/2)," May, 2015.
72. 3GPP TS 23.714, version 14.0.0, Release 14, "Study on Control Plane (CP) and User Plane (UP) separation of Evolved Packet Core (EPC) nodes," June, 2016.
73. L. Ma, X. Wen, L. Wang, Z. Lu and R. Knopp, "An SDN/NFV based framework for management and deployment of service based 5G core network," *in China Communications*, vol. 15, no. 10, pp. 86-98, Oct. 2018.
74. P. Ameigeiras, J. J. Ramos-munoz, L. Schumacher, J. Prados-Garzon, J. Navarro-Ortiz and J. M. Lopez-soler, "Link-level access cloud architecture design based on SDN for 5G networks," *in IEEE Network*, vol. 29, no. 2, pp. 24-31, March-April 2015.
75. I. Elgendi, K. S. Munasinghe, A. Jamalipour and D. Sharma, "Three-Tier SDN Architecture for 5G: A Novel OpenFlow Switch or Traditional," *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2017, pp. 1-5.
76. L. Peterson, O. Sunay, "5G Mobile Networks: A Systems Approach," *Morgan & Claypool*, 2020.
77. Z. Zaidi, V. Friderikos, Z. Yousaf, S. Fletcher, M. Dohler and H. Aghvami, "Will SDN Be Part of 5G?," *in IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 4, pp. 3220-3258, Fourthquarter 2018.



78. R. A. Addad, D. L. C. Dutra, M. Baga, T. Taleb, H. Flinck and M. Namane, "Benchmarking the ONOS Intent Interfaces to Ease 5G Service Management," *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2018, pp. 1-6.
79. U. Fattore, F. Giust and M. Liebsch, "5GC +: an Experimental Proof of a Programmable Mobile Core for 5G," *2018 IEEE 23rd International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks (CAMAD)*, 2018, pp. 1-6.
80. E. Cau et al., "Efficient Exploitation of Mobile Edge Computing for Virtualized 5G in EPC Architectures," *2016 4th IEEE International Conference on Mobile Cloud Computing, Services, and Engineering (MobileCloud)*, 2016, pp. 100-109.
81. Y. Li et al., "Understanding the Ecosystem and Addressing the Fundamental Concerns of Commercial MVNO," in *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 28, no. 3, pp. 1364-1377, June 2020.
82. T. V. K. Buyakar, H. Agarwal, B. R. Tamma and A. A. Franklin, "Resource Allocation with Admission Control for GBR and Delay QoS in 5G Network Slices," *2020 International Conference on COMMunication Systems & NETWORKS (COMSNETS)*, 2020, pp. 213-220.
83. M. Baga, T. Taleb, A. Laghrissi, A. Ksentini and H. Flinck, "Coalitional Game for the Creation of Efficient Virtual Core Network Slices in 5G Mobile Systems," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 3, pp. 469-484, March 2018.
84. 3GPP TS 38.211, version 15.3.0, Release 15, "5G; NR; Physical channels and modulation," Oct. 2018.
85. 3GPP TR 38.912, version 15.0.0, Release 15, "5G; Study on New Radio (NR) access technology," Sep. 2018.
86. T. Maksymyuk, L. Han, X. Ge, H. Chen and M. Jo, "Quasi-Quadrature Modulation Method for Power-Efficient Video Transmission Over LTE Networks,"

in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, no. 5, pp. 2083-2092, June, 2014.

87. M. Klymash, M. Jo, T. Maksymyuk and I. Beliaiev, "Spectral efficiency increasing of cognitive radio networks," *2013 12th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, 2013, pp. 169-171.

88. T. Maksymyuk and V. Pelishok, "The LTE channel transmission rate increasing," *Proceedings of International Conference on Modern Problem of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science*, 2012, pp. 251-252.

89. М. М. Климаш, Т. А. Максимюк, М. Я. Шеремета, Р.З. Козловський, "Підвищення ефективності використання частотно-часових ресурсів в мережах GSM", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 766, С. 65-71, 2013.

90. M. Jo, T. Maksymyuk, M. Kyryk, L. Han, "Cognitive radio approach for LTE deployment," *IEEE Perspective Technologies and Methods in MEMS Design – 2013*, Polyana-Svalyava, April 16–20, 2013, P. 63-64.

91. W. Li, L. Feng, Y. Lin, Q. Zhao and Q. Ou, "Network Slicing Cache Deployment And Resource Allocation Strategy For Maximizing Network Revenue in 5GC-RANs," *2020 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, 2020, pp. 1-3, doi: 10.1109/BMSB49480.2020.9379692.

92. X. Cheng, L. Fang, X. Hong and L. Yang, "Exploiting Mobile Big Data: Sources, Features, and Applications," in *IEEE Network*, vol. 31, no. 1, pp. 72-79, January/February 2017.

93. D. Z. Yazti and S. Krishnaswamy, "Mobile Big Data Analytics: Research, Practice, and Opportunities," *2014 IEEE 15th International Conference on Mobile Data Management*, 2014, pp. 1-2.

94. C. Zhang, X. Ouyang and P. Patras, "ZipNet-GAN: Inferring fine-grained mobile traffic patterns via a generative adversarial neural network," in *Proc. 13th ACM Conference on Emerging Networking Experiments and Technologies*, 2017.

95. L. Pierucci and D. Micheli, "A Neural Network for Quality of Experience Estimation in Mobile Communications," in *IEEE MultiMedia*, vol. 23, no. 4, pp. 42-49, Oct.-Dec. 2016.
96. Y. L. Gwon and H.T. Kung, "Inferring origin flow patterns in wi-fi with deep learning," in *Proc. 11th IEEE International Conference on Autonomic Computing (ICAC)*, 2014, pp.73–83.
97. J. Wang et al., "Spatiotemporal modeling and prediction in cellular networks: A big data enabled deep learning approach," *IEEE Conference on Computer Communications (IEEE INFOCOM 2017)*, 2017, pp. 1-9.
98. C. Zhang and P.Patras, "Long-term mobile traffic forecasting using deep spatio-temporal neural networks," in *Proc. Eighteenth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing*, 2018, pp. 231–240.
99. J. Feng, X. Chen, R. Gao, M. Zeng and Y. Li, "DeepTP: An End-to-End Neural Network for Mobile Cellular Traffic Prediction," in *IEEE Network*, vol. 32, no. 6, pp. 108-115, December, 2018.
100. L. Chen, D.Yang, D.Zhang, C. Wang, J. Li and T.Nguyen, "Deep mobile traffic forecast and complementary base station clustering for C-RAN optimization," *Journal of Network and Computer Applications*, no. 121, pp. 59–69, 2018.
101. Z. Wang, "The applications of deep learning on traffic identification," *BlackHat USA*, 2015.
102. W. Wang, M. Zhu, J. Wang, X. Zeng and Z. Yang, "End-to-end encrypted traffic classification with one-dimensional convolution neural networks," *2017 IEEE International Conference on Intelligence and Security Informatics (ISI)*, 2017, pp. 43-48.
103. S. Cui, B. Jiang, Z. Cai, Z. Lu, S. Liu and J. Liu, "A Session-Packets-Based Encrypted Traffic Classification Using Capsule Neural Networks," *2019 IEEE 21st International Conference on High Performance Computing and Communications; IEEE 17th International Conference on Smart City; IEEE 5th International Conference on Data Science and Systems (HPCC/SmartCity/DSS)*, 2019, pp. 429-436.

104. P. Li, Z. Chen, L. T. Yang, J. Gao, Q. Zhang and M. J. Deen, "An Improved Stacked Auto-Encoder for Network Traffic Flow Classification," *in IEEE Network*, vol. 32, no. 6, pp. 22-27, November/December 2018.
105. W. Wang, M. Zhu, X. Zeng, X. Ye and Y. Sheng, "Malware traffic classification using convolutional neural network for representation learning," *2017 International Conference on Information Networking (ICOIN)*, 2017, pp. 712-717.
106. A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *in IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347-2376, Fourthquarter 2015.
107. S. Seneviratne et al., "A Survey of Wearable Devices and Challenges," *in IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 4, pp. 2573-2620, Fourthquarter 2017.
108. H. Li, K. Ota and M. Dong, "Learning IoT in edge: Deep learning for the Internet of Things with edge computing," *IEEE Network*, vol. 32, no. 1, pp. 96–101, 2018.
109. K. Zhao, S. Tarkoma, S. Liu and H. Vo, "Urban human mobility data mining: An overview," *2016 IEEE International Conference on Big Data (Big Data)*, 2016, pp. 1911-1920.
110. X. Ouyang, C. Zhang, P. Zhou and H. Jiang, "DeepSpace: An online deep learning framework for mobile big data to understand human mobility patterns," *arXiv preprint*, arXiv:1610.07009, 2016.
111. J. Tkačik and P. Kordik, "Neural Turing Machine for sequential learning of human mobility patterns," *2016 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN)*, 2016, pp. 2790-2797.
112. A. Graves, G. Wayne and I. Danihelka, "Neural turing machines," *arXiv preprint*, arXiv:1410.5401, 2014.
113. X. Song, H. Kanasugi and R. Shibasaki, "DeepTransport: Prediction and simulation of human mobility and transportation mode at a citywide level," *in Proc. International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 2016, pp. 2618–2624.

114. J. Zhang, Y. Zheng and D. Qi, "Deep spatio-temporal residual networks for citywide crowd flows prediction," in *Proc. National Conference on Artificial Intelligence (AAAI)*, 2017.
115. M. Yin, M. Sheehan, S. Feygin, J. Paiement and A. Pozdnoukhov, "A Generative Model of Urban Activities from Cellular Data," in *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 19, no. 6, pp. 1682-1696, June 2018, doi: 10.1109/TITS.2017.2695438.
116. S. Xia, Y. Liu, G. Yuan, M. Zhu and Z. Wang, "Indoor fingerprint positioning based on Wi-Fi: An overview," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, vol. 6, no.5, p.135, 2017.
117. P. Davidson and R. Piché, "A Survey of Selected Indoor Positioning Methods for Smartphones," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 1347-1370, Secondquarter 2017.
118. J. Xiao, Z. Zhou, Y. Yi and L. Ni, "A survey on wireless indoor localization from the device perspective," *ACM Computing Surveys (CSUR)*, vol. 49, no, (2), p. 25, 2016.
119. X. Wang, L. Gao, S. Mao and S. Pandey, "DeepFi: Deep learning for indoor fingerprinting using channel state information," *2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2015, pp. 1666-1671, doi: 10.1109/WCNC.2015.7127718.
120. J. Xiao, K. Wu, Y. Yi and L. Ni, "FIFS: Finegrained indoor fingerprinting system," in *Proc. 21st International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, 2012, pp. 1-7.
121. M. Youssef and A. Agrawala, "The Horus WLAN location determination system," in *Proc. 3rd ACM international conference on Mobile systems, applications, and services*, 2005, pp. 205-218.
122. M. Brunato and R. Battiti, "Statistical learning theory for location fingerprinting in wireless LANs," *Computer Networks*, vol. 47, no. 6, p. 825-845, 2005.

123. X. Wang, L. Gao and S. Mao, "PhaseFi: Phase Fingerprinting for Indoor Localization with a Deep Learning Approach," *2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2015, pp. 1-6.
124. X. Wang, L. Gao and S. Mao, "CSI Phase Fingerprinting for Indoor Localization With a Deep Learning Approach," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 3, no. 6, pp. 1113-1123, Dec. 2016.
125. X. Wang, X. Wang and S. Mao, "CiFi: Deep convolutional neural networks for indoor localization with 5 GHz Wi-Fi," *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, pp. 1-6.
126. X. Wang, L. Gao and S. Mao, "BiLoc: Bi-Modal Deep Learning for Indoor Localization With Commodity 5GHz WiFi," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 4209-4220, 2017.
127. X. Wang, L. Gao, S. Mao and S. Pandey, "CSI-Based Fingerprinting for Indoor Localization: A Deep Learning Approach," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 763-776, Jan. 2017.
128. X. Wang, X. Wang and S. Mao, "Deep Convolutional Neural Networks for Indoor Localization with CSI Images," in *IEEE Transactions on Network Science and Engineering*, vol. 7, no. 1, pp. 316-327, 1 Jan.-March 2020.
129. J. Wang, X. Zhang, Q. Gao, H. Yue and H. Wang, "Device-Free Wireless Localization and Activity Recognition: A Deep Learning Approach," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 7, pp. 6258-6267, July 2017.
130. C. Xiao, D. Yang, Z. Chen and G. Tan, "3-D BLE Indoor Localization Based on Denoising Autoencoder," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12751-12760, 2017.
131. M. Nowicki and J. Wietrzykowski, "Low-effort place recognition with WiFi fingerprints using deep learning," in *Proc. International Conference Automation*, pp. 575–584, Springer, 2017.
132. W. Zhang, R. Sengupta, J. Fodero and X. Li, "DeepPositioning: Intelligent Fusion of Pervasive Magnetic Field and WiFi Fingerprinting for

Smartphone Indoor Localization via Deep Learning," *2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA)*, 2017, pp. 7-13.

133. H. Jiang, H. Wang, W. -Y. Yau and K. -W. Wan, "A Brief Survey: Deep Reinforcement Learning in Mobile Robot Navigation," *2020 15th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2020, pp. 592-597.

134. J. Ho and S. Ermon, "Generative adversarial imitation learning," in *Advances in Neural Information Processing Systems*, pp. 4565–4573, 2016.

135. M. Zorzi, A. Zanella, A. Testolin, M. De Filippo De Grazia and M. Zorzi, "COBANETS: A new paradigm for cognitive communications systems," *2016 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2016, pp. 1-7.

136. M. Roopaei, P. Rad and M. Jamshidi, "Deep learning control for complex and large scale cloud systems," *Intelligent Automation & Soft Computing*, pp. 1–3, 2017.

137. Y. He, C. Liang, F. R. Yu, N. Zhao and H. Yin, "Optimization of cache-enabled opportunistic interference alignment wireless networks: A big data deep reinforcement learning approach," *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, pp. 1-6.

138. Y. He et al., "Deep-Reinforcement-Learning-Based Optimization for Cache-Enabled Opportunistic Interference Alignment Wireless Networks," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 11, pp. 10433-10445, Nov. 2017.

139. B. Mao et al., "Routing or Computing? The Paradigm Shift Towards Intelligent Computer Network Packet Transmission Based on Deep Learning," in *IEEE Transactions on Computers*, vol. 66, no. 11, pp. 1946-1960, 1 Nov. 2017.

140. B. Mao et al., "A Tensor Based Deep Learning Technique for Intelligent Packet Routing," *2017 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM 2017)*, 2017, pp. 1-6.

141. H. Yang, Z. Li and Z. Liu. "Neural networks for MANET AODV: an optimization approach," *Cluster Computing*, pp. 1–9, 2017.

142. F. Geyer and G. Carle, "Learning and Generating Distributed Routing Protocols Using Graph-Based Deep Learning," in *Proc. ACM Workshop on Big Data Analytics and Machine Learning for Data Communication Networks*, 2018, pp. 40–45.
143. Y. Wei, Z. Zhang, F. R. Yu and Z. Han, "Joint User Scheduling and Content Caching Strategy for Mobile Edge Networks Using Deep Reinforcement Learning," *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2018, pp. 1-6.
144. S. Nath and J. Wu, "Deep reinforcement learning for dynamic computation offloading and resource allocation in cache-assisted mobile edge computing systems," in *Intelligent and Converged Networks*, vol. 1, no. 2, pp. 181–198, Sept. 2020.
145. Z. Xu, Y. Wang, J. Tang, J. Wang and M. C. Gursoy, "A deep reinforcement learning based framework for power-efficient resource allocation in cloud RANs," *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2017, pp. 1-6.
146. Y. Zhou, Z. M. Fadlullah, B. Mao and N. Kato, "A Deep-Learning-Based Radio Resource Assignment Technique for 5G Ultra Dense Networks," in *IEEE Network*, vol. 32, no. 6, pp. 28-34, November/December 2018.
147. H. Rutagemwa, A. Ghasemi and S. Liu, "Dynamic Spectrum Assignment for Land Mobile Radio with Deep Recurrent Neural Networks," *2018 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, 2018, pp. 1-6.
148. T. T. A. Dinh, R. Liu, M. Zhang, G. Chen, B. C. Ooi and J. Wang, "Untangling Blockchain: A Data Processing View of Blockchain Systems," in *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 30, no. 7, pp. 1366-1385, 1 July 2018.
149. T. Aste, P. Tasca and T. Di Matteo, "Blockchain Technologies: The Foreseeable Impact on Society and Industry," in *Computer*, vol. 50, no. 9, pp. 18-28, 2017.



150. H. Orman, "Blockchain: the Emperors New PKI?," in *IEEE Internet Computing*, vol. 22, no. 2, pp. 23-28, Mar./Apr. 2018.
151. "IEEE Standard for Data Format for Blockchain Systems," in *IEEE Std 2418.2-2020*, vol., no., pp.1-32, 23 Dec. 2020.
152. T. Hewa, G. Gür, A. Kalla, M. Ylianttila, A. Bracken and M. Liyanage, "The Role of Blockchain in 6G: Challenges, Opportunities and Research Directions," *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, Levi, Finland, 2020, pp. 1-5.
153. D. B. Rawat, "Fusion of Software Defined Networking, Edge Computing, and Blockchain Technology for Wireless Network Virtualization," in *IEEE Communications Magazine*, vol. 57, no. 10, pp. 50-55, October, 2019.
154. J. Xu, S. Wang, A. Zhou and F. Yang, "Edgence: A blockchain-enabled edge-computing platform for intelligent IoT-based dApps," in *China Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 78-87, April, 2020.
155. "IEEE Standard for Framework of Blockchain-based Internet of Things (IoT ) Data Management," in *IEEE Std 2144.1-2020*, vol., no., pp.1-20, 18 Jan. 2021.
156. H. Yang, Y. Liang, Q. Yao, S. Guo, A. Yu and J. Zhang, "Blockchain-based secure distributed control for software defined optical networking," in *China Communications*, vol. 16, no. 6, pp. 42-54, June, 2019.
157. S. Nakamoto, "Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System," <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>, 2008.
158. F. Hofmann, S. Wurster, E. Ron and M. Böhmecke-Schwafert, "The immutability concept of blockchains and benefits of early standardization," *2017 ITU Kaleidoscope: Challenges for a Data-Driven Society (ITU K)*, 2017, pp. 1-8.
159. B. Shala, U. Trick, A. Lehmann, B. Ghita and S. Shiaeles, "Blockchain and Trust for Secure, End-User-Based and Decentralized IoT Service Provision," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 119961-119979, 2020.
160. A. H. Lone and R. Naaz, "Demystifying Cryptography behind Blockchains and a Vision for Post-Quantum Blockchains," *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON)*, 2020, pp. 1-6.

161. K. Upadhyay, R. Dantu, Z. Zaccagni and S. Badruddoja, "Is Your Legal Contract Ambiguous? Convert to a Smart Legal Contract," *2020 IEEE International Conference on Blockchain (Blockchain)*, 2020, pp. 273-280.
162. A. Abuhashim and C. C. Tan, "Smart Contract Designs on Blockchain Applications," *2020 IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2020, pp. 1-4.
163. C. Dong, Y. Wang, A. Aldweesh, P. McCorry and A. Van Moorsel, "Betrayal, distrust, and rationality: Smart counter-collusion contracts for verifiable cloud computing," *ACM Conference on Computer and Communications Security (SIGSAC)*, 2017.
164. J. Xu, S. Wang, A. Zhou and F. Yang, "Edgence: A blockchain-enabled edge-computing platform for intelligent IoT-based dApps," *in China Communications*, vol. 17, no. 4, pp. 78-87, April 2020.
165. F. Wessling, C. Ehmke, M. Hesenius and V. Gruhn, "How Much Blockchain Do You Need? Towards a Concept for Building Hybrid DApp Architectures," *2018 IEEE/ACM 1st International Workshop on Emerging Trends in Software Engineering for Blockchain (WETSEB)*, 2018, pp. 44-47.
166. K. Košťál, T. Krupa, M. Gembec, I. Vereš, M. Ries and I. Kotuliak, "On Transition between PoW and PoS," *2018 International Symposium ELMAR*, 2018, pp. 207-210.
167. M. di Angelo and G. Salzer, "Tokens, Types, and Standards: Identification and Utilization in Ethereum," *2020 IEEE International Conference on Decentralized Applications and Infrastructures (DAPPS)*, 2020, pp. 1-10.
168. L. Liu, S. Zhou, H. Huang and Z. Zheng, "From Technology to Society: An Overview of Blockchain-based DAO," *in IEEE Open Journal of the Computer Society*.
169. M. Klymash, M. Beshley, B. Strykhalyuk and T. Maksymyuk, "Research and development the methods of quality of service provision in Mobile Cloud systems," *2014 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom)*, 2014, pp. 160-164.

170. M. Jo, T. Maksymyuk, B. Strykhalyuk and C. Cho, "Device-to-device-based heterogeneous radio access network architecture for mobile cloud computing," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 3, pp. 50-58, June 2015.
171. J. Wu, Z. Zhang, Y. Hong, and Y. Wen, "Cloud radio access network (C-RAN): a primer," *IEEE Network*, vol. 29, no. 1, pp. 35–41, 2015.
172. J. Zhou, Z. Cao, X. Dong, and A. V. Vasilakos, "Security and privacy for cloud-based IoT: Challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 1, pp. 26–33, 2017.
173. Y. Zhang, C. Xu, X. Lin, and X. S. Shen, "Blockchain-based public integrity verification for cloud storage against procrastinating auditors," *IEEE Transactions on Cloud Computing*, 2019.
174. S. Ali, G. Wang, M. Z. A. Bhuiyan, and H. Jiang, "Secure data provenance in cloud-centric internet of things via blockchain smart contracts," in *2018 IEEE SmartWorld, Ubiquitous Intelligence & Computing, Advanced & Trusted Computing, Scalable Computing & Communications, Cloud & Big Data Computing, Internet of People and Smart City Innovation (SmartWorld/SCALCOM/UIC/ATC/CBDCom/IOP/SCI)*, 2018, pp. 991–998.
175. M. Ma, G. Shi, and F. Li, "Privacy-oriented blockchain-based distributed key management architecture for hierarchical access control in the IoT scenario," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 34 045–34 059, 2019.
176. M. Hossain, Y. Karim, and R. Hasan, "Fif-IoT: A forensic investigation framework for IoT using a public digital ledger," in *2018 IEEE International Congress on Internet of Things (ICIOT)*, 2018, pp. 33–40.
177. T. Taleb, K. Samdanis, B. Mada, H. Flinck, S. Dutta, and D. Sabella, "On multi-access edge computing: A survey of the emerging 5G network edge cloud architecture and orchestration," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 3, pp. 1657–1681, 2017.
178. Q.-V. Pham, F. Fang, V. N. Ha, M. Le, Z. Ding, L. B. Le, and W.-J. Hwang, "A survey of multi-access edge computing in 5G and beyond: Fundamentals, technology integration, and state-of-the-art," *arXiv preprint*, arXiv:1906.08452, 2019.

179. M. Mukherjee, R. Matam, L. Shu, L. Maglaras, M. A. Ferrag, N. Choudhury, and V. Kumar, "Security and privacy in fog computing: Challenges," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19 293–19 304, 2017.
180. J. Zhang, B. Chen, Y. Zhao, X. Cheng, and F. Hu, "Data security and privacy-preserving in edge computing paradigm: Survey and open issues," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 18 209–18 237, 2018.
181. A. Stanciu, "Blockchain based distributed control system for edge computing," in *2017 21st International Conference on Control Systems and Computer Science (CSCS)*, 2017, pp. 667–671.
182. S. Guo, X. Hu, S. Guo, X. Qiu, and F. Qi, "Blockchain meets edge computing: A distributed and trusted authentication system," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019.
183. B. Confais, A. Lebre, and B. Parrein, "An object store service for a fog/edge computing infrastructure based on IPFS and a scale-out NAS," in *2017 IEEE 1st International Conference on Fog and Edge Computing (ICFEC)*, 2017, pp. 41–50.
184. W. Tang, X. Zhao, W. Rafique, and W. Dou, "A blockchain-based offloading approach in fog computing environment," in *2018 IEEE Intl Conf on Parallel & Distributed Processing with Applications, Ubiquitous Computing & Communications, Big Data & Cloud Computing, Social Computing & Networking, Sustainable Computing & Communications (ISPA/IUCC/BDCloud/SocialCom/SustainCom)*, 2018, pp. 308– 315.
185. Y. Liu, R. Yu, X. Li, H. Ji, and V. C. Leung, "Decentralized resource allocation for video transcoding and delivery in blockchain-based system with mobile edge computing," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2019.
186. Z. Xiong, Y. Zhang, D. Niyato, P. Wang, and Z. Han, "When mobile blockchain meets edge computing," *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 8, pp. 33–39, 2018.

187. C. Bouras, A. Kollia, and A. Papazois, "Sdn & nfv in 5G : Advancements and challenges," in *2017 20th Conference on Innovations in Clouds, Internet and Networks (ICIN)*, 2017, pp. 107–111.
188. E. Šlapak, J. Gazda, W. Guo, T. Maksymyuk and M. Dohler, "Cost-Effective Resource Allocation for Multitier Mobile Edge Computing in 5G Mobile Networks," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 28658-28672, 2021.
189. I. Ahmad, S. Namal, M. Ylianttila, and A. Gurtov, "Security in software defined networks: A survey," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2317–2346, 2015.
190. P. K. Sharma, S. Singh, Y.-S. Jeong, and J. H. Park, "Distblocknet: A distributed blockchains-based secure sdn architecture for IoT networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 9, pp. 78–85, 2017.
191. C. Xue, N. Xu, and Y. Bo, "Research on key technologies of software-defined network based on blockchain," in *2019 IEEE International Conference on Service-Oriented System Engineering (SOSE)*, 2019, pp. 239–2394.
192. L. Xie, Y. Ding, H. Yang, and X. Wang, "Blockchain-based secure and trustworthy internet of things in sdn-enabled 5G -vanets," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 56 656–56 666, 2019.
193. M. Pourvahab and G. Ekbatanifard, "An efficient forensics architecture in software-defined networking-IoT using blockchain technology," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 99 573–99 588, 2019.
194. C. Tselios, I. Politis, and S. Kotsopoulos, "Enhancing sdn security for IoT-related deployments through blockchain," in *2017 IEEE Conference on Network Function Virtualization and Software Defined Networks (NFV-SDN)*, 2017, pp. 303–308.
195. H. Yang, Y. Liang, Q. Yao, S. Guo, A. Yu, and J. Zhang, "Blockchain based secure distributed control for software defined optical networking," *China Communications*, vol. 16, no. 6, pp. 42–54, 2019.

196. F. Z. Yousaf, M. Bredel, S. Schaller, and F. Schneider, "Nfv and sdnkey technology enablers for 5G networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 11, pp. 2468–2478, 2017.
197. R. Mijumbi, J. Serrat, J.-L. Gorricho, N. Bouten, F. De Turck, and R. Boutaba, "Network function virtualization: State-of-the-art and research challenges," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 18, no. 1, pp. 236–262, 2015.
198. I. Farris, T. Taleb, Y. Khettab, and J. Song, "A survey on emerging sdn and nfv security mechanisms for IoT systems," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 812–837, 2018.
199. F. Reynaud, F.-X. Aguessy, O. Bettan, M. Bouet, and V. Conan, "Attacks against network functions virtualization and software-defined networking: State-of-the-art," in *2016 IEEE NetSoft Conference and Workshops (NetSoft)*, 2016, pp. 471–476.
200. E. Ak and B. Canberk, "Bcdn: A proof of concept model for blockchain-aided cdn orchestration and routing," *Computer Networks*, 2019.
201. Providing a Sliced, Secure, and Isolated Software Infrastructure of Virtual Functions Through Blockchain Technology. [Online]. Available: <https://files.ifi.uzh.ch/CSG/teaching/FS18/ComSys/Talk9.pdf>.
202. M. F. Franco, E. J. Scheid, L. Z. Granville, and B. Stiller, "Brain: Blockchain-based reverse auction for infrastructure supply in virtual network functions-as-a-service," in *2019 IFIP Networking Conference (IFIP Networking)*, 2019, pp. 1–9.
203. G. A. F. Rebello, I. D. Alvarenga, I. J. Sanz, and O. C. M. Duarte, "Bsec-nfvo: A blockchain-based security for network function virtualization orchestration," in *ICC 2019-2019 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2019, pp. 1–6.
204. R. Rosa and C. E. Rothenberg, "Blockchain-based decentralized applications for multiple administrative domain networking," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 3, pp. 29–37, 2018.

205. I. Afolabi, T. Taleb, K. Samdanis, A. Ksentini, and H. Flinck, "Network slicing and softwarization: A survey on principles, enabling technologies, and solutions," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2429–2453, 2018.
206. S. Zhang, "An overview of network slicing for 5G," *IEEE Wireless Communications*, 2019.
207. A. Kalokylos, "A survey and an analysis of network slicing in 5G networks," *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 2, no. 1, pp. 60–65, 2018.
208. X. Foukas, G. Patounas, A. Elmokashfi, and M. K. Marina, "Network slicing in 5G : Survey and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 5, pp. 94–100, 2017.
209. V. Ortega, F. Bouchmal, and J. F. Monserrat, "Trusted 5G vehicular networks: Blockchains and content-centric networking," *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 2, pp. 121–127, 2018.
210. B. Nour, A. Ksentini, N. Herbaut, P. A. Frangoudis, and H. Moun gla, "A blockchain-based network slice broker for 5G services," *IEEE Networking Letters*, 2019.
211. J. Backman, S. Yrjola, K. Valtanen, and O. Mammela, "Blockchain network slice broker in 5G: Slice leasing in factory of the future use case," in *2017 Internet of Things Business Models, Users, and Networks*, 2017, pp. 1–8.
212. D. B. Rawat and A. Alshaikhi, "Leveraging distributed blockchain-based scheme for wireless network virtualization with security and QoS constraints," in *2018 International Conference on Computing, Networking and Communications (ICNC)*, 2018, pp. 332–336.
213. A. Adhikari, D. B. Rawat, and M. Song, "Wireless network virtualization by leveraging blockchain technology and machine learning," in *Proceedings of the ACM Workshop on Wireless Security and Machine Learning*. ACM, 2019, pp. 61–66.

214. M. Liu, F. R. Yu, Y. Teng, V. C. M. Leung and M. Song, "Joint computation offloading and content caching for wireless blockchain networks," *IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPs)*, 2018, pp. 517-522.

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

216. T. Maksymyuk, V. Andrushchak, S. Dumych, B. Shubyn, G. Bugar, J. Gazda, "Blockchain-based network functions virtualization for 5G network slicing," *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 20, no. 4, pp. 54-59, 2020.

217. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, "Comprehensive spectrum management for heterogeneous networks in LTE-U," *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 8-15, 2016.

218. T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria and M. Jo, "An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, Jan. 2017, Beppu, Japan, article #105.

219. T. Maksymyuk J. Gazda, M. Volosin, G. Bugar, D. Horvath, M. Klymash, M. Dohler, "Blockchain-empowered framework for decentralized network management in 6G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 9, pp. 86-92, Sep. 2020.

220. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Jo, "Clustering hypervisors to minimize failures in mobile cloud computing," *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 18, pp. 3455-3465, 2016.

221. B. Fekade, T. Maksymyuk and M. Jo, "A virtual server qos enhancement method in cloud computing," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2016, Da Nang, Vietnam, article #81.

222. M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," *IEEE*



*International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 1-6.

223. M. Aazam, K. A. Harras and S. Zeadally, "Fog Computing for 5G Tactile Industrial Internet of Things: QoE-Aware Resource Allocation Model," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 5, pp. 3085-3092, May 2019.

224. X. Ge, R. Zhou and Q. Li, "5G NFV-Based Tactile Internet for Mission-Critical IoT Services," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 7, pp. 6150-6163, July 2020.

225. M. Dohler, "The tactile internet IoT, 5G and cloud on steroids," *5G Radio Technology Seminar. Exploring Technical Challenges in the Emerging 5G Ecosystem*, 2015.

226. N. H. Mahmood, H. Alves, O. A. López, M. Shehab, D. P. M. Osorio and M. Latva-Aho, "Six Key Features of Machine Type Communication in 6G," *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1-5.

227. H. Viswanathan and P. E. Mogensen, "Communications in the 6G Era," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 57063-57074, 2020.

228. Martin Maier; Amin Ebrahimzadeh, "XR in the 6G Post-Smartphone Era," in *Toward 6G: A New Era of Convergence*, IEEE, 2021, pp.167-182.

229. Y. Chen, C. Wang, D. Yang and W. Liao, "Bandwidth Constrained Holographic Telepresence with 3D Model Reconstruction," *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2019, pp. 1-6.

230. S. R. Soomro, O. Eldes and H. Urey, "Towards Mobile 3D Telepresence Using Head-Worn Devices and Dual-Purpose Screens," *2018 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*, 2018, pp. 1-2.

231. A. Al-Dulaimi and X. Lin, "Reshaping Autonomous Driving for the 6G Era," in *IEEE Communications Standards Magazine*, vol. 4, no. 1, pp. 10-10, March 2020.

232. A.-E. M. Taha, "Quality of Experience in 6G Networks: Outlook and Challenges," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 10, no. 1, p. 11, Feb. 2021.
233. G. Bugár, M. Vološin, T. Maksymyuk, J. Zausinová, V. Gazda, D. Horváth, J. Gazda, "Techno-economic framework for dynamic operator selection in a multi-tier heterogeneous network," *Ad Hoc Networks*, vol. 97, pp. 102007, Feb. 2020.
234. L.Han, T. Maksymyuk, X. Bao, J. Zhao, Y. Liu, "Deep learning based loss recovery mechanism for video streaming over mobile information-centric network," *KSII Transactions on Internet & Information Systems*, vol. 13, no.9, 2019.
235. H. Beshley, T. Maksymyuk, M. Beshley and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1147-1151.
236. M. Khan, M. Jamali, T. Maksymyuk, J. Gazda, "A blockchain token-based trading model for secondary spectrum markets in future generation mobile networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, article 7975393, 2020.
237. T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 953-956.
238. P. Ahokangas et al., "Business Models for Local 5G Micro Operators," in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 5, no. 3, pp. 730-740, Sept. 2019.
239. A. Rostami, "Private 5G Networks for Vertical Industries: Deployment and Operation Models," *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*, 2019, pp. 433-439.
240. W. Entriken, D. Shirley, J. Evans, N. Sachs, "ERC-721 Non-Fungible Token Standard," January, 2018.

241. D. Chirtoaca, J. Ellul and G. Azzopardi, "A Framework for Creating Deployable Smart Contracts for Non-fungible Tokens on the Ethereum Blockchain," 2020 IEEE International Conference on Decentralized Applications and Infrastructures (DAPPS), 2020, pp. 100-105.

242. 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.

243. Т.А. Максимюк, М.О. Селюченко, "Дослідження способів підвищення швидкості передавання в нисхідному каналі мобільної мережі LTE", *Комп'ютерні технології друкарства*, № 27, С. 160-169, 2012.

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

245. О.М. Яремко, Т.А. Максимюк, Д. І. Кричко, "Підвищення ефективності радіоінтерфейсу безпроводних систем наступного покоління", *4-й Міжнародний радіоелектронний форум "Прикладна радіоелектроніка. Стан і перспективи розвитку" Матеріали конференції "Телекомунікаційні системи і технології" ТСТ-2011*, Харків, 18-21 жовтня 2011 р., С. 261-265.

246. M. Klymash, T. Maksymyuk, S. Dumych and O. Yaremko, "Designing the industrial and environmental monitoring system based on the Internet of Things architecture," *IEEE International Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 187-190

247. I. V. Yatskiv, S. Kulyna, P. Bykovyy, T. Maksymyuk and A. Sachenko, "Method of reliable data storage based on redundant residue number system," *IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2020, Dortmund.

248. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, “Probabilistic recovery of incomplete sensed data in IoT,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 2282-2292, 2018.

249. Y. Liu, W. Hu, L. Han, T. Maksymyuk, Z. Chen. “A fast filling algorithm for image restoration based on contour parity,” *CMC-Computers, Materials & Continua*, vol. 63, no. 1, pp. 509–519, 2020.

250. М. М. Климаш, М. В. Кайдан, Т. А. Максимюк, О. М. Шпур, Ю. В. Пиріг, “Генетичні алгоритми як універсальний метод розв'язання задач великої розмірності”, *Наукоємні технології в інфокомунікаціях: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції НІСТ'2019*, Харків - Кам'янець-Подільський, Україна, 23–25 травня 2019 р., С. 26–30.

251. T. Yokotani and Y. Sasaki, "Transfer protocols of tiny data blocks in IoT and their performance evaluation," *2016 IEEE 3rd World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, 2016, pp. 54-57.

252. М.В. Кайдан, М.І. Бешлей, Т.А. Максимюк, Б.М. Стрихалюк, “Теорія кернера та фазові переходи для потоків у телекомунікаційних мережах”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації»*, № 909, С. 29–34, 2018.

253. T. Maksymyuk, J. Gazda, A. Luntovsky and M. Klymash, “Artificial intelligence based 5G coverage design and optimization using deep generative adversarial neural networks,” *IEEE International Conference on Information and Communications Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Sep. 2018, Odessa, Ukraine, pp.1-4.

254. R. Salakhutdinov, and A. Mnih, “Bayesian probabilistic matrix factorization using MCMC”, *25th International Conference on Machine Learning*, Helsinki, Finland, 2008.

255. D. Horváth, J. Gazda, E. Šlapak, T. Maksymyuk, “Modeling and analysis of self-organizing UAV-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment,” *Entropy*, vol. 21, no. 11, article 1077, pp. 1-26, 2019.

256. D. Araújo, T. Maksymyuk, A. Almeida, T. Maciel, J. Mota, M. Jo, "Massive MIMO: survey and future research topics," *IET Communications*, vol. 10, no. 15, pp. 1938-1946, 2016.

257. J. Gazda, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, T. Maksymyuk, M. Jo, "Unsupervised learning algorithm for intelligent coverage planning and performance optimization of multitier heterogeneous network," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 39807-39819, 2018.

258. T. Maksymyuk, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, J. Gazda, "Intelligent framework for radio access network design," *Wireless Networks*, vol.26, pp. 759–774, Nov. 2019.

259. О. М. Яремко, Т. А. Максимюк, Р. І. Лукомський, "Модель просторово-часової локалізації абонентського навантаження в мережах мобільного зв'язку", *17-й Міжнародний радіоелектронний форум «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті»*, 22-24 квітня, ХНУРЕ, 2013.

260. M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "Realistic user mobility simulator for 5G communication networks," *IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, May, 2019 Timisoara, Romania, pp. 263-268.

261. T. Maksymyuk, J. Gazda, M. Ružička, E. Slapak, G. Bugar and L. Han, "Deep learning based mobile network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2020, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 890-893.

262. M. Ružička, M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "The extension of existing end-user mobility dataset based on generative adversarial networks," *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, April, 2020, Bratislava, Slovakia.

263. V. Andrushchak, T. Maksymyuk, D. Ageyev and M. Klymash, "Development of the ibeacon's positioning algorithm for indoor scenarios," *IEEE*

*International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2018, Kharkiv, Ukraine, pp. 741-744.

264. T. Maksymyuk, J. Gazda, O. Yaremko and D. Nevinskiy, "Deep learning based massive MIMO beamforming for 5G mobile network," *IEEE International Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 241-244

265. E. Šlapak, J. Gazda, G. Bugár and T. Maksymyuk, "Review of cellular radio network cell placement design, from traditional to artificial intelligence based approaches," *IEEE International Symposium ELMAR*, Sep. 2019, Zadar, Croatia, pp. 93-96.

266. E. Šlapak, J. Gazda, D. Horváth, G. Bugár, M. Vološin and T. Maksymyuk, "HetNet spatial topology design using mini-batch K-means clustering," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine.

267. A. Gupta, J. Johnson, L. Fei-Fei, S. Savarese and A. Alahi, "Social GAN: Socially Acceptable Trajectories with Generative Adversarial Networks", *Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 2255-2264, 2018.

268. <https://poloclub.github.io/ganlab/>

269. D. I. Kumar and M. R. Kounte, "Comparative study of self-organizing map and deep self-organizing map using MATLAB," *2016 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP)*, 2016, pp. 1020-1023.

270. O. Yaremko and T. Maksymyuk, "Power control method in multiuser cellular networks," *IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, pp. 386-387.

271. T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Increasing of energy efficiency of a cognitive radio network," *IEEE International Crimean Conference "Microwave*

*& Telecommunication Technology" (CriMiCo)*, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 277-278.

272. A. Bondarev, I. Maksymiv and T. Maksymyuk, "Method of improving the power efficiency of QPSK signals," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 253-255.

273. А.П. Бондарев, І.П. Максимів, Т.А. Максимюк, "Метод підвищення енергетичної ефективності HQPSK сигналів", *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіoeлектроніка та телекомунікації»*, №849, С. 18-22, 2016.

274. Jo. M., Maksymyuk T., Pelishok V, "Quasi Quadrature Modulation Method for Power Efficient Transmission Over LTE Networks", *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013» (СПТЕЛ – 2013)*, Львів 30 жовтня – 2 листопада 2013, С. 27–32.

275. А. П. Бондарев, І. П. Максимів, Т. А. Максимюк, "Метод підвищення енергетичної ефективності HQPSK сигналів," *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції*, 21–23 вересня 2016 р., м. Запоріжжя, 2016, С. 94–96.

276. T. Maksymyuk, M. Beshley, O. Petrenko, M. Klymash and Yu. Matsevityi, "Eavesdropping-resilient wireless communication system based on modified OFDM/QAM air interface," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1127-1130.

277. T. Rosa, M. Kaidan, J. Gazda, P. Bykovyy, G. Sapozhnyk and T. Maksymyuk, "Scalable QAM modulation for physical layer security of wireless networks," *IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and*

*Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Sep. 2019, Metz, France, pp. 1095-1098.

278. M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and T. Maksymyuk, "Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 209-212.

279. Т. Максимюк, О. Холявка, Я. Москва, "Вибір ефективних формуючих функцій для синтезу OFDM сигналу з оптимальними локалізаційними характеристиками", *Науково-методична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2011”*, 27-30 жовтня 2011 р, Львів, С.33-36.

280. Т.А. Максимюк, "Метод синтезу OFDM сигналу з оптимальною частотно-часовою локалізацією", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 738, С. 198-205, 2012.

281. Т. Максимюк, В. Пелішок, "Метод формування ортогонального сигналу з ефективною локалізацією енергії в частотно-часовій області", *VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології»*, Лівадія, 2012.

282. В.О. Пелішок, Т.А. Максимюк, "Дослідження частотної ефективності вузькосмугових методів модуляції", *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації*, № 705, С. 105-112, 2011.

283. T. Maksymyuk, S. Dumych, "Increasing the spectral efficiency of OFDM signal," *Computer Science & Engineering 2011*, Львів, 24-26 листопада 2011 р., С. 244-245.

284. D. He, B. Ai, K. Guan, L. Wang, Z. Zhong and T. Kürner, "The Design and Applications of High-Performance Ray-Tracing Simulation Platform for 5G and



Beyond Wireless Communications: A Tutorial," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 10-27, Firstquarter 2019.

285. Патент України на корисну модель UA 127803 U, H04J 13/00, Спосіб просторово-часового блочного кодування багатоантенних систем /М.М. Климаш, В.О. Пелішок, Т.А Максимюк – № u201801658; заявл. 19.02.2018; опубл. 27.08.2018. – Бюл. № 16/2018.

286. В. Пелішок, Т. Максимюк, М. Климаш, “Метод підвищення ефективності синтезу антенних систем радіозв’язку з нестационарним каналом,” *19-а науково-практична конференція "Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення, Житомир, 2012.*

287. І. П. Лісовий, Т. А. Максимюк, Р. З. Козловський, “Метод динамічної перебудови частотно-часових каналів мережі GSM”, *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013» (СПТЕЛ – 2013), Львів 30 жовтня – 2 листопада 2013. – 2013. – С. 157–160.*

288. J. Gazda, M. Volosin, E. Slapak, P. Drotar and T. Maksymyuk, “Frequency spectrum distribution dynamics: Evidence from an agent-based experimental economy mode,” *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1123-1126.

289. J. Zausinová, J. Gazda and T. Maksymyuk, “Real-time spectrum secondary markets: Agent-based model of investment activities of heterogeneous operators,” *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, Prague, April, 2018, pp. 1-6.

290. G. Liu, P. Gao, “Industry sustainability and innovation system: a comparative case study in china,” in *Innovation in the Asia Pacific*, Springer, 2018, pp. 201–223.

291. S. Sun, T.S. Rappaport, S. Rangan, T.A. Thomas, A. Ghosh, I.Z. Kovacs, I. Rodriguez, O. Koymen, A. Partyka, J. Jarvelainen, Propagation path loss

models for 5G urban micro- and macro-cellular scenarios, in *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2016, pp. 1–6.

292. T. Maksymyuk, M. Brych, M. Klymash and M. Jo, “Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network,” *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 197-200.

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

294. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash and M. Jo, “Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed and unlicensed spectrum for multi-operator 5G hetnet,” *IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 315-318.

295. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash, M. Jo, R. Romaniuk, A. Kotyra, A. Zhanpeisova, A. Kozbekova, “Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed spectrum for multi-operator 5G hetnet,” *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, vol.10445, Wilga, Poland, Aug. 2017, article #5T.

296. T. Maksymyuk, M. Brych, Yu. Klymash, M. Kyryk and M. Klymash, “Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks,” *IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2017, Kharkiv, Ukraine, pp. 515-518.

297. T. Maksymyuk, J. Gazda, L. Han and M. Jo, "Blockchain-based intelligent network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 36-39.

298. Т.А. Максимюк, Б.П. Шубин, Д.О. Мисаковець, В.С. Андрущак, С.С. Думич, “Метод адаптивного логічного розділення мережі 5G на основі глибокого навчання”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, том 31(70), № 5, С. 36-42, 2020.
299. Т. Maksymyuk, L. Han, S. Larionov, B. Shubyn, A. Luntovskyu and M. Klymash, “Intelligent spectrum management in 5G mobile networks based on recurrent neural networks,” *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine.
300. B. Shubyn, T. Maksymyuk, "Intelligent handover management in 5G mobile networks based on recurrent neural networks," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 348-351.
301. A. Luntovskyu, B. Shubyn, T. Maksymyuk, M. Klymash, “5G networks deployment and service modeling,” *Інфокомунікації – сучасність та майбутнє : матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої сторіччю Одеської національної академії зв'язку ім. О. С. Попова*, 2020, С. 251–254.
302. М. М. Климаш, Т. А. Максимюк, М. І. Бешлей. Методи та моделі побудови гетерогенних мереж мобільного зв'язку 4G/5G — Львів: Видавництво «Львівської політехніки», 2020 – 388 с.
303. Т. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, “Study and development of next-generation optical networks,” *Smart Computing Review*, vol. 4, no. 6, pp. 470-480, 2014.
304. М.М. Климаш, О.В. Красько, Т.А. Максимюк, “Метод спектрально-часового мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу”, *Вісник ДонНТУ*, №2(27), С. 71-79, 2014.
305. Т.А. Максимюк, О.В. Красько, С.С. Думич, О.М. Яремко, А.М. Варенко, “Метод мультиплексування інформаційних потоків у пасивній оптичній мережі з інтеграцією фіксованого та мобільного доступу”, *Вчені*

записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, том 29(68), № 3, С. 59-65, 2018.

306. О. Krasko, P. Guskov, T. Maksymyuk, “Advanced Multi-Wavelength Data Transmission Method for Optical Access Networks”, *Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії, Матеріали Міжнародної конференції TCSET'2014, присвяченої 170-річчю заснування Національного університету "Львівська політехніка", 25.02-1.03 2014, Львів-Славське-Львів, 2014, С. 518–520.*

307. Т. Maksymyuk, О. Krasko, М. Курык, V. Romanchuk, R. Kolodiy, “Designing the new backhaul for 5G heterogeneous network based on converged optical infrastructure,” *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 4, pp. 9-13, 2017.

308. В.С. Андрущак, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, С.С. Думич, Ю.В. Пиріг, “Інтелектуальне управління інформаційними потоками в оптичних транспортних мережах”, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), С. 4-16, 2019.

309. V. Andrushchak, S. Dumych, T. Maksymyuk, M. Kaidan and O. Urikova, “Intelligent data flows management for performance improvement of optical label switched network,” *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1143-1146.

310. М.В. Кайдан, С.С. Думич, Т.А. Максимюк, Р.А. Бурачок, Л.М. Готра, “Розрахунок параметрів якості обслуговування у фотонних транспортних мережах”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації»*, №796, С. 147-156, 2014.

311. S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko and P. Guskov, "The virtual channel parameters calculation in all-optical network," *IEEE International*

*Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, p. 88.

312. Т. А. Максимюк, С. С. Думич, О. В. Холявка, П. О. Гуськов, “Методика розрахунку ймовірності блокування у повністю оптичних телекомунікаційних системах”, *Науково-методична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2012”*, 1-4 листопада 2012 р., Львів, С.45-47.

313. ITU-T SG 15, “Status of ORAN Cooperative Transport Interface Project,” 2017.

314. Т.А. Максимюк, Б.П. Шубин, В.С. Андрущак, С.С. Думич, М.М. Климаш, “Метод інтелектуального управління контентом у мережах мобільного зв’язку”, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(68), С. 15-26, 2020.

315. П. О. Гуськов, С. С. Думич, Т. А. Максимюк, “Дослідження методів агрегації інформаційних потоків в крайовому вузлі мережі з комутацією блоків”, *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013» (СПТЕЛ – 2013)*, Львів 30 жовтня – 2 листопада 2013, С. 215–220.

316. С.С. Думич, Д.С. Жуковська, Т.А. Максимюк, “Дослідження процесу агрегації трафіку в оптичних транспортних мережах з комутацією блоків”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіoeлектроніка та телекомунікації»*, №818, С. 130-136, 2015.

317. V. Andrushchak, M. Kaidan, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Smart payload management in edge nodes of optical label switching networks," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Dec. 2019, Kyiv, Ukraine, pp. 175-178.

318. S. Dumych, P. Guskov, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Simulation of characteristics of optical burst switched networks," *IEEE International Crimean*

*Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo), Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 492-493.*

319. S. Dumych, T. Maksymyuk, P. Guskov, "Simulation of burst aggregation and signalling schemes for optical burst switched networks," *Комп'ютерні науки та інженерія : матеріали VI Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2013*, 21–23 листопада 2013 року, Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 40-41.

320. T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko and M. Jo, "Software defined optical switching for cloud computing transport systems," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2015, Bali, Indonesia, article #46.

321. Б. М. Стрихалюк, С. С. Думич, М. В. Кайдан, Т. А. Максимюк, "Повнозв'язний оптичний комутатор для оптичних систем зі спектральним ущільненням каналів", *Науково-методична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2012”*, 1-4 листопада 2012 р., Львів, С.66-67.

322. Б. Стрихалюк, М. Кайдан, С. Думич, Т. Максимюк, "Модель оптичного комутатора для систем зі спектральним ущільненням каналів," *VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології»*, Лівадія, 2012.

323. М. М. Климаш, М. В. Кайдан, Т. А. Максимюк, "Підвищення ефективності оптичних транспортних систем за рахунок акустооптичних взаємодій у фотонних кристалах", *VI Міжнародний науково-технічний симпозиум "Нові технології в телекомунікаціях"*, ДУІКТ, Вишків, 2013, С. 143-146.

324. Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, В.З. Пашкевич, "Модель акустооптичного комутатора для повністю оптичних телекомунікаційних систем", *Вісник Національного університету «Львівська*

політехніка». Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №766, С. 90-95, 2013.

325. V. Andrushchak, M. Kaidan, S. Dumych, Y. Pyrih and T. Maksymyuk, “Research on the scalability of all-optical switches in the OLS networks,” *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine.

326. M. Kaidan, V. Andrushchak, T. Maksymyuk, M. Beshley, M. Klymash, “Energy efficiency acoustic Devices using 3D-analysis of Electromechanical Coupling,” 1st International conference on innovative materials and nanoengineering, *IMNE 2019 : conference program and book of abstracts*, Brenna, Poland, August 27–29, 2019, pp. 2–14.

327. Б. М. Стрихалюк, С. С. Думич, М. В. Кайдан, Т. А. Максимюк, “Алгоритм маршрутизації довжин хвиль в повністю оптичній транспортній мережі”, *VI Міжнародний науково-технічний симпозиум “Нові технології в телекомунікаціях”*, ДУІКТ, Вишків, 2013, С. 103-106.

328. Private 5G Deployment Scenarios, Netmanias, PDF file: Netmanias.2019.10.21.(en).pdf, 2019.

329. О.І. Сиротинський, І.С. Беляєв, Т.А. Максимюк, М.І. Олексін, “Захист інформаційних систем від мережевих DDOS атак на основі Марківської моделі поведінки ботнету”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації»*, №738, С. 192-197, 2012.

330. Т. Максимюк, М. Климаш, І.Беляєв, “Прихована марківська модель DDoS атаки на основі теорії динамічного хаосу,” *19-а науково-практична конференція "Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення*, Житомир, 2012.

331. М. М. Климаш, І. С. Беляєв, Т. А. Максимюк, “Модель забезпечення захисту інформаційної системи на основі виявлення аномалій в

мережевому трафіку”, VI Міжнародний науково-технічний симпозиум “Нові технології в телекомунікаціях”, ДУІКТ, Вишків, 2013, С. 71-74.

332. Максимюк Т. А., Шубин Б. П., Андрущак В. С., Бешлей Г. В., Думич С. С., Климаш М. М., «Практична реалізація програмно-конфігурованої мережі 5G на основі технологій Cloud-RAN та SDR», *Вісник Університету «Україна»*, №1 (24), С. 23-34, 2020.

333. E. Coronado, S. N. Khan and R. Riggio, "5G-EmPOWER: A Software-Defined Networking Platform for 5G Radio Access Networks," in *IEEE Transactions on Network and Service Management*, vol. 16, no. 2, pp. 715-728, June 2019.

334. Т. А. Максимюк, С. С. Думич, М. Я. Шеремета, “Конвергенція інформаційних систем радіозв’язку ближнього поля на основі платформи Android”, *Науково-методична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2012”*, 1-4 листопада 2012 р., Львів, С.91-92.

335. P. Hegedus, "Towards Analyzing the Complexity Landscape of Solidity Based Ethereum Smart Contracts," *2018 IEEE/ACM 1st International Workshop on Emerging Trends in Software Engineering for Blockchain (WETSEB)*, 2018, pp. 35-39.

336. W. Zheng, Z. Zheng, X. Chen, K. Dai, P. Li and R. Chen, "NutBaaS: A Blockchain-as-a-Service Platform," in *IEEE Access*, vol. 7, pp. 134422-134433, 2019.



# ДОДАТОК А. ОПИС ПРАКТИЧНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ ПРОТОТИПУ СИСТЕМИ МОБІЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ З ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИМ УПРАВЛІННЯМ

## А.1. Розроблення фізичної моделі децентралізованої мережі мобільного зв'язку



Рис. А.1. Загальний вигляд розробленого макету децентралізованої мережі мобільного зв'язку з використанням SDR модулів USRP 2900.



Рис. А.2. Практична реалізація мережі мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням на основі SDR модулів USRP 2900 та віддалених RU.

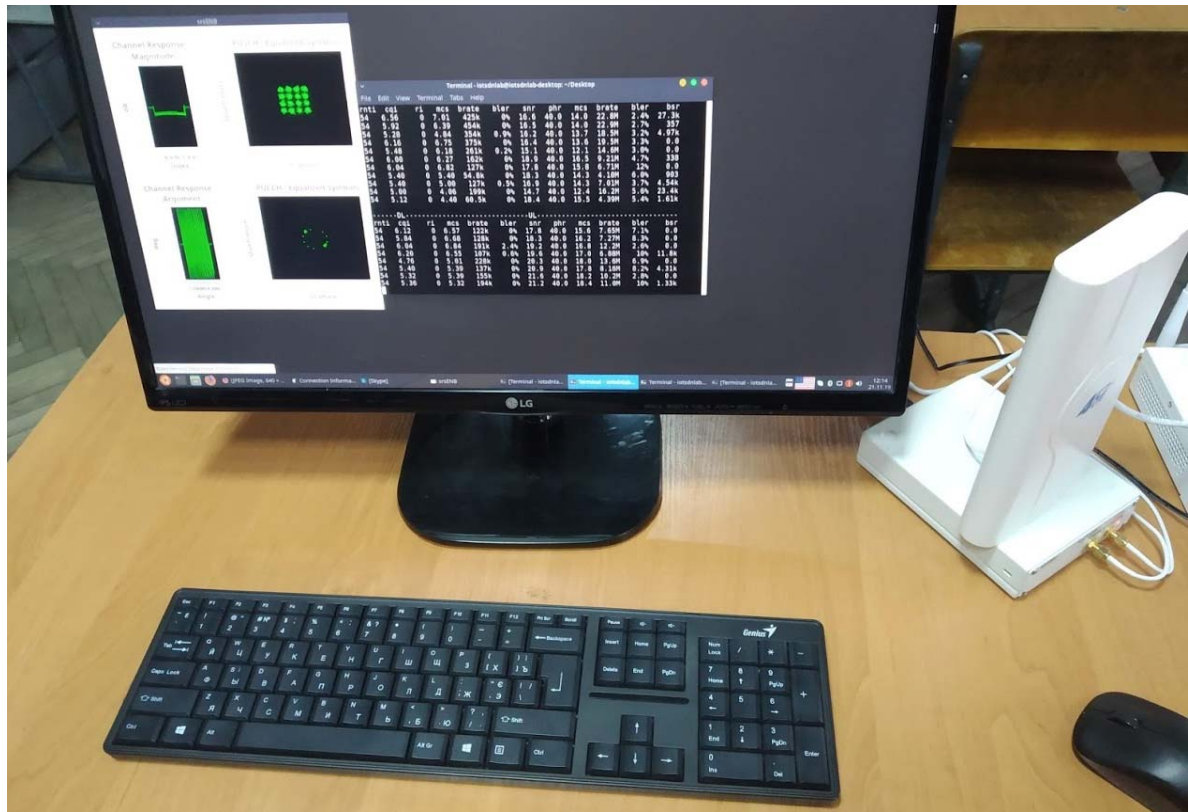


Рис. А.3. Приклад реалізації управління віддаленими RU на стороні CU/DU.

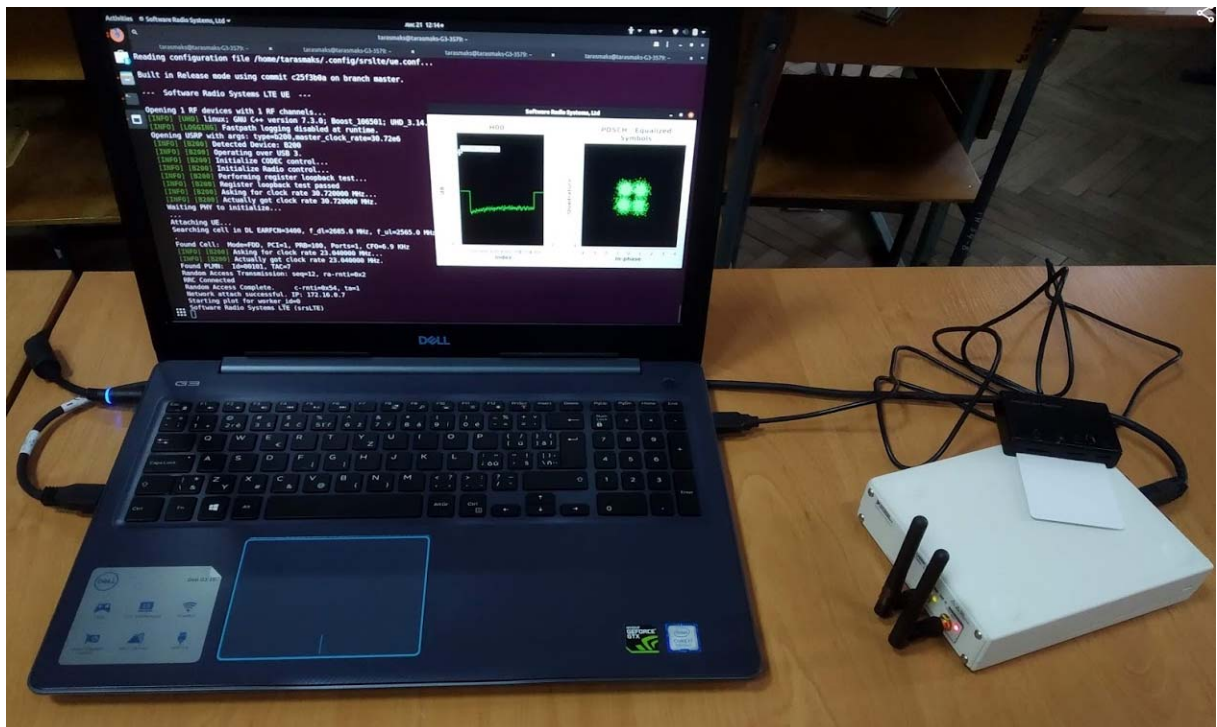


Рис. А.4. Приклад реалізації універсального ідентифікатора абонента з використанням програмованих USIM-карт.



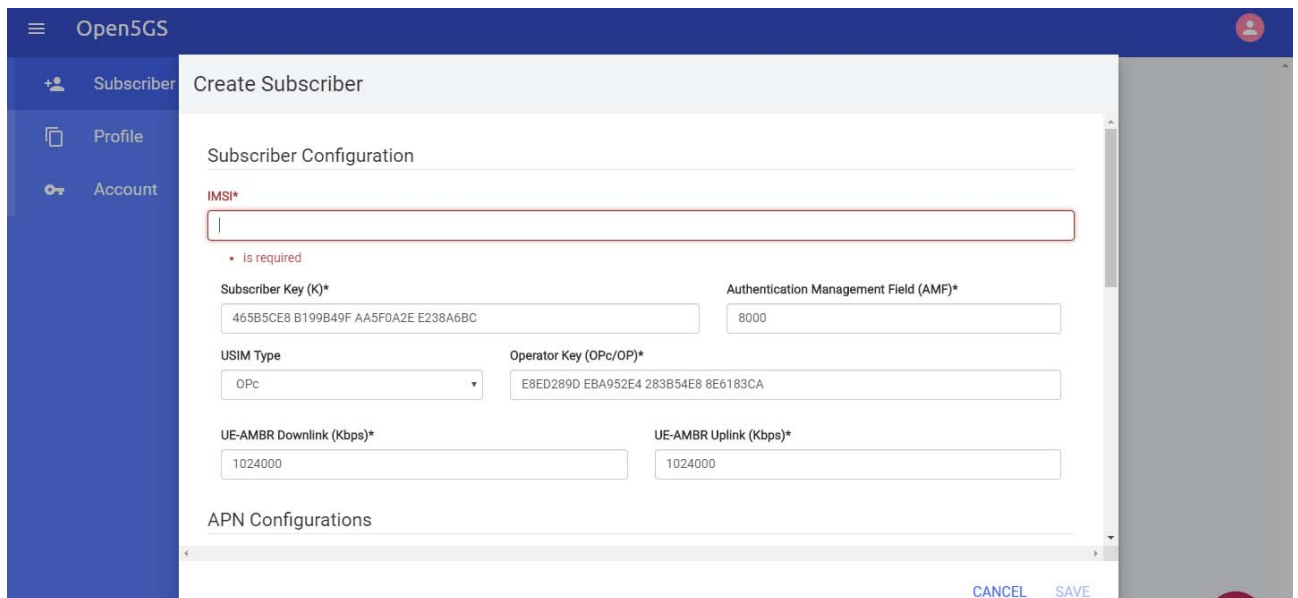


Рис. А.5. Приклад графічного інтерфейсу SDN контролера для прив'язки ідентифікатора абонента до мережі оператора.

Таблиця А.2

Конфігурація ядра мережі (EPC)

Параметр	Значення	Опис параметру
<b><i>Параметри вузла управління мобільністю мережі (MME)</i></b>		
mme_code	0x1a	8-ми бітний MME код, що ідентифікує MME в межах групи
mme_group	0x0001	16-ти бітний ідентифікатор MME групи
tac	0x0007	16-ти бітний ідентифікатор зони відслідковування – TAC (Track Area Code)
mcc	001	Мобільний код країни – MCC (Mobile Country Code)
mnc	01	Код мобільної мережі – MNC (Mobile Network Code)
apn	srsapn	Ім'я точки доступу APN (Access Point Name)
mme_bind_addr	127.0.1.100	IP-адреса для прослуховування eNB S1-MME з'єднань
dns_addr	8.8.8.8	Адреса DNS сервера для UE
encryption_algo	EEA0	Криптографічний алгоритм NAS рівня
integrity_algo	EIA1	Криптографічний алгоритм захисту цілісності NAS рівня
paging_timer	2	Значення таймера пейджингу, с
<b><i>Параметри шлюзу обслуговування та мережі спільного доступу (S/P-GW)</i></b>		
gtpu_bind_addr	127.0.1.100	IP-адреса для прив'язки до GTP (GPRS Tunneling Protocol) з'єднання
sgi_if_addr	172.16.0.1	IP-адреса SGi TUN інтерфейсу
sgi_if_name	srs_spgw_sgi	Ім'я SGi TUN інтерфейсу
max_paging_queue	100	Кількість пакетів у черзі (на 1 UE)

## Конфігурація базової станції (eNB)

Назва параметру	Значення	Опис параметру
<b>Загальні налаштування</b>		
enb_id	0x19B	20-ти бітний ідентифікатор eNB
cell_id	0x01	8-ми бітний ідентифікатор комірки
phy_cell_id	1	Ідентифікатор комірки на фізичному рівні
tac	0x0007	16-ти бітний ідентифікатор зони відслідковування
mcc	001	Мобільний код країни
mnc	01	Код мобільної мережі
mme_addr	127.0.1.100	IP-адреса вузла управління мобільністю мережі для з'єднання S1
gtp_bind_addr	127.0.1.1	IP-адреса для прив'язки до GTP з'єднання
s1c_bind_addr	127.0.1.1	IP-адреса для прив'язки до S1AP (S1 Application Protocol) з'єднання
n_prb	50	Кількість фізичних ресурсних блоків
tm	1	Режим передачі
nof_ports	1	Кількість передавальних портів (для багатоантенної передачі)
<b>Параметри радіоінтерфейсу</b>		
dl_earfcn	3400	Абсолютний номер висхідного (Downlink) каналу зв'язку (EARFCN – eUTRAN Absolute Radio Frequency Channel)
tx_gain	80	Потужність передавача, дБ
rx_gain	40	Чутливість приймача, дБ
dl_freq	auto	Частота висхідного каналу зв'язку, МГц (авто – у відповідності до EARFCN)
ul_freq	auto	Частота низхідного каналу зв'язку, МГц (авто – у відповідності до EARFCN)
device_name	auto	Назва під'єданого SDR
device_args	auto	Додаткові аргументи для драйвера SDR пристрою
time_adv_nsamples	auto	Випередження передачі (у відліках) для компенсації радіочастотної затримки від прийому на антені до вставлення часової відмітки
burst_preamble_us	auto	Довжина преамбули, що передається перед основним пакетом
<b>Параметри модуляції</b>		
pdsch_mcs	auto	Позиційність модуляції (MCS – Modulation Coding Scheme) фізичного низхідного каналу передачі інформації (PDSCH – Physical Downlink Shared Channel) (авто –

		динамічна позиційність модуляції на основі індикатору якості каналу)
pdsch_max_mcs	auto	Максимальна позиційність модуляції PDSCH каналу
pusch_mcs	auto	Позиційність модуляції фізичного низхідного каналу передачі інформації (PUSCH – Physical Uplink Shared Channel) (авто – динамічна позиційність модуляції на основі індикатору якості каналу)
pusch_max_mcs	16	Максимальна позиційність модуляції PUSCH каналу
nof_ctrl_symbols	3	Кількість контрольних символів

Таблиця А.4

Конфігурація абонентського пристрою (UE)

Назва параметру	Значення	Опис параметру
<i>Параметри радіоінтерфейсу</i>		
dl_earfcn	3400	Абсолютний номер висхідного (Downlink) каналу зв'язку (EARFCN – eUTRAN Absolute Radio Frequency Channel)
freq_offset	0	Зсув частоти висхідного та низхідного каналу
tx_gain	80	Потужність передавача, дБ
rx_gain	40	Чутливість приймача, дБ
dl_freq	auto	Частота висхідного каналу зв'язку, МГц (авто – у відповідності до EARFCN)
ul_freq	auto	Частота низхідного каналу зв'язку, МГц (авто – у відповідності до EARFCN)
nof_radios	auto	Кількість під'єднаних SDR пристроїв
nof_rf_channels	auto	Кількість РЧ каналів у кожному пристрої
nof_rx_ant	auto	Кількість приймальних антен у кожному пристрої
device_name	auto	Назва під'єданого SDR
device_args	auto	Додаткові аргументи для драйвера SDR
time_adv_nsamples	auto	Випередження передачі (у відліках) для компенсації радіочастотної затримки від прийому на антені до вставлення часової відмітки
burst_preamble_us	auto	Довжина преамбули, що передається перед основним пакетом
continuous_tx	auto	Неперервна або пакетна передача відліків радіосигналу

<b>Параметри SIM-карти USIM (Universal Subscriber Identity Module)</b>		
mode	soft	Режим USIM
algo	xor	Алгоритм автентифікації
opc	63BFA50E E6523365 FF14C1F4 5F88737D	128-ми бітне поле конфігурації варіанту криптографічного алгоритму оператора
k	00112233 44556677 8899aabb ccddeeff	128-ми бітний ключ абонента
imsi	00101 01234 56789	15-ти значний міжнародний ідентифікатор користувача IMSI (International Mobile Subscriber Identity)
imei	35349 00698 73319	15-ти значний міжнародний ідентифікатор мобільного обладнання IMEI (International Mobile Equipment Identity)
pin	1234	PIN-код у випадку використання справжньої SIM-карти
reader	–	Ім'я апаратного зчитувача SIM-карти
<b>Параметри контролю радіоресурсів – RRC (Radio Resource Control)</b>		
ue_category	4	Категорія UE (від 1 до 5)
release	8	Версія UE (від 8 до 10)
feature_group	0xe6041 000	Значення поля <i>featureGroupIndicators</i> у повідомленні <i>UECapabilityInformation</i>
<b>Параметри рівня без доступу NAS (Non-Access Stratum)</b>		
apn	internet	Ім'я точки доступу APN
apn_protocol	ipv4	APN протокол
user	srsuser	Ім'я користувача для CHAP автентифікації
pass	srspass	Пароль користувача для CHAP автентифікації
force_imsi_attach	false	Завжди виконувати підключення до IMSI
eia	1,2	Перелік підтримуваних криптографічних алгоритмів захисту цілісності (1 - Snow3G, 2 - AES)
eea	0,1,2	Перелік підтримуваних криптографічних алгоритмів (0 - NULL, 1 - Snow3G, 2 - AES)

```

Sending Modify Bearer Request.
Received GTP-C PDU. Message type: GTPC_MSG_TYPE_MODIFY_BEARER_REQUEST
UL NAS: Detach Request
Detach request -- IMSI 001010123456789
Received GTP-C PDU. Message type: GTPC_MSG_TYPE_DELETE_SESSION_REQUEST
Received UE Context Release Complete. MME-UE S1AP Id 15
There are active E-RABs, send release access bearers request
UE Context Release Completed.
Initial UE message: LIBLTE_MME_MSG_TYPE_ATTACH_REQUEST
Received Initial UE message -- Attach Request
Attach request -- GUTI Style Attach request
Attach request -- M-TMSI: 0xa13db8e
Attach request -- eNB-UE S1AP Id: 8
Attach request -- Attach type: 1
Attach Request -- UE Network Capabilities EEA: 11100000
Attach Request -- UE Network Capabilities EIA: 01100000
Attach Request -- MS Network Capabilities Present: false
PDN Connectivity Request -- EPS Bearer Identity requested: 0
PDN Connectivity Request -- Procedure Transaction Id: 1
PDN Connectivity Request -- ESM Information Transfer requested: false
Attach Request -- Found previously attach UE.
Found UE context. IMSI: 001010123456789, old eNB UE S1AP Id 0, old MME UE S1AP Id 0
GUTI Attach -- NAS Integrity OK. UL count 5, DL count 2
Generating KeNB with UL NAS COUNT: 5
Getting subscription information -- QCI 7
Sending Create Session Request.
Creating Session Response -- IMSI: 1010123456789
Creating Session Response -- MME control TEID: 7
Received GTP-C PDU. Message type: GTPC_MSG_TYPE_CREATE_SESSION_REQUEST
SPGW: Allocated Ctrl TEID 7
SPGW: Allocated User TEID 7
SPGW: Allocate UE IP 172.16.0.8
Received Create Session Response
Create Session Response -- SPGW control TEID 7
Create Session Response -- SPGW S1-U Address: 127.0.1.100
SPGW Allocated IP 172.16.0.8 to IMSI 001010123456789
Adding attach accept to Initial Context Setup Request
Initial Context Setup Request -- eNB UE S1AP Id 8, MME UE S1AP Id 16
Initial Context Setup Request -- E-RAB id 5
Initial Context Setup Request -- S1-U TEID 0x7. IP 127.0.1.100
Initial Context Setup Request -- S1-U TEID 0x7. IP 127.0.1.100
Initial Context Setup Request -- QCI 7
Received Initial Context Setup Response
E-RAB Context Setup. E-RAB id 5
E-RAB Context -- eNB TEID 0x500003; eNB GTP-U Address 127.0.1.1
UL NAS: Received Attach Complete
Unpacked Attached Complete Message. IMSI 1010123456789
Unpacked Activate Default EPS Bearer message. EPS Bearer id 5
Received GTP-C PDU. Message type: GTPC_MSG_TYPE_MODIFY_BEARER_REQUEST
Sending EMM Information

```

Рис. А.5. Приклад лог-файлу ЕРС при встановленні параметрів якості сервісу для абонента.

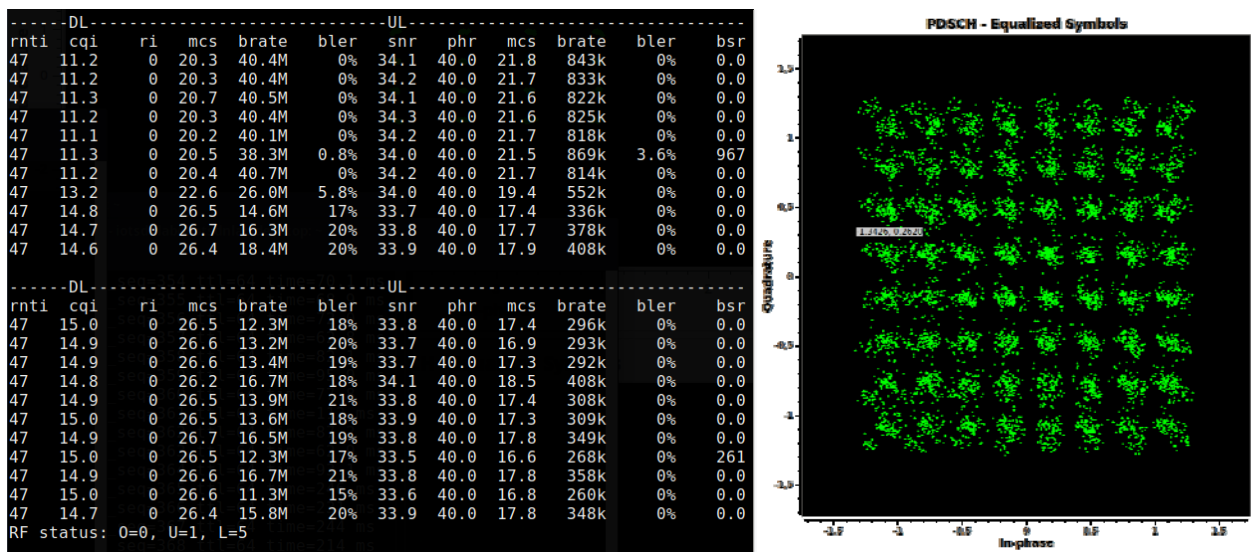


Рис. А.6. Результати процесу передавання даних в низхідному каналі з високим CQI: лог-файл eNB – (а) та сигнальне сузір'я PDSCH каналу UE – (б).

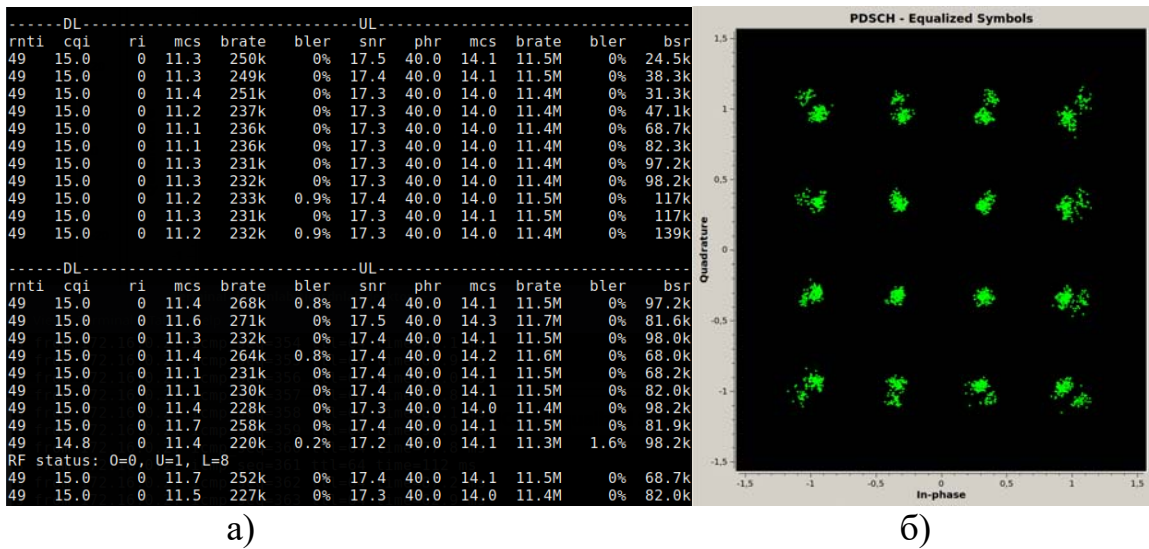


Рис. А.7. Результати процесу передавання даних у висхідному каналі з середнім CQI: лог-файл eNB – (а) та сигнальне сузір'я PUSCH каналу UE – (б).

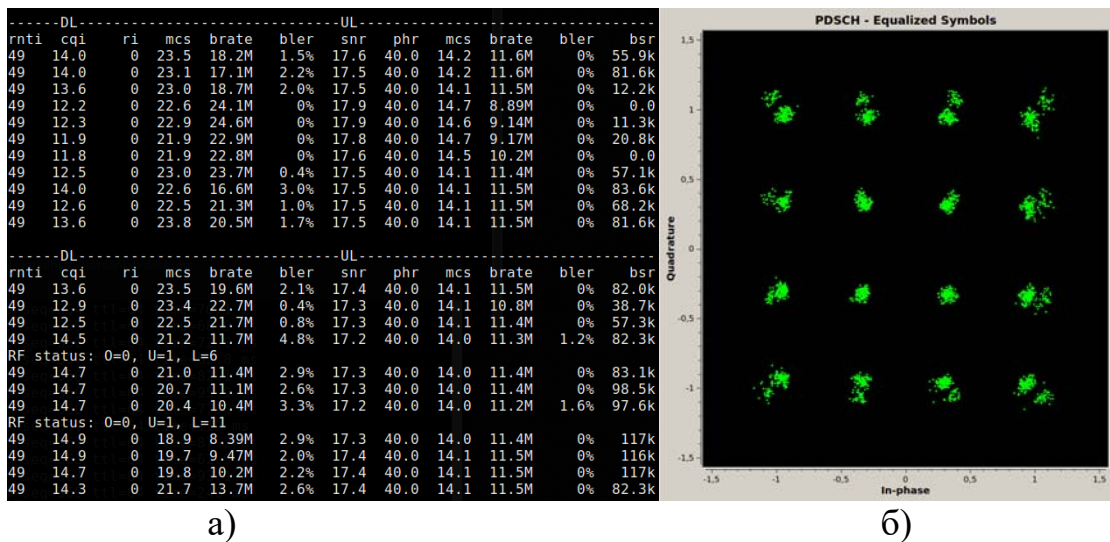
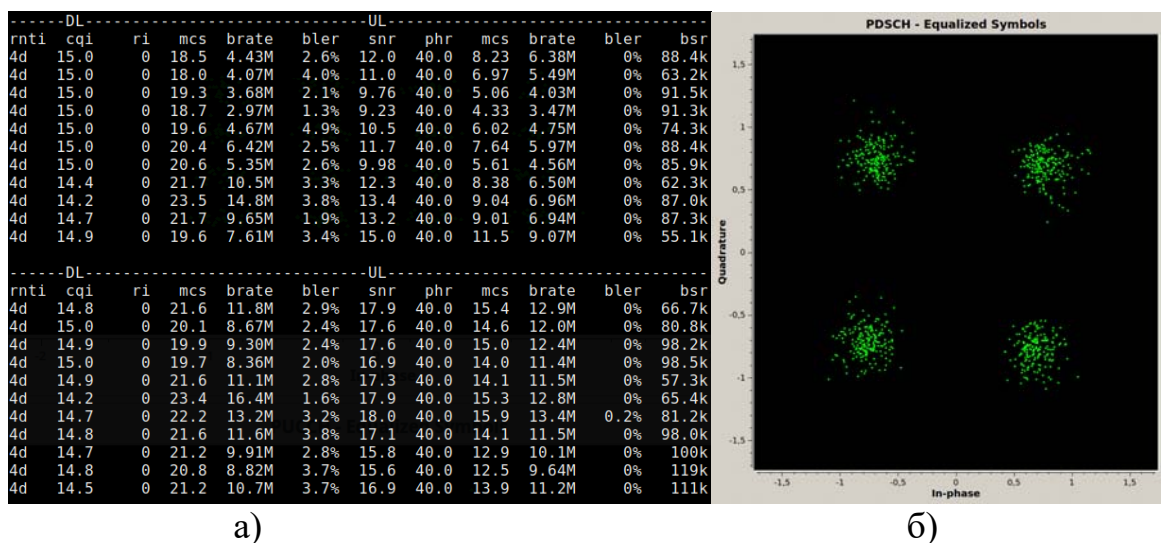


Рис. А.8. Результати процесу передавання даних обох напрямках з середнім CQI: лог-файл eNB – (а) та сигнальне сузір'я PDSCH каналу UE – (б).





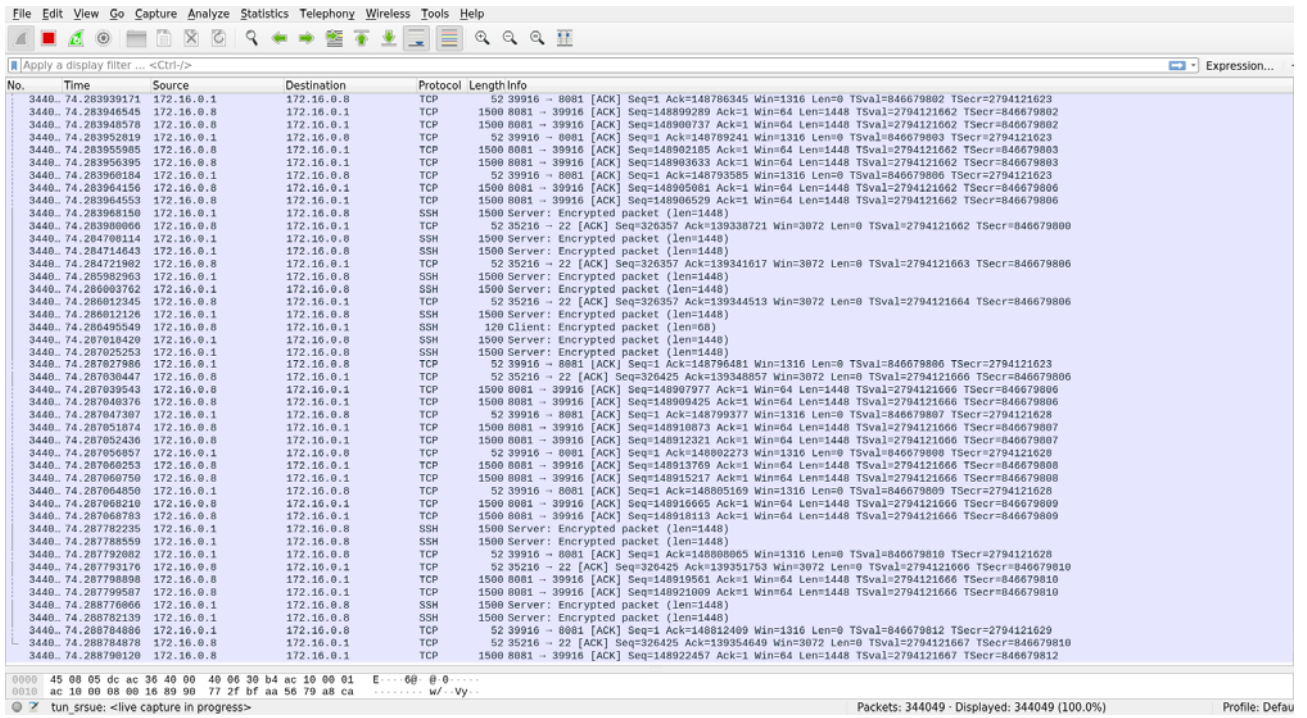


Рис. А.9. Аналіз вхідного та вихідного трафіку UE з використанням програмного аналізатора трафіку Wireshark

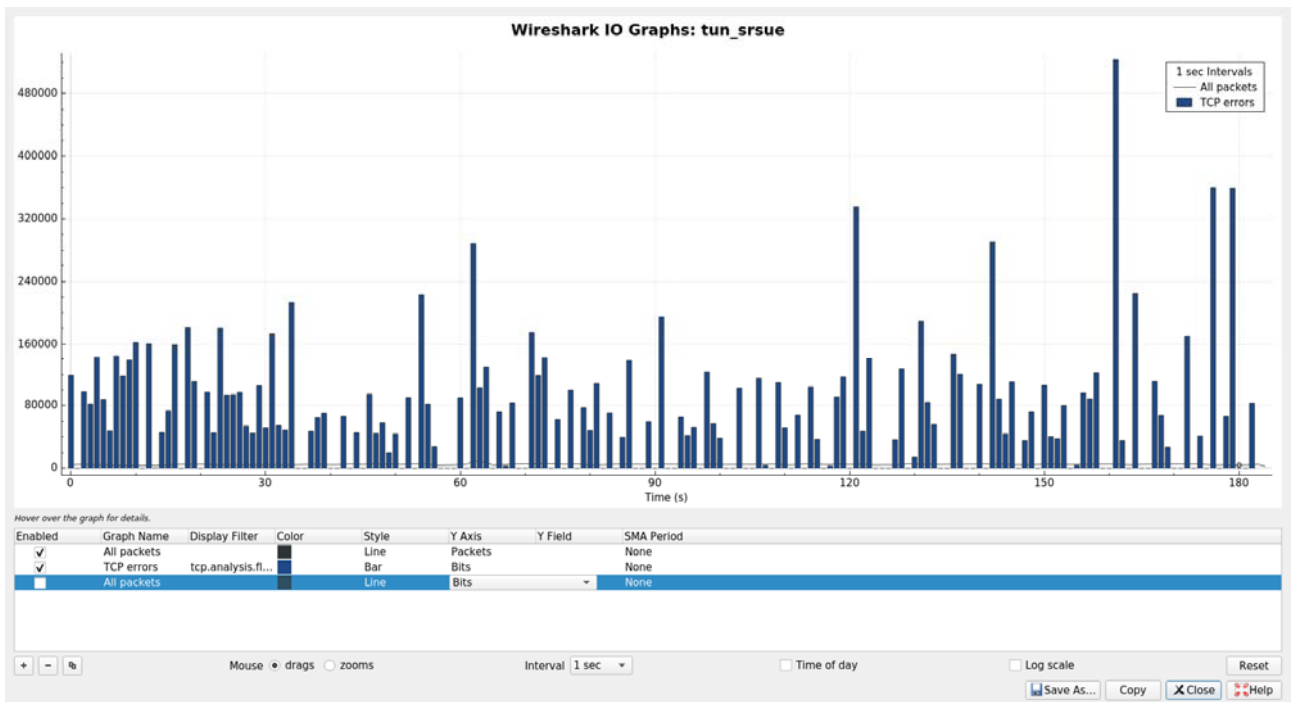


Рис. А.10. Аналіз пакетних помилок при передаванні трафіку від eNB до UE з використанням програмного аналізатора трафіку Wireshark.

## А.2. Розроблення системи інтелектуального автоматизованого управління децентралізованою мережею мобільного зв'язку

Тестова система мобільного зв'язку реалізована у вигляді окремих додатків srsUE, srsENB та srsEPC, які запускаються в контейнерах Docker (Docker – інструментарій для управління ізольованими Linux-контейнерами) на базі віртуальної машини з Ubuntu 19.10 LTS. Ядро EPC, базова станція eNB та віртуальний абонентський пристрій UE працюють у окремих ізольованих контейнерах, які можуть розгортатись на базі Raspberry Pi 4 для зменшення вартості. Консольний вивід при запуску контейнерів представлений на рис.

А.11-А.13.

```
virtual-srsenb | linux; GNU C++ version 7.3.0; Boost_106501; UHD_003.010.003.000-0-unknown
virtual-srsenb |
virtual-srsenb | Built in Release mode using commit on branch .
virtual-srsenb |
virtual-srsenb | --- Software Radio Systems LTE eNodeB ---
virtual-srsenb |
virtual-srsenb | Reading configuration file enb.conf.fauxrf..
virtual-srsenb | 13:05:15.312226 [SRF.] [I] rf_shmem_open_multi, channels 1, args [enb]
virtual-srsenb | 13:05:15.312539 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, got shm_dl_fd 0x4
virtual-srsenb | 13:05:15.312577 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, got shm_ul_fd 0x5
virtual-srsenb | 13:05:15.312718 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_0
virtual-srsenb | 13:05:15.312793 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_1
virtual-srsenb | 13:05:15.312860 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_2
virtual-srsenb | 13:05:15.312968 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_3
virtual-srsenb | 13:05:15.313051 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_4
virtual-srsenb | 13:05:15.313121 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_5
virtual-srsenb | 13:05:15.313191 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_6
virtual-srsenb | 13:05:15.313257 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_7
virtual-srsenb | 13:05:15.313323 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_8
virtual-srsenb | 13:05:15.313388 [SRF.E] [W] rf_shmem_open_ipc, created sem /shmemrf_sem_9
virtual-srsenb |
virtual-srsenb | Warning burst preamble is not calibrated for device shmemrf. Set a value manually
virtual-srsenb |
virtual-srsenb | 13:05:15.346616 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_rx_gain, gain 0.00 to 40.00
virtual-srsenb | 13:05:15.346647 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_tx_gain, gain 0.00 to 80.00
virtual-srsenb | Setting frequency: DL=2685.0 Mhz, UL=2565.0 Mhz
virtual-srsenb | 13:05:15.346750 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_tx_freq, freq 0.00 MHz to 2685.00 MHz
virtual-srsenb | 13:05:15.346770 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_rx_freq, freq 0.00 MHz to 2565.00 MHz
virtual-srsenb | 13:05:16.516450 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_master_clock_rate, rate 0.00 MHz to 23.04 MHz
virtual-srsenb | Setting Sampling frequency 5.76 MHz
virtual-srsenb | 13:05:16.516604 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_rx_srate, srate 1.92 MHz to 5.76 MHz
virtual-srsenb | 13:05:16.516619 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_tx_srate, srate 1.92 MHz to 5.76 MHz
virtual-srsenb | Setting manual TX/RX offset to 0 samples
virtual-srsenb |
virtual-srsenb | ==== eNodeB started ====
```

Рис. А.11. Консольний вивід при запуску eNB

Як можна спостерігати з рис. А.11, eNB була запущена на частоті 2685МГц у низхідному каналі (DL) та 2565МГц у висхідному каналі (UL), з відповідним підсиленням 80 дБ – Tx та 40 дБ – Rx.

```

virtual-srsepc |
virtual-srsepc | Built in Release mode using commit on branch .
virtual-srsepc |
virtual-srsepc |
virtual-srsepc | --- Software Radio Systems EPC ---
virtual-srsepc |
virtual-srsepc | Reading configuration file epc.conf...
virtual-srsepc | HSS Initialized.
virtual-srsepc | MME GTP-C Initialized
virtual-srsepc | MME Initialized.
virtual-srsepc | SP-GW Initialized.
virtual-srsepc | Received S1 Setup Request.
virtual-srsepc | S1 Setup Request - eNB Name: srsenb01, eNB id: 0x19b
virtual-srsepc | S1 Setup Request - MCC:001, MNC:01, PLMN: 61712
virtual-srsepc | S1 Setup Request - TAC 7, B-PLMN 0
virtual-srsepc | S1 Setup Request - Paging DRX 2
virtual-srsepc | Sending S1 Setup Response

```

Рис. А.12. Консольний вивід при запуску EPC.

Як можна спостерігати на рисунку 2.17, в контейнері розгортаються основні компоненти EPC, такі як HSS, MME, SP-GW, з якими з'єднується eNB через інтерфейс S1.

```

virtual-srsue | --- Software Radio Systems LTE UE ---
virtual-srsue |
virtual-srsue | Opening RF device with 1 RX antennas...
virtual-srsue | 13:05:17.994747 [SRF. ] [I] rf_shmem_open_multi, channels 1, args [ue]
virtual-srsue | 13:05:17.994846 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, got shm_dl_fd 0x4
virtual-srsue | 13:05:17.994878 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, got shm_ul_fd 0x5
virtual-srsue | 13:05:17.994998 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_0
virtual-srsue | 13:05:17.995044 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_1
virtual-srsue | 13:05:17.995074 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_2
virtual-srsue | 13:05:17.995105 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_3
virtual-srsue | 13:05:17.995140 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_4
virtual-srsue | 13:05:17.995447 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_5
virtual-srsue | 13:05:17.995493 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_6
virtual-srsue | 13:05:17.995523 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_7
virtual-srsue | 13:05:17.995559 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_8
virtual-srsue | 13:05:17.995589 [SRF.U] [W] rf_shmem_open_ipc, opened sem /shmemrf_sem_9
virtual-srsue |
virtual-srsue | Warning burst preamble is not calibrated for device shmemrf. Set a value manually
virtual-srsue |
virtual-srsue | set continuous no
virtual-srsue | 13:05:18.010961 [SRF.U] [I] rf_shmem_set_rx_gain, gain 0.00 to 40.00
virtual-srsue | 13:05:18.010997 [SRF.U] [I] rf_shmem_set_tx_gain, gain 0.00 to 80.00
virtual-srsue | Waiting PHY to initialize...
virtual-srsue | ...
virtual-srsue | Attaching UE...

```

Рис. А.13. Консольний вивід при запуску UE.

Для забезпечення автоматизованої децентралізованої реконфігурації базових станцій розроблено спрощену систему управління, яка полягає у формуванні файлів з оновленнями параметрів для кожної базової станції. Оновлення файлу здійснюється алгоритмами на основі штучного інтелекту, які визначають оптимальні параметри в конкретний момент часу (табл.А.5)

Файл оновлень має наступний формат даних який адаптований до стеку srsLTE:

```
[ {  
    "enb_id":"0x19B",  
    "cell_id":"0x01",  
    "dl_carfcn":"3200",  
    "tx_gain":"70",  
    "rx_gain":"50"  
    .....  
}]
```

Кожен елемент списку є словником з ідентифікатором eNB та комірки, а також з параметрами які необхідно змінити. Одним файлом передаються зміни для всіх базових станцій в мережі. Розроблена система складається з наступних ключових функцій.

1. Функція для зчитування ідентифікатора eNB з поточного файлу конфігурації.

```
def get_enb_id_from_file(file_path):  
    try:  
        enb_id = "  
        with open(file_path, 'r') as conf_file:  
            for line in conf_file:  
                if "enb_id =" in line:  
                    enb_id = line.rstrip()[line.find('=') + 2:]  
                    conf_file.close()  
                    return enb_id
```

2. Функція для зчитування нових конфігурацій eNB з файлу.

```
def get_configs_for_enb(enb_id, file_path):
    try:
        enb = ""
        with open(file_path, 'r') as f:
            data = json.loads(f.read())
        for enb in data:
            if enb_id == enb['enb_id']:
                return enb
        ...
```

3. Функція для генерування файлу з новими параметрами конфігурації шляхом перезапису поточних параметрів.

```
def create_new_config_file(file_path, new_configs):
    ...
    path = file_path
    for key, value in new_configs.items():
        with open(path, 'r') as conf_file:
            data = conf_file.readlines()
            for i, line in enumerate(data):
                if line.startswith(key + " = "):
                    data[i] = "{} = {}\n".format(key, value)
            ...
    path = 'tmp.conf'
    with open(path, 'w') as conf_file:
        conf_file.writelines(data)
    ...
```

4. Функція для зчитування файлу з оновленою конфігурацією на стороні eNB та перезапуску з іншими параметрами.

```
def move_run_config_file(file_path):
    try:
```

```

subprocess.run(["docker", "cp", file_path, "virtual-
srsenb:/srslte/enb.conf.fauxrf"])

subprocess.run(["docker-compose", "stop"])

subprocess.run(["docker-compose", "up"]) ...

```

При запуску програми з вказаними шляхами до файлу конфігурації та файлу з новими параметрами, можна спостерігати вивід представлений на рисунку А.14.

```

13:15:38.692193 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_rx_gain, gain 0.00 to 50.00
13:15:38.692232 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_tx_gain, gain 0.00 to 70.00
Setting frequency: DL=1854.9 Mhz, UL=1759.9 MHz
13:15:38.692276 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_tx_freq, freq 0.00 MHz to 1854.90 MHz
13:15:38.692292 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_rx_freq, freq 0.00 MHz to 1759.90 MHz
13:15:39.633067 [SRF.E] [I] rf_shmem_set_master_clock_rate, rate 0.00 MHz to 23.04 MHz

```

Рис. А.14. Консольний вивід при запуску eNodeB з новими параметрами

Як можна спостерігати з рис. А.14 eNB запустилась із зміненими параметрами мережі радіодоступу, з частотою DL 1855МГц та UL 1760МГц, і відповідними підсиленнями Tx 70 дБ та Rx 50 дБ. Автоматизація запуску скрипта може бути реалізована або у вигляді сервісу, що буде працювати постійно і перевірятиме зміни, або за допомогою утиліти cron.

Таблиця А.5

Структура датасету для навчання моделі нейронної мережі LSTM

Тип сервісу	Мережа походження	Час запису	Швидкість	Втрати пакетів	Затримка, мс	Тип слайсу
AR/VR/Ігри	LTE/5G	2019-01-13 06:05:00	GBR	0.001	50	eMBB
AR/VR/Ігри	LTE/5G	2019-01-13 06:10:00	NGBR	0.001	100	eMBB/ mMTC
Телемедицина	IoT (LTE-M, NB-IoT)	2019-01-13 06:15:00	GBR	1e-06	10	URLLC
...						
Індустрія 4.0	IoT (LTE-M, NB-IoT)	2019-01-13 06:20:00	NGBR	0.001	50	mMTC
Індустрія 4.0	IoT (LTE-M, NB-IoT)	2019-01-13 06:25:00	GBR	1e-06	10	URLLC

## Код програми для реконфігурації і перезапуску eNodeB

```
import os
import sys
import json
import argparse
import filecmp
import shutil
import subprocess

parser = argparse.ArgumentParser()
parser.add_argument('--enb_config_path', type=str, default='enb.conf')
parser.add_argument('--data_file_path', type=str, default='data.txt')
args = parser.parse_args()

def get_enb_id_from_file(file_path):
    try:
        enb_id = ""
        with open(file_path, 'r') as conf_file:
            for line in conf_file:
                if "enb_id =" in line:
                    enb_id = line.rstrip()[line.find('=') + 2:]
                    conf_file.close()
                    return enb_id
        if enb_id == "":
            print("enb_id not found. Invalid enb.conf")
            sys.exit(2)
    except Exception as err:
        print("Failed with error: ", str(err))
        sys.exit(2)

def get_configs_for_enb(enb_id, file_path):
    try:
```

```

enb = "
with open(file_path, 'r') as f:
    data = json.loads(f.read())
for enb in data:
    if enb_id == enb['enb_id']:
        return enb
if enb == "":
    print("No new configurations for this eNB, or wrong path to file")
    sys.exit(0)
except Exception as err:
    print("Failed with error: ", str(err))
    sys.exit(3)

def create_new_config_file(file_path, new_configs):
    try:
        path = file_path
        for key, value in new_configs.items():
            with open(path, 'r') as conf_file:
                data = conf_file.readlines()
                for i, line in enumerate(data):
                    if line.startswith(key + " = "):
                        data[i] = "{} = {}\n".format(key, value)
            conf_file.close()
        path = 'tmp.conf'
        with open(path, 'w') as conf_file:
            conf_file.writelines(data)
            conf_file.close()
        if filecmp.cmp(file_path, path):
            os.remove(path)
            print("No changes in enb.conf file. Exiting")
            sys.exit(0)
        else:
            shutil.copy(path, file_path)
            os.remove(path)
            print("Changed enb.conf")

```



```

except Exception as err:
    print("Failed with error: ", str(err))
    sys.exit(4)

def move_run_config_file(file_path):
    try:
        subprocess.run(["docker", "cp", file_path, "virtual-
rsenb:/srslte/enb.conf.fauxrf"])
        subprocess.run(["docker-compose", "stop"])
        subprocess.run(["docker-compose", "up"])
        sys.exit(0)
    except Exception as err:
        print("Failed with error: ", str(err))
        sys.exit(5)

if __name__ == "__main__":
    try:

        # Gets enb_id from existing enb.conf file
        enb_id = get_enb_id_from_file(args.enb_config_path)

        # Selects configs for this specific enb
        enb_configs = get_configs_for_enb(enb_id, args.data_file_path)

        # Creates new config file with new parameters and checks if there are any
changes
        create_new_config_file(args.enb_config_path, enb_configs)

        # Moves new conf file to be used by srsLTE and restarts docker container where
emulated srsLTE runs
        move_run_config_file(args.enb_config_path)

    except Exception as err:
        print("Failed with error: ", str(err))
        sys.exit(1)

```

## Код програми для попереднього слайсингу інформаційних потоків в процесі навчання нейронних мереж

```
import numpy as np
import pandas as pd
from sklearn.preprocessing import StandardScaler, MinMaxScaler

def process_data(full, train, test, lags):
    attr = ['FemtoCell_2602',
'FemtoCell_2605','FemtoCell_2608','FemtoCell_2609','FemtoCell_2610','FemtoCell_
2620','FemtoCell_2628','FemtoCell_2635','FemtoCell_2640','FemtoCell_2649','Femt
oCell_2690','FemtoCell_2693']
    df0 = pd.read_csv(train, encoding='utf-8').fillna(0)
    df = pd.read_csv(full, encoding='utf-8').fillna(0)
    dfx = df[attr]
    d = df.to_numpy()
    d0 = df0.to_numpy()
    lat = d[:, 1]
    lon = d[:, 2]
    cell = d[:, 1:100]
    cell1 = d[:, 1:33]
    cell2 = d[:, 33:66]
    cell3 = d[:, 66:100]
    cell4 = d[:, 9:12]
    scell = np.sum(cell, 1)
    scell1 = np.sum(cell1, 1)
    scell2 = np.sum(cell2, 1)
    scell3 = np.sum(cell3, 1)
    scell4 = np.sum(cell4, 1)
    df1 = pd.read_csv(train, encoding='utf-8').fillna(0)
    df2 = pd.read_csv(test, encoding='utf-8').fillna(0)

    # scaler = StandardScaler().fit(df1[attr].values)
    scaler.transform(df2[attr].values.reshape(-1, 1)).reshape(1, -1)[0]

    train, test = [], []
```

```

for i in range(lags, len(flow1)):
    train.append(flow1[i - lags: i + 1])
for i in range(lags, len(flow2)):
    test.append(flow2[i - lags: i + 1])

train = np.array(train)
test = np.array(test)
np.random.shuffle(train)

X_train = train[:, :-1]
y_train = train[:, -1]
X_test = test[:, :-1]
y_test = test[:, -1]
return X_train, y_train, X_test, y_test, scaler
scaler = MinMaxScaler(feature_range=(0, 1)).fit(scell3.reshape(-1,1))
df1[attr].values.reshape(-1, 1))
data_flow = scaler.transform(scell3.reshape(-1, 1)).reshape(1, -1)[0]
flow1 = data_flow[0:200000]
flow2 = data_flow [200001:281590]

```

**Код програми для створення нейронної мережі LSTM з попередньо визначеними параметрами**

```

from keras.layers import Dense, Dropout, Activation
from keras.layers.recurrent import LSTM
from keras.models import Sequential

def get_lstm(units):
    model = Sequential()
    model.add(LSTM(units[1], input_shape=(units[0], 1), return_sequences=True))
    model.add(LSTM(units[2]))
    model.add(Dropout(0.2))
    model.add(Dense(units[3], activation='sigmoid'))

    return model

```

## Код програми для навчання нейронної мережі LSTM

```
import sys
import warnings
import argparse
import numpy as np
import pandas as pd
from data.data import process_data
from model import model
from keras.models import Model
def train_model(model, X_train, y_train, name, config):
    model.compile(loss="mse", optimizer="rmsprop", metrics=['mape'])
    hist = model.fit(
        X_train, y_train,
        batch_size=config["batch"],
        epochs=config["epochs"],
        validation_split=0.05)
    model.save('model/' + name + '.h5')
def main(argv):
    lag = 12
    config = {"batch": 512, "epochs": 1}
    file = 'data/mergedzoneLog.csv'
    X_train, y_train, _, _, _ = process_data(file, lag)
    X_train = np.reshape(X_train, (X_train.shape[0], X_train.shape[1], 1))
    m = model.get_lstm([12, 32, 32, 1])
    train_model(m, X_train, y_train, argv.model, config)

if __name__ == '__main__':
    main(sys.argv)
...
```

## ДОДАТОК Б. ОПИС ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СМАРТ-КОНТРАКТІВ У БЛОКЧЕЙНІ ETHEREUM

Таблиця Б.1

Вартість операцій у блокчейні Ethereum при використанні децентралізованих  
додатків

Код операції	Тип операції	Використання Gas
0x00	STOP	0
0x01	ADD	3
0x02	MUL	5
0x03	SUB	3
0x04	DIV	5
0x05	SDIV	5
0x06	MOD	5
0x07	SMOD	5
0x08	ADDMOD	8
0x09	MULMOD	8
0x0a	EXP	$(exp == 0) ? 10 : (10 + 10 * (1 + \log_{256}(exp)))$
0x0b	SIGNEXTEND	5
0x10	LT	3
0x11	GT	3
0x12	SLT	3
0x13	SGT	3
0x14	EQ	3
0x15	ISZERO	3
0x16	AND	3
0x17	OR	3
0x18	XOR	3
0x19	NOT	3

## Продовження таблиці Б.1.

0x1a	BYTE	3
0x20	SHA3	$30 + 6 * (\text{size of input in words})$
0x30	ADDRESS	2
0x31	BALANCE	400
0x32	ORIGIN	2
0x33	CALLER	2
0x34	CALLVALUE	2
0x35	CALLDATALOAD	3
0x36	CALLDATASIZE	2
0x37	CALLDATACOPY	$2 + 3 * (\text{number of words copied, rounded up})$
0x38	CODESIZE	2
0x39	CODECOPY	$2 + 3 * (\text{number of words copied, rounded up})$
0x3a	GASPRICE	2
0x3b	EXTCODESIZE	700
0x3c	EXTCODECOPY	$700 + 3 * (\text{number of words copied, rounded})$
0x40	BLOCKHASH	20
0x42	TIMESTAMP	2
0x43	NUMBER	2
0x44	DIFFICULTY	2
0x45	GASLIMIT	2
0x50	POP	2
0x51	MLOAD	3
0x52	MSTORE	3
0x53	MSTORE8	3
0x54	SLOAD	200
0x55	SSTORE	$((\text{value} \neq 0) \ \&\& \ (\text{storage\_location} == 0)) ?$ 20000 : 5000
0x56	JUMP	8

Продовження таблиці Б.1.

0x57	JUMPI	10
0x58	PC	2
0x59	MSIZE	2
0x5a	GAS	2
0x5b	JUMPDEST	1
0x60 -- 0x7f	PUSH*	3
0x80 -- 0x8f	DUP*	3
0x90 -- 0x9f	SWAP*	3
0xa0	LOG0	$375 + 8 * (\text{number of bytes in log data})$
0xa1	LOG1	$375 + 8 * (\text{number of bytes in log data}) + 375$
0xa2	LOG2	$375 + 8 * (\text{number of bytes in log data}) + 2 * 375$
0xa3	LOG3	$375 + 8 * (\text{number of bytes in log data}) + 3 * 375$
0xa4	LOG4	$375 + 8 * (\text{number of bytes in log data}) + 4 * 375$
0xf0	CREATE	32000
0xf1	CALL	Complex -- see yellow paper Appendix H
0xf2	CALLCODE	Complex -- see yellow paper Appendix H
0xf3	RETURN	0
0xf4	DELEGATECALL	Complex -- see yellow paper Appendix H
0xfe	INVALID	NA
0xff	SELFDESTRUCT	$5000 + ((\text{create\_new\_account}) ? 25000 : 0)$

**Код програмної реалізації смарт-контракту для випадку попереднього резервування радіочастотного ресурсу операторами**

```
pragma solidity >=0.4.22 <0.6.0;
import "./SafeMath.sol";

contract Government{
    address payable wallet;
    uint256 public minBtsDeposit = 10;
    uint256 private maxResourceBlocks = 200;
    mapping(address => uint) btsDeposits;
    uint256 public blocksPlannedFrom;
    uint256 public blocksPlannedUntil;
    address[] public operatorList;
    mapping(address => mapping (uint256 => uint256)) resourceBlocksAvailable ;

    constructor () public {
        wallet=msg.sender;
        blocksPlannedFrom=block.timestamp;
        blocksPlannedUntil = blocksPlannedFrom + 500;
        buildResourceBlocksStructure(blocksPlannedFrom, blocksPlannedUntil);  }

    function registerBTS() public payable {
        require((btsDeposits[msg.sender] + msg.value) >=10 ether, "Your deposit is not high enough");
        btsDeposits[msg.sender] += msg.value;
        operatorList.push(msg.sender);
        buildResourceBlocksStructure(block.timestamp, blocksPlannedUntil, msg.sender);  }

    function unregisterBTS() public {
        msg.sender.transfer(btsDeposits[msg.sender]);
        btsDeposits[msg.sender] = 0;

        for (uint i = 0; i<operatorList.length-1; i++){
            if(operatorList[i]==msg.sender){
                operatorList[i] = operatorList[operatorList.length-1];
                break;          }      }
        delete operatorList[operatorList.length-1];  }

    function isBtsRegistered(address _address) public view returns (bool) {
        if(btsDeposits[_address] >= minBtsDeposit){
            return true;
        }else{
            return false;    }  }
```



```

function leaseResourceblocks(uint256 _resourceBlocks, uint256 _from, uint256
_to) public payable{
    require(isBtsRegistered(msg.sender));
    require(msg.value == getPrice(_resourceBlocks, _to - _from), "Sorry you need
to pay correct price");
    if(_to>blocksPlannedUntil){
        buildResourceBlocksStructure(blocksPlannedUntil+1, _to);    }

    for (uint256 time=_from; time <= _to; time++){
        resourceBlocksAvailable[tx.origin][time] += _resourceBlocks;    } }

function buildResourceBlocksStructure(uint256 _from, uint256 _to) private{
    if(operatorList.length > 0){
        //Build structure for all registered Operators
        for (uint256 operatorIndex= 0; operatorIndex<operatorList.length-1;
operatorIndex++){
            for (uint256 time=_from; time<= _to; time++){
                resourceBlocksAvailable[operatorList[operatorIndex]][time]=0; }
            blocksPlannedUntil=_to;
        } }

    function buildResourceBlocksStructure(uint256 _from, uint256 _to, address
_address) private{
        for (uint256 time=_from; time<= _to; time++){
            resourceBlocksAvailable[_address][time]=0;
        } }

    function getPrice(uint256 _resourceBlocks, uint256 _duration) public pure returns
(uint256){
        return _duration * _resourceBlocks * 1000 wei;
    }

    function isSpectrumAvailable(uint256 _resourceBlocks, uint256 _connectionStart,
uint256 _connectionEnd) public returns (bool){
        if(isBtsRegistered(tx.origin) == false){
            return false;
        }

        if(_connectionEnd>blocksPlannedUntil){
            buildResourceBlocksStructure(blocksPlannedUntil+1, _connectionEnd);
        }

        for (uint256 time=_connectionStart; time <= _connectionEnd; time++){
            if(resourceBlocksAvailable[tx.origin][time] < _resourceBlocks){

```

```

        return false;    }    }
return true; }

function allocateResourceBlocks(uint256 _resourceBlocks, uint256
_connectionStart, uint256 _connectionEnd) public {
    require(isBtsRegistered(tx.origin));

    for (uint256 time=_connectionStart; time <= _connectionEnd; time++){
        resourceBlocksAvailable[tx.origin][time] -= _resourceBlocks;
    } }

function releaseResourceBlocks(uint256 _resourceBlocks, uint256
_connectionStart, uint256 _connectionEnd, address _operatorAddress) public {
    require(isBtsRegistered(tx.origin));
    for (uint256 time=_connectionStart; time <= _connectionEnd; time++){
        resourceBlocksAvailable[_operatorAddress][time] += _resourceBlocks;
    } }

function getGovernmentWalletAddress() public view returns (address payable){
    return wallet; } }

contract ConnectionRequest {
    using SafeMath for uint256;

    struct OperatorsOffer {
        address payable operator;
        uint256 throughput;
        uint256 resourceBlocks;
        uint256 sumPrice;
        uint256 rewardForOperator;
        uint256 rewardForGovernment;
        uint256 spareReward; }

    event OfferProposed(
        address connectionRequestAddress,
        address operator,
        uint256 throughput,
        uint256 resourceBlocks,
        uint256 duration,
        uint256 sumPrice,
        uint256 rewardForOperator,
        uint256 rewardForGovernment,
        uint256 spareReward );

    OperatorsOffer public winningOffer = OperatorsOffer(address(0),0,0,500
ether,500 ether,500 ether,0);

```

```

address public userAddress;
uint256 public throughputDemanded;
uint256 private reward;
uint256 public Xcoordinate;
uint256 public Ycoordinate;
uint256 public connectionStart;
uint256 public connectionEnd;
address payable governmentWallet;
Government government;
bool private spareRewardClaimed = false;
bool private rewardClaimed = false;

```

```

constructor(address payable _governmentAddress, uint256 _throughputDemanded,
uint256 _X, uint256 _Y, uint256 _connectionStart, uint256 _connectionEnd ) public
payable{
    require( (_connectionEnd - _connectionStart) < 86400 , "Only connections with
max size of 24 hours are allowed");
    userAddress=msg.sender;
    throughputDemanded= _throughputDemanded;
    Xcoordinate = _X;
    Ycoordinate= _Y;
    government = Government(_governmentAddress);
    governmentWallet = government.getGovernmentWalletAddress();
    reward=msg.value;

    connectionStart =_connectionStart;
    connectionEnd = _connectionEnd;

    connectionStart= block.timestamp + 60;
    connectionEnd=connectionStart + 60;  }

```

```

function addOffer(uint256 _resourceBlocks, uint256 _throughput, uint256 _price )
public{
    require(government.isBtsRegistered(msg.sender) == true , "You are not
registered as a trusted BTS");
    require(_throughput >= throughputDemanded , "Offered throughput is not high
enough");
    require(government.isSpectrumAvailable(_resourceBlocks, connectionStart,
connectionEnd), "Sorry you do not have resource blocks available");
    uint256 _rewardForGovernment = 0;
    uint256 _rewardForOperator = _price;
    uint256 _sumPrice = _rewardForGovernment + _rewardForOperator;

    require(_sumPrice < reward , "Your price is higher than offered reward");

```

```
require(!_sumPrice < winningOffer.sumPrice) || (_sumPrice ==
winningOffer.sumPrice && _throughput > winningOffer.throughput) , "Your offer is
worse than already existing offer");
```

```
//registerer increses available bandwidth by the ammount of resource blocks
offered by previous operator
```

```
if(winningOffer.operator != address(0)){
    government.releaseResourceBlocks(winningOffer.resourceBlocks,
connectionStart, connectionEnd, winningOffer.operator);    }
```

```
winningOffer = OperatorsOffer(msg.sender, _throughput, _resourceBlocks,
_sumPrice, _rewardForOperator, _rewardForGovernment, reward - _sumPrice);
emit OfferProposed(address(this), winningOffer.operator, _throughput,
_resourceBlocks, connectionEnd - connectionStart, _sumPrice, _rewardForOperator,
_rewardForGovernment, reward - _sumPrice );
```

```
//registerer decreases available bandwidth by the ammount of resource blocks
offered by winning operator
```

```
government.allocateResourceBlocks(winningOffer.resourceBlocks,
connectionStart, connectionEnd);    }
```

```
function claimReward()public payable{
    require(rewardClaimed == false, "Reward was already claimed");
    require(block.timestamp > connectionEnd, "Sorry you you are trying to claim
reward too early");
    winningOffer.operator.transfer(winningOffer.rewardForOperator);
    governmentWallet.transfer(winningOffer.rewardForGovernment);
    rewardClaimed = true;    }
```

```
function claimSpareReward() public{
    require(spareRewardClaimed == false, "Spare reward was already claimed");
    require(msg.sender==userAddress, "You are not authorized user to retain spare
reward");
    require(block.timestamp > connectionStart, "Sorry you you are trying to claim
spare reward too early");
    msg.sender.transfer(winningOffer.spareReward);
    spareRewardClaimed = true;
}}
```

## Код програмної реалізації смарт-контракту для випадку динамічного виділення радіочастотного ресурсу операторам

```
pragma solidity >=0.4.22 <0.6.0;
import "./SafeMath.sol";

contract Government{
    address payable wallet;
    uint256 public minBtsDeposit = 10;
    uint256 private maxResourceBlocks = 200;
    mapping(address => uint) btsDeposits;

    uint256 blocksPlannedUntil;
    mapping(uint256 => uint256) resourceBlocksAvailable ;

    constructor () public {
        wallet=msg.sender;
        uint256 currentTime=block.timestamp;
        buildResourceBlocksStructure(currentTime, currentTime+500);  }

    function buildResourceBlocksStructure(uint256 _from, uint256 _to) private {
        for (uint256 i=_from; i<=_to; i++){
            resourceBlocksAvailable[i]=maxResourceBlocks;
        }
        blocksPlannedUntil=_to;  }

    function registerBTS() public payable {
        require((btsDeposits[msg.sender] + msg.value) >=10 ether, "Your deposit is not
high enough");
        btsDeposits[msg.sender] += msg.value;  }

    function unregisterBTS() public {
        msg.sender.transfer(btsDeposits[msg.sender]);
        btsDeposits[msg.sender] = 0;  }

    function isBtsRegistered(address _address) public view returns (bool) {
        if(btsDeposits[_address] >= minBtsDeposit){
            return true;
        }else{
            return false;  }  }

    function getPrice(uint256 _resourceBlocks, uint256 _duration) public pure returns
(uint256){
        return _duration * _resourceBlocks * 1000 wei;  }
```

```

function isSpectrumAvailable(uint256 _resourceBlocks, uint256 _connectionStart,
uint256 _connectionEnd) public returns (bool){
    if(_connectionEnd>blocksPlannedUntil){
        buildResourceBlocksStructure(blocksPlannedUntil+1, _connectionEnd);

        for (uint256 second=_connectionStart; second<=_connectionEnd; second++){
            if(resourceBlocksAvailable[second] < _resourceBlocks){
                return false;    }    }
        return true;    }

```

```

function allocateResourceBlocks(uint256 _resourceBlocks, uint256
_connectionStart, uint256 _connectionEnd) public {
    require(isBtsRegistered(tx.origin));
    for (uint256 second=_connectionStart; second<=_connectionEnd; second++){
        resourceBlocksAvailable[second]-=_resourceBlocks;    }    }

```

```

function releaseResourceBlocks(uint256 _resourceBlocks, uint256
_connectionStart, uint256 _connectionEnd) public {
    require(isBtsRegistered(tx.origin));
    for (uint256 second=_connectionStart; second<=_connectionEnd; second++){
        resourceBlocksAvailable[second]+=_resourceBlocks;    }    }

```

```

function getGovernmentWalletAddress() public view returns (address payable){
    return wallet;    }}

```

```

contract ConnectionRequest {
    using SafeMath for uint256;

```

```

    struct OperatorsOffer {
        address payable operator;
        uint256 throughput;
        uint256 resourceBlocks;
        uint256 sumPrice;
        uint256 rewardForOperator;
        uint256 rewardForGovernment;
        uint256 spareReward;    }

```

```

    event OfferProposed(
        address connectionRequestAddress,
        address operator,
        uint256 throughput,
        uint256 resourceBlocks,
        uint256 duration,
        uint256 sumPrice,
        uint256 rewardForOperator,

```

```
uint256 rewardForGovernment,  
uint256 spareReward );
```

```
OperatorsOffer public winningOffer = OperatorsOffer(address(0),0,0,500  
ether,500 ether,500 ether,0);
```

```
address public userAddress;  
uint256 public throughputDemanded;  
uint256 private reward;  
uint256 public Xcoordinate;  
uint256 public Ycoordinate;  
uint256 public connectionStart;  
uint256 public connectionEnd;  
address payable governmentWallet;  
Government government;  
bool rewardClaimed = false;  
bool spareRewardClaimed = false;
```

```
constructor(address payable _governmentContractAddress, uint256  
_throughputDemanded, uint256 _X, uint256 _Y, uint256 _connectionStart, uint256  
_connectionEnd ) public payable {  
    require( (_connectionEnd - _connectionStart) < 86400 , "Only connections with  
max size of 24 hours are allowed");  
    userAddress=msg.sender;  
    throughputDemanded= _throughputDemanded;  
    Xcoordinate = _X;  
    Ycoordinate= _Y;  
    government = Government(_governmentContractAddress);  
    governmentWallet = government.getGovernmentWalletAddress();  
    reward=msg.value;
```

```
connectionStart = _connectionStart;  
connectionEnd = _connectionEnd;
```

```
//TODO remove before release For testing purpose, times are set following way  
connectionStart= block.timestamp + 60;  
connectionEnd=connectionStart + 45; }
```

```
function addOffer(uint256 _resourceBlocks, uint256 _throughput) public {  
    require(government.isBtsRegistered(msg.sender) == true , "You are not  
registered as a trusted BTS");  
    require(_throughput >= throughputDemanded , "Offered throughput is not high  
enough");  
    require(block.timestamp < connectionStart, "Connection started already, offer  
can not be accepted");
```

```

    require(government.isSpectrumAvailable(_resourceBlocks, connectionStart,
connectionEnd), "Spectrum is not available");
    uint256 _rewardForGovernment = government.getPrice(_resourceBlocks,
connectionEnd - connectionStart);
    uint256 _rewardForOperator = SafeMath.div(_rewardForGovernment, 10);
    uint256 _sumPrice = _rewardForGovernment + _rewardForOperator;

    require(_sumPrice < reward , "Your price is higher than reward");
    require((_sumPrice < winningOffer.sumPrice) || (_sumPrice ==
winningOffer.sumPrice && _throughput > winningOffer.throughput) , "Your offer is
worse than already existing offer");

    //increases available bandwidth by the ammount of resource blocks offered by
previous operator
    if(winningOffer.operator != address(0)){
        government.releaseResourceBlocks(winningOffer.resourceBlocks,
connectionStart, connectionEnd);    }

    winningOffer = OperatorsOffer(msg.sender, _throughput, _resourceBlocks,
_sumPrice, _rewardForOperator, _rewardForGovernment, reward - _sumPrice);
    emit OfferProposed(address(this), winningOffer.operator, _throughput,
_resourceBlocks, connectionEnd - connectionStart, _sumPrice, _rewardForOperator,
_rewardForGovernment, reward - _sumPrice );
    //decreases available bandwidth by the ammount of resource blocks offered by
winning operator
    government.allocateResourceBlocks(winningOffer.resourceBlocks,
connectionStart, connectionEnd);    }

function claimReward()public payable{
    require(rewardClaimed == false, "Reward was already claimed");
    require(block.timestamp > connectionEnd, "Sorry you you are trying to claim
reward too early");
    winningOffer.operator.transfer(winningOffer.rewardForOperator);
    governmentWallet.transfer(winningOffer.rewardForGovernment);
    rewardClaimed = true;    }

function claimSpareReward() public{
    require(spareRewardClaimed == false, "Spare reward was already claimed");
    require(msg.sender==userAddress, "You are not authorized user to retain spare
reward");
    require(block.timestamp > connectionStart, "Sorry you you are trying to claim
spare reward too early");
    msg.sender.transfer(winningOffer.spareReward);
    spareRewardClaimed = true;    }}

```



## SafeMath (для двох випадків)

```
pragma solidity ^0.5.0;
```

```
function add(uint256 a, uint256 b) internal pure returns (uint256) {  
    uint256 c = a + b;  
    require(c >= a, "SafeMath: addition overflow");
```

```
    return c; }  
function sub(uint256 a, uint256 b) internal pure returns (uint256) {  
    return sub(a, b, "SafeMath: subtraction overflow"); }
```

```
function sub(uint256 a, uint256 b, string memory errorMessage) internal pure  
returns (uint256) {  
    require(b <= a, errorMessage);  
    uint256 c = a - b;  
    return c; }
```

```
function mul(uint256 a, uint256 b) internal pure returns (uint256) {  
    // Gas optimization: this is cheaper than requiring 'a' not being zero, but the  
    // benefit is lost if 'b' is also tested.  
    // See: https://github.com/OpenZeppelin/openzeppelin-contracts/pull/522  
    if (a == 0) {  
        return 0; }  
    uint256 c = a * b;  
    require(c / a == b, "SafeMath: multiplication overflow");  
    return c; }
```

```
function div(uint256 a, uint256 b) internal pure returns (uint256) {  
    return div(a, b, "SafeMath: division by zero"); }
```

```
function div(uint256 a, uint256 b, string memory errorMessage) internal pure  
returns (uint256) {  
    // Solidity only automatically asserts when dividing by 0  
    require(b > 0, errorMessage);  
    uint256 c = a / b;  
    // assert(a == b * c + a % b); // There is no case in which this doesn't hold  
    return c; }
```

```
function mod(uint256 a, uint256 b) internal pure returns (uint256) {  
    return mod(a, b, "SafeMath: modulo by zero"); }
```

```
function mod(uint256 a, uint256 b, string memory errorMessage) internal pure  
returns (uint256) {  
    require(b != 0, errorMessage);  
    return a % b; }}
```

## ДОДАТОК В. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ

“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор Львівської філії  
(керуючої філії Західного  
макрорегіону)

ПАТ «Укртелеком» у м. Львові,  
кандидат технічних наук



Андрухів Т.В.

2020 р.

м. Львів, вул. Дорошенка, 43

### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи **Максимюка Тараса Андрійовича** на тему «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Даний акт складений про те, що в результаті спільних наукових досліджень в галузі розроблення систем управління розподіленою телекомунікаційною інфраструктурою у Львівській філії ПАТ «Укртелеком» були використані запропоновані Максимюком Т.А. методи інтелектуального прогнозування трафіку для підвищення ефективності використання мережних ресурсів при періодичній зміні активності абонентів у мережі.

Підприємство підтверджує працездатність розроблених методів прогнозування трафіку на основі штучного інтелекту для управління транспортними інформаційними потоками. Експериментальне використання розроблених методів прогнозування трафіку для управління інформаційними потоками дало змогу підвищити ефективну пропускну здатність магістральних каналів на 5-15% в залежності від періоду доби та району міста.

Похибка моделювання, розрахована за участю інженерів ПАТ «Укртелеком» по відношенню до фактичних даних складає не більше 5%.

Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Начальник відділу планування мереж

Качан В.М.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"  
Директор  
ТзОВ ВТФ "Контех"  
Смольницький Є.С.  
" 25 " 11 2020 р.



**АКТ**  
про використання результатів докторської дисертаційної роботи  
Максимюка Тараса Андрійовича  
на тему:  
**"Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими  
системами мобільного зв'язку"**

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВТФ "Контех" використані результати докторської дисертаційної роботи Максимюка Т.А. "Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку".  
А саме:

- розроблено та впроваджено алгоритм інтелектуального прогнозування часових характеристик трафіку телекомунікаційної мережі на основі рекурентних нейронних мереж, який дає змогу адаптувати параметри мережної інфраструктури до змінних умов у мережі;
- підтверджено, що використання запропонованого інтелектуального алгоритму дає змогу досягти виграву у ефективності використання мережних ресурсів на 15-50%, в залежності від умов функціонування мережі, забезпечуючи таким чином збільшення кількості абонентів, які одночасно обслуговуються в мережі.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ ВТФ "Контех" відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 5%.

Керівник відділу  
обслуговування мереж



О.Є.Смольницький

"ЗАТВЕРДЖУЮ"  
Директор  
ТзОВ "Телекомунікаційна компанія"  
Пентак І.М.  
"16" 11 2020 р.

**АКТ**

про використання результатів докторської дисертаційної роботи  
докторанта кафедри телекомунікацій

Національного університету "Львівська політехніка"

Максимюка Тараса Андрійовича

на тему:

**"Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими  
системами мобільного зв'язку"**

Даний акт складений про те, що у ТзОВ "Телекомунікаційна компанія" використані результати докторської дисертаційної роботи Максимюка Т.А. "Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку". А саме:

- розроблено та впроваджено систему децентралізованого краудсорсингового моніторингу показників якості обслуговування в телекомунікаційній мережі на основі асинхронних протоколів Інтернету речей, яка дає змогу забезпечити гнучкий процес збору важливої інформації про ефективність функціонування мережної інфраструктури;
- підтверджено, що використання запропонованої системи моніторингу не призводить до значного зростання трафіку в мережі за рахунок адаптивного алгоритму передавання даних в періоди низької інтенсивності навантаження на мережну інфраструктуру, забезпечуючи при цьому статистичну цілісність інформації для подальшого використання аналітичними засобами машинного навчання.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ "Телекомунікаційна компанія", відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 5%.

Головний інженер



І.М. Рубаха



"ЗАТВЕРДЖУЮ"  
Директор  
ТзОВ «МаксіТех»  
Заблоцький С.О.  
" 3 " 12 2020 р.



**АКТ**  
про використання результатів докторської дисертаційної роботи  
Максимюка Тараса Андрійовича  
**«Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими  
системами мобільного зв'язку»**

Даний акт складений про те, що у ТзОВ «МаксіТех» для дослідження способів модернізації інфраструктури корпоративної мережі використані результати дисертаційної роботи Максимюка Т.А. «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, зокрема:

- модель розподіленої телекомунікаційної мережі, яка базується на відокремленні площини аналітики даних, децентралізованої площини управління та площини передавання даних, що дало змогу автоматизовано координувати процес розгортання та використання мережної інфраструктури, на основі методів управління з використанням штучного інтелекту;
- систему децентралізованого краудсорсингового моніторингу характеристик корпоративної мережі, яка працює на основі асинхронних протоколів Інтернету речей, що дало змогу забезпечити гнучкий процес збору даних із статистичною повнотою інформації для аналітичних засобів штучного інтелекту, не створюючи при цьому надлишкове використання мережних та обчислювальних ресурсів;

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ «МаксіТех», відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 3%.

Директор



Заблоцький С.О.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Заступник директора  
ТОВ «ІнформКонсалт»

Матіішин Л.З.

2020 р.



### АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи  
Максимиюка Тараса Андрійовича  
**«Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими  
системами мобільного зв'язку»**

Даний акт складений про те, що у ТОВ «ІнформКонсалт», для підвищення ефективності управління корпоративною мережною інфраструктурою, використані результати дисертаційної роботи Максимиюка Т.А. «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку», представленої на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук, а саме:

- прототип сегменту приватної мережі мобільного зв'язку на основі програмно апаратних платформ NI USRP 2900, які використовуються у якості програмно-конфігурованих базових станцій стандартів LTE (3GPP Release 14), 5G (3GPP Release 16) та Wi-Fi (IEEE 802.11), а також системи управління на основі мікросервісів ядра мереж 4G (vEPC) та 5G (5G Core) в хмарній інфраструктурі;

- алгоритм кешування контенту з використанням обчислювальних ресурсів абонентських пристроїв, який використовує інтелектуальне прогнозування запитів абонента шляхом аналізу його активності у мережі, що забезпечує максимальну якість сприйняття мультимедійного контенту за рахунок зниження затримки доставки та вимог до пропускної здатності радіоканалу в момент його запиту абонентом.

Особливістю впровадженої тестової системи є використання розробленого Максимиюком Т.А. методу інтелектуального прогнозування часових характеристик довільних інформаційних потоків з використанням рекурентних нейронних мереж, який дає змогу приймати більш ефективні рішення з точки зору вибору конфігурації мережної інфраструктури та управління процесом кешування контенту.

Заступник директора



Матіішин Л.З.

«Затверджую»

Проректор з наукової-педагогічної  
роботи  
Національного університету  
«Львівська політехніка»

  
доц. О.Р. Давидчак  
«21» 12 2020 р.



### АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи Максимюка Тараса Андрійовича на тему: «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку».

Даний акт складений комісією у складі:

- д.т.н., Стрихалюка Б.М., директора Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., доц., Кайдана М.В., декана магістратури Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., проф. Климаша М.М., завідувача кафедри телекомунікацій.

проте, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати дисертаційної роботи Максимюка Т.А. «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку», а саме:

- розроблено цикл лекцій та лабораторних робіт з дисципліни «Проектування програмно-апаратних підсистем ІС» для студентів-бакалаврів спеціальності – 126 «Інформаційні системи та технології», в якому вивчаються основні методи та засоби реалізації прикладних застосувань Інтернету речей з використанням хмарних технологій та штучного інтелекту;
- розроблено цикл лекцій та лабораторних робіт для дисципліни «Технології мереж мобільного зв'язку» для студентів-магістрів спеціальності – 172 Телекомунікації та радіотехніка, в якому вивчаються методи управління гетерогенними мережами мобільного зв'язку на основі технологій програмно-конфігурованих мереж мобільного зв'язку та віртуалізації мережних функцій .

Члени комісії:



Стрихалюк Б.М.



Кайдан М.В.



Климаш М.М.



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор ТОВ «Сайпрес  
Семікондактор Україна»

Вільям Карл Салефскі.

«12» КВІТНЯ 2021 р.  
79034, м. Львів, вул. Луганська, 20

### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи **Максимюка Тараса Андрійовича** на тему «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Даний акт складений про те, що в результаті спільних наукових досліджень в галузі розроблення методів позиціонування осіб на основі безпроводних мереж у ТОВ «Сайпрес Семікондактор Україна» були використані наукові та практичні результати дисертаційної роботи Максимюка Т.А. Зокрема:

- в рамках R&D проєкту “Wi-Fi/Bluetooth-based precise (1-10cm) indoor localization of person/items” використано алгоритм моделювання мобільності абонентів на основі генеративно-змагальних нейронних мереж, що дало змогу підвищити точність оцінювання статистичних характеристик переміщення абонентів з урахуванням їх індивідуальних атрибутів та інфраструктури середовища;
- в рамках R&D проєкту “AI-based Approach for Antenna Optimization and Performance Prediction” використано модифікований алгоритм глибокого навчання з підкріпленням з використанням генеративно-змагальних нейронних мереж, що дало змогу адаптивно вибирати конфігурацію фазованих антенних решіток для забезпечення їх квазі-оптимального функціонування в залежності від поточних умов середовища.

Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Керівник R&D проєктів



к.т.н. Олександр Карпін



“ЗАТВЕРДЖУЮ”

Директор ТОВ «Кінетікс»

 Плетньов Олексій

«29» 11 2020 р.  
79000, м. Львів, вул. Поповича 3/3а

### АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи **Максимюка Тараса Андрійовича** на тему «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку» на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Даний акт складений про те, що в результаті спільних наукових досліджень в напрямку розроблення розподілених реєстрів на основі технології блокчейн у ТОВ «Кінетікс» були використані наукові та практичні результати дисертаційної роботи Максимюка Т.А.

Зокрема:

- модель токенизації мережних ресурсів на основі стандарту ERC 721, яка дає змогу оцифрувати реальні активи для їх подальшого обміну шляхом фінансових транзакцій у мережі блокчейн;
- децентралізовану блокчейн-платформу для управління смарт-контрактами, яка дає змогу реалізувати процес торгівлі токенизованими активами з використанням фінансових транзакцій у мережі блокчейн.

Підприємство підтверджує, що результати дисертації Максимюка Т.А. не є предметом комерційних угод, і використані лише з дослідницькою метою. Акт складений для пред'явлення до спеціалізованої вченої ради із захисту дисертацій і не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор

 Олексій Плетньов  


«Затверджую»

Проректор з наукової роботи  
Національного університету  
«Львівська політехніка»

д.т.н. І.В. Демидов

« 2020 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи Максимюка Тараса Андрійовича на тему: «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку».

Комісія у складі начальника науково-дослідної частини, к.т.н., Небесного Р.В., заступника начальника планово-фінансового відділу Чулой Т.М., завідувача кафедри телекомунікацій, д.т.н., проф. Климаша М.М., склала цей акт у тому, що у держбюджетних науково-дослідних роботах: «Методи побудови та моделі інформаційно-телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN-технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN), (№ держреєстрації 0115U000444, (2015-2016 рр.) – учасник); «Методи побудови гетерогенних інформаційно-комунікаційних систем для розгортання програмно-конфігурованих мереж 5G подвійного використання» (ДБ/5G), (№ держреєстрації 0117U004449, (2017–2018 рр.) – виконавець); «Розроблення методів адаптивного управління радіочастотним ресурсом у мережах мобільного зв'язку LTE-U для розвитку стандартів 4G/5G в Україні» (ДБ/LTE-U), (№ держреєстрації 0117U007177, (2018–2019 рр.) – керівник); «Розроблення новітньої децентралізованої мережі мобільного зв'язку на основі блокчейн-архітектури та штучного інтелекту для впровадження технологій 5G/6G в Україні» (ДБ/Блокчейн), (№ держреєстрації 0120U100674, (2020-2022 рр.) – керівник); «Розроблення та інтеграція інформаційних і комунікаційних технологій для побудови системи моніторингу та управління міською інфраструктурою» (ДБ/ІВН), (№ держреєстрації 0120U102193, (2020-2022 рр.) – виконавець) використані наступні результати дисертаційної роботи Максимюка Тараса Андрійовича «Інтелектуальне автоматизоване управління децентралізованими системами мобільного зв'язку»:

- мульти-площинна модель децентралізованої мережі мобільного зв'язку;
- система краудсорсингового моніторингу мережі мобільного зв'язку;
- метод адаптивного вибору оператора мобільного зв'язку в режимі реального часу;
- методи децентралізованого інтелектуального синтезу мережі мобільного зв'язку;
- моделі спільного використання радіочастотного ресурсу;
- методи інтелектуального управління ресурсами в телекомунікаційних мережах;
- метод інтелектуального управління інформаційними потоками в оптичній транспортній інфраструктурі;
- прототипи мереж мобільного зв'язку з використанням програмно-конфігурованих базових станцій та хмарної інфраструктури.

Перелічені моделі, методи та системи дають змогу реалізувати децентралізовану систему мобільного зв'язку з інтелектуальним автоматизованим управлінням.

Члени комісії:

 Небесний Р.В.

 Чулой Т.В./

 Климаш М.М.

## ДОДАТОК Г. СПИСОК ПРАЦЬ ЗДОБУВАЧА

### Монографії:

1. М. М. Климаш, Т. А. Максимюк, М. І. Бешлей. Методи та моделі побудови гетерогенних мереж мобільного зв'язку 4G/5G — Львів: Видавництво «Львівської політехніки», 2020 – 388 с.

### Патенти:

2. Патент України на корисну модель UA 127803 U, H04J 13/00, Спосіб просторово-часового блочного кодування багатоантенних систем /М.М. Климаш, В.О. Пелішок, Т.А Максимюк – № u201801658; заявл. 19.02.2018; опубл. 27.08.2018. – Бюл. № 16/2018.

### Статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних Scopus/Web of Science:

3. D. Araújo, T. Maksymyuk, A. Almeida, T. Maciel, J. Mota, M. Jo, “Massive MIMO: survey and future research topics,” *IET Communications*, vol. 10, no. 15, pp. 1938-1946, 2016.
4. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Jo, “Clustering hypervisors to minimize failures in mobile cloud computing,” *Wireless Communications and Mobile Computing*, vol. 16, no. 18, pp. 3455-3465, 2016.
5. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, “Comprehensive spectrum management for heterogeneous networks in LTE-U,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 6, pp. 8-15, 2016.
6. J. Gazda, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, T. Maksymyuk, M. Jo, “Unsupervised learning algorithm for intelligent coverage planning and performance optimization of multitier heterogeneous network,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 39807-39819, 2018.
7. B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo, “Probabilistic recovery of incomplete sensed data in IoT,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 2282-2292, 2018.

8. L.Han, T. Maksymyuk, X. Bao, J. Zhao, Y. Liu, "Deep learning based loss recovery mechanism for video streaming over mobile information-centric network," *KSII Transactions on Internet & Information Systems*, vol. 13, no.9, 2019.
9. T. Maksymyuk, E. Šlapak, G. Bugár, D. Horváth, J. Gazda, "Intelligent framework for radio access network design," *Wireless Networks*, vol.26, pp. 759–774, Nov. 2019.
- 10.D. Horváth, J. Gazda, E. Šlapak, T. Maksymyuk, "Modeling and analysis of self-organizing UAV-assisted mobile networks with dynamic on-demand deployment," *Entropy*, vol. 21, no. 11, article 1077, pp. 1-26, 2019.
- 11.G. Bugár, M. Vološin, T. Maksymyuk, J. Zausinová, V. Gazda, D. Horváth, J. Gazda, "Techno-economic framework for dynamic operator selection in a multi-tier heterogeneous network," *Ad Hoc Networks*, vol. 97, pp. 102007, Feb. 2020.
- 12.Y. Liu, W. Hu, L. Han, T. Maksymyuk, Z. Chen. "A fast filling algorithm for image restoration based on contour parity," *CMC-Computers, Materials & Continua*, vol. 63, no. 1, pp. 509–519, 2020.
- 13.M. Khan, M. Jamali, T. Maksymyuk, J. Gazda, "A blockchain token-based trading model for secondary spectrum markets in future generation mobile networks," *Wireless Communications and Mobile Computing*, article 7975393, 2020.
- 14.T. Maksymyuk J. Gazda, M. Volosin, G. Bugar, D. Horvath, M. Klymash, M. Dohler, "Blockchain-empowered framework for decentralized network management in 6G," *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 9, pp. 86-92, Sep. 2020.

**Статті у закордонних періодичних виданнях, що входять до інших міжнародних наукометричних баз:**

- 15.T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk, "Study and development of next-generation optical networks," *Smart Computing Review*, vol. 4, no. 6, pp. 470-480, 2014.

- 16.Т. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy, “Designing the new backhaul for 5G heterogeneous network based on converged optical infrastructure,” *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 17, no. 4, pp. 9-13, 2017.
- 17.Т. Maksymyuk, V. Andrushchak, S. Dumych, B. Shubyn, G. Bugar, J. Gazda, “Blockchain-based network functions virtualization for 5G network slicing,” *Acta Electrotechnica et Informatica*, vol. 20, no. 4, pp. 54-59, 2020.

**Статті у фахових періодичних виданнях України:**

- 18.О.І. Сиротинський, І.С. Беляєв, Т.А. Максимюк, М.І. Олексін, “Захист інформаційних систем від мережеских DDOS атак на основі Марківської моделі поведінки ботнету”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №738, С. 192-197, 2012.
- 19.Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, В.З. Пашкевич, “Модель акустооптичного комутатора для повністю оптичних телекомунікаційних систем”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №766, С. 90-95, 2013.
- 20.М.М. Климаш, О.В. Красько, Т.А. Максимюк, “Метод спектрально-часового мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу”, *Вісник ДонНТУ*, №2(27), С. 71-79, 2014.
- 21.М.В. Кайдан, С.С. Думич, Т.А. Максимюк, Р.А. Бурачок, Л.М. Готра, “Розрахунок параметрів якості обслуговування у фотонних транспортних мережах”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №796, С. 147-156, 2014.
- 22.С.С. Думич, Д.С. Жуковська, Т.А. Максимюк, “Дослідження процесу агрегації трафіку в оптичних транспортних мережах з комутацією блоків”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №818, С. 130-136, 2015.

23. А.П. Бондарев, І.П. Максимів, Т.А. Максимюк, “Метод підвищення енергетичної ефективності HQPSK сигналів”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», №849, С. 18-22, 2016.
24. М.В. Кайдан, М.І. Бешлей, Т.А. Максимюк, Б.М. Стрихалюк, “Теорія кернера та фазові переходи для потоків у телекомунікаційних мережах”, *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія «Радіоелектроніка та телекомунікації», № 909, С. 29–34, 2018.
25. Т.А. Максимюк, С.С. Думич, М.В. Брич, О.М. Яремко, “Метод адаптивного використання неліцензійних радіочастотних ресурсів операторами мереж LTE”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки, том 29(68), № 2, С. 58-63, 2018.
26. Т.А. Максимюк, О.В. Красько, С.С. Думич, О.М. Яремко, А.М. Варенко, “Метод мультиплексування інформаційних потоків у пасивній оптичній мережі з інтеграцією фіксованого та мобільного доступу”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки, том 29(68), № 3, С. 59-65, 2018.
27. В.С. Андрущак, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, С.С. Думич, Ю.В. Пиріг, “Інтелектуальне управління інформаційними потоками в оптичних транспортних мережах”, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(64), С. 4-16, 2019.
28. Т.А. Максимюк, Б.П. Шубин, Д.О. Мисаковець, В.С. Андрущак, С.С. Думич, “Метод адаптивного логічного розділення мережі 5G на основі глибокого навчання”, *Вчені записки Таврійського Національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки, том 31(70), № 5, С. 36-42, 2020.
29. Т.А. Максимюк, Б.П. Шубин, В.С. Андрущак, С.С. Думич, М.М. Климаш, “Метод інтелектуального управління контентом у мережах мобільного зв’язку”, *Телекомунікаційні та інформаційні технології*, № 3(68), С. 15-26, 2020.

**Статті у інших періодичних виданнях:**

- 30.Максимюк Т. А., Шубин Б. П, Андрущак В. С., Бешлей Г. В., Думич С. С., Климаш М. М., «Практична реалізація програмно-конфігурованої мережі 5G на основі технологій Cloud-RAN та SDR», *Вісник Університету «Україна»*, №1 (24), С. 23-34, 2020.

**Публікації у матеріалах конференцій, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:**

- 31.S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko and P. Guskov, "The virtual channel parameters calculation in all-optical network," *IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, p. 88.
- 32.O. Yaremko and T. Maksymyuk, "Power control method in multiuser cellular networks," *IEEE International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM)*, Feb. 2013, Polyana-Svalyava, Ukraine, pp. 386-387.
- 33.S. Dumych, P. Guskov, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Simulation of characteristics of optical burst switched networks," *IEEE International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo)*, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 492-493.
- 34.T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Increasing of energy efficiency of a cognitive radio network," *IEEE International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology" (CriMiCo)*, Sevastopol, Ukraine, Sep. 2013, pp. 277-278.
- 35.T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko and M. Jo, "Software defined optical switching for cloud computing transport systems," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2015, Bali, Indonesia, article #46.
- 36.B. Fekade, T. Maksymyuk and M. Jo, "A virtual server qos enhancement method in cloud computing," *ACM International Conference on Ubiquitous Information*



- Management and Communication (IMCOM)*, Jan. 2016, Da Nang, Vietnam, article #81.
- 37.T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo, "Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 953-956.
- 38.A. Bondarev, I. Maksymiv and T. Maksymyuk, "Method of improving the power efficiency of QPSK signals," *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET)*, Feb. 2016, Slavske, Ukraine, pp. 253-255.
- 39.M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley, "State of the art and further development of information and communication systems," *IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 1-6.
- 40.T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash and M. Jo, "Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed and unlicensed spectrum for multi-operator 5G hetnet," *IEEE International Conference on Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo)*, Sep. 2016, Kyiv, Ukraine, pp. 315-318.
- 41.T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria and M. Jo, "An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks," *ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication*, Jan. 2017, Beppu, Japan, article #105.
- 42.T. Maksymyuk, M. Brych, M. Klymash and M. Jo, "Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 197-200.
- 43.M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko and T. Maksymyuk, "Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (AICT)*, July, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 209-212



44. T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Klymash, M. Jo, R. Romaniuk, A. Kotyra, A. Zhanpeisova, A. Kozbekova, "Opportunistic tri-band carrier aggregation in licensed spectrum for multi-operator 5G hetnet," *Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, vol.10445, Wilga, Poland, Aug. 2017, article #5T.
45. T. Maksymyuk, M. Brych, Yu. Klymash, M. Kyryk and M. Klymash, "Game theoretical framework for multi-operator spectrum sharing in 5G heterogeneous networks," *IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2017, Kharkiv, Ukraine, pp. 515-518.
46. J. Gazda, M. Volosin, E. Slapak, P. Drotar and T. Maksymyuk, "Frequency spectrum distribution dynamics: Evidence from an agent-based experimental economy mode," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1123-1126.
47. T. Maksymyuk, M. Beshley, O. Petrenko, M. Klymash and Yu. Matsevityi, "Eavesdropping-resilient wireless communication system based on modified OFDM/QAM air interface," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1127-1130.
48. H. Beshley, T. Maksymyuk, M. Beshley and I. Strykhalyuk, "Method of centralized resource allocation in virtualized small cells network with IoT overlay," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1147-1151.
49. V. Andrushchak, S. Dumych, T. Maksymyuk, M. Kaidan and O. Urikova, "Intelligent data flows management for performance improvement of optical label switched network," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2018, Slavske, Ukraine, pp. 1143-1146.

- 50.V. Andrushchak, T. Maksymyuk, D. Ageyev and M. Klymash, "Development of the ibeacon's positioning algorithm for indoor scenarios," *IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications Science and Technology (PIC S&T)*, Oct. 2018, Kharkiv, Ukraine, pp. 741-744.
- 51.T. Maksymyuk, J. Gazda, A. Luntovskyy and M. Klymash, "Artificial intelligence based 5G coverage design and optimization using deep generative adversarial neural networks," *IEEE International Conference on Information and Communications Technologies and Radio Electronics (UkrMiCo)*, Sep. 2018, Odessa, Ukraine, pp.1-4.
- 52.J. Zausinová, J. Gazda and T. Maksymyuk, "Real-time spectrum secondary markets: Agent-based model of investment activities of heterogeneous operators," *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, Prague, April, 2018, pp. 1-6.
- 53.M. Klymash, T. Maksymyuk, S. Dumych and O. Yaremko, "Designing the industrial and environmental monitoring system based on the Internet of Things architecture," *IEEE International Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 187-190
- 54.T. Maksymyuk, J. Gazda, O. Yaremko and D. Nevinskiy, "Deep learning based massive MIMO beamforming for 5G mobile network," *IEEE International Symposium on Wireless Systems Within the IEEE International Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2018, Lviv, Ukraine, pp. 241-244
- 55.E. Šlapak, J. Gazda, D. Horváth, G. Bugár, M. Vološin and T. Maksymyuk, "HetNet spatial topology design using mini-batch K-means clustering," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779242
- 56.T. Maksymyuk, L. Han, S. Larionov, B. Shubyn, A. Luntovskyy and M. Klymash, "Intelligent spectrum management in 5G mobile networks based on

- recurrent neural networks," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779301
- 57.T. Maksymyuk, J. Gazda, L. Han and M. Jo, "Blockchain-based intelligent network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 36-39.
- 58.B. Shubyn, T. Maksymyuk, "Intelligent handover management in 5G mobile networks based on recurrent neural networks," *IEEE International Conference on Advanced Information and Communications Technologies (AICT)*, Lviv, Ukraine, 2019, pp. 348-351.
- 59.V. Andrushchak, M. Kaidan, S. Dumych, Y. Pyrih and T. Maksymyuk, "Research on the scalability of all-optical switches in the OLS networks," *IEEE International Conference The Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM)*, Feb. 2019, Polyana, Ukraine, DOI: 10.1109/CADSM.2019.8779310
- 60.T. Rosa, M. Kaidan, J. Gazda, P. Bykovyy, G. Sapozhnyk and T. Maksymyuk, "Scalable QAM modulation for physical layer security of wireless networks," *IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS)*, Sep. 2019, Metz, France, pp. 1095-1098.
- 61.E. Šlapak, J. Gazda, G. Bugár and T. Maksymyuk, "Review of cellular radio network cell placement design, from traditional to artificial intelligence based approaches," *IEEE International Symposium ELMAR*, Sep. 2019, Zadar, Croatia, pp. 93-96.
- 62.V. Andrushchak, M. Kaidan, T. Maksymyuk and M. Klymash, "Smart payload management in edge nodes of optical label switching networks," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Dec. 2019, Kyiv, Ukraine, pp. 175-178.

63. M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "Realistic user mobility simulator for 5G communication networks," *IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI)*, May, 2019 Timisoara, Romania, pp. 263-268.
64. T. Maksymyuk, J. Gazda, M. Ružička, E. Slapak, G. Bugar and L. Han, "Deep learning based mobile network management for 5G and beyond," *IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Feb. 2020, Lviv-Slavske, Ukraine, pp. 890-893.
65. M. Ružička, M. Vološin, J. Gazda and T. Maksymyuk, "The extension of existing end-user mobility dataset based on generative adversarial networks," *IEEE International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, April, 2020, Bratislava, Slovakia.
66. I. V. Yatskiv, S. Kulyna, P. Bykovyy, T. Maksymyuk and A. Sachenko, "Method of reliable data storage based on redundant residue number system," *IEEE International Symposium on Smart and Wireless Systems within the Conferences on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems (IDAACS-SWS)*, Sep. 2020, Dortmund.

**Публікації у матеріалах конференцій, що не входять до міжнародних наукометричних баз даних:**

67. O. Krasko, P. Guskov, T. Maksymyuk, "Advanced Multi-Wavelength Data Transmission Method for Optical Access Networks", *Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії, Матеріали Міжнародної конференції TCSET'2014, присвяченої 170-річчю заснування Національного університету "Львівська політехніка", 25.02-1.03 2014, Львів-Славське-Львів, 2014, С. 518–520.*
68. M. Kaidan, V. Andrushchak, T. Maksymyuk, M. Beshley, M. Klymash, "Energy efficiency acoustic Devices using 3D-analysis of Electromechanical Coupling," *1st International conference on innovative materials and nanoengineering,*

- IMNE 2019 : conference program and book of abstracts*, Brenna, Poland, August 27–29, 2019, pp. 2–14.
69. Jo. M., Maksymyuk T., Pelishok V, “Quasi Quadrature Modulation Method for Power Efficient Transmission Over LTE Networks”, *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013» (СПТЕЛ – 2013)*, Львів 30 жовтня – 2 листопада 2013, С. 27–32.
70. М. М. Клиماش, М. В. Кайдан, Т. А. Максимюк, О. М. Шпур, Ю. В. Пиріг, “Генетичні алгоритми як універсальний метод розв'язання задач великої розмірності”, *Наукоємні технології в інфокомунікаціях: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції НІСТ'2019*, Харків - Кам'янець-Подільський, Україна, 23–25 травня 2019 р., С. 26–30.
71. П. О. Гуськов, С. С. Думич, Т. А. Максимюк, “Дослідження методів агрегації інформаційних потоків в крайовому вузлі мережі з комутацією блоків”, *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013» (СПТЕЛ – 2013)*, Львів 30 жовтня – 2 листопада 2013, С. 215–220.
72. І. П. Лісовий, Т. А. Максимюк, Р. З. Козловський, “Метод динамічної перебудови частотно-часових каналів мережі GSM”, *Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013» (СПТЕЛ – 2013)*, Львів 30 жовтня – 2 листопада 2013. – 2013. – С. 157–160.
73. А. П. Бондарев, І. П. Максимів, Т. А. Максимюк, “Метод підвищення енергетичної ефективності HQPSK сигналів,” *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: тези доповідей VIII Міжнародної науково-практичної конференції*, 21–23 вересня 2016 р., м. Запоріжжя, 2016, С. 94–96.
74. Т. Максимюк, О. Холявка, Я. Москва, “Вибір ефективних формуючих функцій для синтезу OFDM сигналу з оптимальними локалізаційними

- характеристиками”, *Науково-методична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2011”*, 27-30 жовтня 2011 р., Львів, С.33-36.
- 75.В. Пелішок, Т. Максимюк, М. Климаш, “Метод підвищення ефективності синтезу антенних систем радіозв’язку з нестаціонарним каналом,” *19-а науково-практична конференція "Проблеми створення, розвитку та застосування інформаційних систем спеціального призначення*, Житомир, 2012.
- 76.Т. Максимюк, В. Пелішок, “Метод формування ортогонального сигналу з ефективною локалізацією енергії в частотно-часовій області”, *VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології»*, Лівадія, 2012.
- 77.Б. Стрихалюк, М. Кайдан, С. Думич, Т. Максимюк, “Модель оптичного комутатора для систем зі спектральним ущільненням каналів,” *VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології»*, Лівадія, 2012.
- 78.Т. А. Максимюк, С. С. Думич, О. В. Холявка, П. О. Гуськов, “Методика розрахунку ймовірності блокування у повністю оптичних телекомунікаційних системах”, *Науково-методична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2012”*, 1-4 листопада 2012 р., Львів, С.45-47.
- 79.Т. А. Максимюк, С. С. Думич, М. Я. Шеремета, “Конвергенція інформаційних систем радіозв’язку ближнього поля на основі платформи Android”, *Науково-методична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2012”*, 1-4 листопада 2012 р., Львів, С.91-92.
- 80.Б. М. Стрихалюк, С. С. Думич, М. В. Кайдан, Т. А. Максимюк, “Повнозв’язний оптичний комутатор для оптичних систем зі спектральним ущільненням каналів”, *Науково-методична конференція „Сучасні проблеми*

*телекомунікацій та підготовка фахівців – 2012*”, 1-4 листопада 2012 р., Львів, С.66-67.

81. М. М. Климаш, М. В. Кайдан, Т. А. Максимюк, “Підвищення ефективності оптичних транспортних систем за рахунок акустооптичних взаємодій у фотонних кристалах”, *VI Міжнародний науково-технічний симпозиум “Нові технології в телекомунікаціях”*, ДУІКТ, Вишків, 2013, С. 143-146.
82. М. М. Климаш, І. С. Беляєв, Т. А. Максимюк, “Модель забезпечення захисту інформаційної системи на основі виявлення аномалій в мережевому трафіку”, *VI Міжнародний науково-технічний симпозиум “Нові технології в телекомунікаціях”*, ДУІКТ, Вишків, 2013, С. 71-74.
83. О. М. Яремко, Т. А. Максимюк, Р. І. Лукомський, “Модель просторово-часової локалізації абонентського навантаження в мережах мобільного зв’язку”, *17-й Міжнародний радіоелектронний форум «Радіоелектроніка і молодь в XXI столітті»*, 22-24 квітня, ХНУРЕ, 2013.
84. Б. М. Стрихалюк, С. С. Думич, М. В. Кайдан, Т. А. Максимюк, “Алгоритм маршрутизації довжин хвиль в повністю оптичній транспортній мережі”, *VI Міжнародний науково-технічний симпозиум “Нові технології в телекомунікаціях”*, ДУІКТ, Вишків, 2013, С. 103-106.
85. S. Dumych, T. Maksymyuk, P. Guskov, “Simulation of burst aggregation and signalling schemes for optical burst switched networks,” *Комп’ютерні науки та інженерія : матеріали VI Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2013*, 21–23 листопада 2013 року, Видавництво Львівської політехніки, 2013. – С. 40-41.
86. A. Luntovskyy, B. Shubyn, T. Maksymyuk, M. Klymash, “5G networks deployment and service modeling,” *Інфокомунікації – сучасність та майбутнє : матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, присвяченої сторіччю Одеської національної академії зв’язку ім. О. С. Попова*, 2020, С. 251–254.