

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**КРАСЬКО ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА**

УДК 621.391

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ  
ФУНКЦІОНУВАННЯ КОНВЕРГЕНТНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ  
ДОСТУПУ**

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

05 «Технічні науки»  
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

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

\_\_\_\_\_ /О.В. Красько/

**Науковий керівник:**

Климаш Михайло Миколайович  
доктор технічних наук, професор

*Ідентичність всіх примірників дисертації*

**ЗАСВІДЧУЮ:**

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради*

**Л.В. Демидов**

**Львів – 2018**

## АНОТАЦІЯ

*Красько О.В.* Методи та алгоритми підвищення ефективності функціонування конвергентних оптичних мереж доступу. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 – Телекомунікації та радіотехніка) – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2018.

Дисертація присвячена вирішенню актуального наукового завдання розроблення моделей, методів та алгоритмів передавання інформаційних потоків у конвергентних оптичних мережах з інтеграцію сегментів мобільного та фіксованого доступу в умовах нестаціонарної інтенсивності трафіку та змінних вимог до параметрів якості передавання даних.

У першому розділі здійснено аналітичний огляд літературних джерел за темою дисертації для визначення вимог до конвергентних оптичних мереж доступу нового покоління. На підставі аналізу останніх релевантних робіт та існуючих концепцій розвитку оптичних мереж доступу встановлено, що основним обмеженням з точки зору продуктивності оптичної мережної інфраструктури є складність розподілу інформаційних потоків між різними сегментами мережі фіксованого доступу, а також мережами мобільного зв'язку. Це, в свою чергу, потребує створення нових моделей розподілу ресурсів та балансування трафіку, які б враховували нестаціонарність інтенсивності навантаження при конвергенції оптичного та мобільного сегментів мережі. В рамках проблематики, що розглядається у дисертаційній роботі, необхідно виділити сукупність першочергових взаємопов'язаних завдань, розв'язання яких, у комплексі, дасть змогу підвищити ефективність функціонування конвергентних оптичних мереж доступу в умовах нестаціонарної інтенсивності трафіку та змінних вимог до параметрів якості передавання даних.

Другий розділ роботи присвячено детальному дослідженню процесів передавання та розподілу інформаційних потоків у конвергентних оптичних мережах доступу. Перехід оптичних мереж до парадигми IP over DWDM

стимулював розвиток оптичних мереж доступу нового покоління, які підтримують конвергенцію різнотипних сегментів мережі доступу.

Показано, що повний перехід транспортних мереж на технології пакетної комутації у поєднанні із розвитком мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого поколінь призводить до повної конвергенції мереж доступу до технологій пакетної комутації, усуваючи таким чином усі вузькі місця на переходах між сегментами пакетної та каналної комутації.

У третьому розділі дисертації проведено моделювання ефективності функціонування запропонованих методів та алгоритмів. Проаналізовано статистичні закономірності пакетів за розміром, а також за протоколами мережного, транспортного та прикладного рівнів.

Проведено моделювання характеристик трафіку в гетерогенних мережах мобільного зв'язку з однією макрокоміркою та різною кількістю мікрокомірок. Результати моделювання показують, що при високих значеннях спектральної ефективності радіоканалів мережі мобільного зв'язку вимоги до пропускної здатності опорної транспортної мережі перевищують максимально можливе значення пропускної здатності одного ресурсного блоку конвергентної оптичної мережі доступу (79.62624 Гбіт/с).

З результатів моделювання ефективності розробленого алгоритму мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки, визначено, що розроблений алгоритм дає змогу підвищити коефіцієнт використання пропускної здатності пасивної оптичної мережі до 5% у низхідному каналі та до 15% у висхідному каналі в залежності від поточної інтенсивності трафіку.

У розділі також проведено моделювання для дослідження ефективності запропонованого алгоритму реалізації хендоверу в мережах мобільного зв'язку з використанням групування інформаційних потоків. Результати моделювання показали, що при використанні звичайного алгоритму хендоверу, надлишковий трафік в конвергентній мережі доступу складає від 3 до 12 Гбіт/с. Використання запропонованого алгоритму дає змогу знизити обсяг надлишкового трафіку до

1-3 Гбіт/с, водночас збільшивши пропускну здатність для корисного трафіку на 5-10 Гбіт/с.

Четвертий розділ роботи присвячено актуальним практичним аспектам реалізації сучасних конвергентних мереж доступу. Вперше запропоновано модель віртуалізації мережних функцій для конвергентної мережі з інтеграцією сегментів фіксованого та безпроводного доступу. Особливістю даної моделі є те, що вона дає змогу контролювати процес розподілу інформаційних потоків одночасно у сегментах фіксованого доступу, опорних транспортних мережах та мережах радіодоступу. Для спрощення процесу управління ресурсами в конвергентних мережах зі складною топологічною структурою запропоновано конвергентну платформу на основі програмно-конфігурованих мереж, яка використовує еластичну архітектуру оптичних телекомунікаційних мереж з гнучкими налаштуваннями для комутації, мультиплексування та адаптивного розподілу інформаційних потоків в залежності від програмної конфігурації на стороні контролера. Окрім того, дана платформа дає змогу здійснювати віртуалізацію ядра мережі мобільного зв'язку, за рахунок чого забезпечується наскрізне керування процесом передавання інформаційних потоків від кінцевих мобільних користувачів до віддалених дата-центрів та глобальної мережі Інтернет. Запропоновано архітектуру для побудови конвергентних мереж доступу наступного покоління, яка має на меті ефективно підтримувати велику різноманітність послуг, які очікуються в рамках концепцій 5G та Інтернету речей.

Віртуалізація ресурсів у запропонованій конвергентній мережі доступу здійснюється на основі високопродуктивних обчислювальних кластерів, які будуються на основі розподілених центрів оброблення даних. Для наскрізного контролю за процесом передавання та розподілу інформаційних потоків запропоновано алгоритми програмного управління ресурсами на основі технології SDN (Software Defined Networks). Концепція запропонованого рішення базується на чотирьох окремих компонентах гетерогенної інформаційно-комунікаційної інфраструктури, які поєднуються у глобальну

систему: центри обробки даних, конвергентні оптичні мережі доступу та сегменти «останньої милі» на основі фіксованих або мобільних мереж зв'язку.

*Ключові слова:* пасивні оптичні мережі, конвергентні мережі доступу, адаптивне управління ресурсами, програмно-керовані мережі.

Список публікацій здобувача:

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

1. Maksymyuk T. Study and Development of Next-Generation Optical Networks / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk // Smart Computing Review. - 2014. – Vol. 4. - №6. - pp. 470-480.
2. Климаш М.М. Метод спектрально-часового мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу / М.М. Климаш, О.В. Красько, Т.А. Максимюк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 2(27). - Донецьк: ДонНТУ, 2014. - С. 71-79. (<http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/27329>)
3. Красько О.В. Аналіз параметрів оптичного сигналу в повністю оптичній мережі з комутацією за довжинами хвиль / О.В. Красько, І.В. Демидов, М.В. Брич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації - № 796 – Львів. – 2014. - С. 140-146.
4. Красько О.В. Оцінка параметрів мережі на етапі проектування оптичної транспортної системи / О.В. Красько // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації - №766 – Львів. – 2013. - С. 102-108
5. Maksymyuk T..Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure /T. Maksymyuk, O.Krasko, M.Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy // Acta Electrotechnica et Informatica,- 2017 - Vol. 17 - no. 4 -pp. 9-13.
6. Красько О.В. Розрахунок параметрів якості транспортних мереж / О.В. Красько, О.В. Корецький // Вісник Національного університету

«Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації- №705.-Львів-2011.– С.184-189.

*Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:*

7. Romanchuk V. Development the Methods of Conversion to Photonic Transport Networks / V.Romanchuk, O.Krasko, O.Koretsky//Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Proceedings of the XIth International Conference TCSET'2012, Lviv – Slavske, Ukraine February 21–24, 2012, - p. 258-258
8. Dumych S. The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network / S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko, P. Guskov // Досвід, розробка і застосування САПР в мікроелектроніці: матеріали XII міжнародної конференції CADSM 2013, 19-23 лютого 2013, Поляна, Україна / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – Р. 88.
9. Krasko O. Advanced Multi-Wavelength Data Transmission Method for Optical Access Networks /O. Krasko, P. Guskov, T. Maksymyuk // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії TCSET'2016: матеріали XIII Міжнародної конференції, 2014, Львів, Славське, Україна / Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. с. 518-520.
10. Maksymyuk T. Software Defined Optical Switching for Cloud Computing Transport Systems / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Jo // ACM IMCOM 2015: Proceedings (January 8–10, 2015, Bali, Indonesia). – 2015. – Р. 42.
11. Krasko O. Data flows transmission models in converged optical access networks. / O. Krasko, M. Klymash, O. Lavriv // Problems of Infocommunications. Science and Technology – 2015 IEEE Second International Scientific-Practical Conference (Kharkiv, October 13-15, 2015). – 2015. – Р. 65–68.
12. Krasko O. Wavelength rearrangement and load balancing algorithm for OWTDMA-PON network / O. Krasko // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії TCSET'2016: матеріали XIII Міжнародної конференції, 23-26 лютого 2016, Львів, Славське, Україна /

Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016.-с.950-952.

13.Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk, M. Klymash // Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології: Матеріали 3-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 4-6 жовтня 2016 р.). – 2016. – Р. 33–35.

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

15.Krasko O. Network Functions Virtualization for Flexible Deployment of Converged Optical-Wireless Access Infrastructure / O. Krasko, H. Al-Zayadi, V. Pashkevych, H. Kopets, B. Humeniuk // IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET'2018, Lviv – Slavske, Ukraine February 20–23, 2018. - paper #425.

16.Романчук В.І. Перехід до фотонних мереж. / В.І. Романчук, О.В. Красько // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011» СПТЕЛ – 2011, Львів 27-30 жовтня 2011. – Львів – 2011. С. 37 – 39.

17.Романчук В.І. Дослідження ефективності динамічних методів маршрутизації на транспортній мережі / В.І. Романчук, О.В. Корецький, О.В. Красько, О.І. Сиротинський // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2010» СПТЕЛ – 2010, Львів 28-31 жовтня 2010. – Львів – 2010 – С. 22 – 25.

18.Красько О.В. Дослідження часових параметрів якості у фотонних транспортних системах. / О.В. Красько, О.В. Корецький // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій» , Київ, 16-19 квітня 2013 р. –Київ, 2013. – С. 113–115.

19. Krasko O. Effectiveness of Virtual Concatenation Algorithms for Next Generation SDH/SONET Networks / O. Krasko // Computer Science and Engineering 2013: Proceedings of the 6th International Academic Conference of Young Scientists (CSE-2013), Lviv, 21–23 November. – 2013. – P. 38–39.
20. Красько О.В. Аналіз ефективності побудови фотонних транспортних мереж. / О.В. Красько // Матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2011. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 236-237.
21. Красько О. В. Визначення ефективності використання механізмів конкатенації для мереж NG SDH блоків / О. В. Красько // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013» СПТЕЛ – 2013, Львів 30 жовтня – 2 листопада 2013. – Львів –2013. – С. 227–232.
22. Красько О.В. Адаптація смуги пропускання в мережах NG-SDH/WDM / О.В. Красько, О.А. Лаврів, О.І. Сиротинський // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014”. Львів 30 жовтня – 2 листопада 2014. – Львів – 2014. – С. 201 – 205.
23. Красько О.В. Методика розрахунку затримки в оптичних мережах з комутацією блоків. / О.В. Красько // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2010» СПТЕЛ – 2010, Львів 28-31 жовтня 2010. – Львів – 2010 – С. 31– 33.
24. Krasko O.V. Dynamic Bandwidth Allocation for 5G Optical Backhaul Networks with Wavelength Division Multiplexing / O.V. Krasko, M.V. Brych, A. Al-Anssari, N. Qasim // International Scientific-Practical Conference (I International Symposium) "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication," November 9-11, 2017, Chernivtsi, Ukraine. – P. 110-111.



## **ABSTRACT**

*Krasko O.V.* Methods and algorithms for increasing the efficiency of convergent optical access networks. – On the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Candidate of Engineering Science (PhD) on specialty 05.12.02 “Telecommunication systems and networks” - Lviv Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

This thesis is devoted to solving the actual scientific problem - developing models, methods and algorithms for the information flows transmission in converged optical networks for segments integration in conditions of nonstationary traffic intensity and variable requirements for data transmission quality parameters.

In first section, was conducted an analytical review of literary sources on the thesis topic to determine the requirements for new generation of convergent optical access networks. Based on the recent relevant works analysis and existing optical access networks development concepts, it has been established that the main optical network infrastructure performance limitation is the complexity of the information flows distribution between different segments in fixed access networks and mobile communication networks. This, in turn, requires the creation new resource allocation and traffic balancing models, that consider the unsteadiness of the load intensity in the optical and mobile network segments convergence. Within the problem framework considered in the thesis, it is necessary to allocate a set of priority interconnected tasks, which complex solution will enable to increase the converged optic access networks operation efficiency in conditions of nonstationary traffic intensity and variable requirements for the data transmission parameters quality.

The second section is devoted to the detailed investigation of the information flows transmission and distribution processes in converged optical access networks. The optical networks transition to the IP over DWDM paradigm has stimulated the new generation optical networks development that support the different access network segments types convergence.

It is shown that the complete transport networks transition to packet switching technology coupled with the fourth and fifth generation mobile communications

networks development results in the full access networks convergence to packet switching technologies, thus eliminating all bottlenecks at transitions between packet and channel segments switching

In the third section of the thesis, was conducted the efficiency simulation of the proposed methods and algorithms. The statistical patterns of packets by size, transport and application network level protocols are analyzed.

Traffic characteristics simulation in heterogeneous mobile networks with one macrocell and different number of microcells has been carried out. The simulation results show that at high values of radio channel spectral efficiency in mobile network, the requirements for the throughput of the reference transport network exceed the maximum possible bandwidth one resource block value in the converged optical access network (79.62624 Gbit/s).

From the results of modeling the developed algorithm effectiveness for useful and service traffic multiplexing into spectral-time resource blocks, it has been determined that the developed algorithm allows to increase the passive optical network bandwidth utilization rate to 5% in the downlink and up to 15% in the uplink, depending on the current traffic intensity.

In this section also carried out modeling to research the proposed algorithm effectiveness for the handover implementation in mobile networks using the information flows grouping. The simulation results showed that when using the conventional handover algorithm, surplus traffic in the converged access network is between 3 and 12 Gb/s. Using the proposed algorithm allows to reduce the surplus traffic amount to 1-3 Gbit/s, while increasing the bandwidth for useful traffic by 5-10 Gbit/s

The fourth section is devoted to actual practical aspects in modern convergent access networks implementation. The network functions virtualization model for a converged network with the fixed and wireless access segments integration, was first time proposed. This model feature is simultaneously information flows distribution process control in fixed access segments, reference transport networks and radio access networks. To facilitate the resource management process in convergent networks with complex topological structure, a converged platform based on

software-configured networks is proposed, which uses an elastic architecture of optical telecommunication networks with flexible settings for switching, multiplexing and adaptive information flows distribution depending on the software configuration on the controller side. In addition, this platform allows the core network virtualization, which provides continuous flow management from end users to remote datacenters and the global Internet. The architecture for constructing next-generation convergent networks is proposed, which aims to effectively support the wide variety of services expected in the framework of the 5G concepts and the Internet of Things.

The resources virtualization in the proposed converged access network is based on high-performance computing clusters that are built on the basis of distributed data centers. For the control over the information flows transmission and distribution process, algorithms for software resource management based on SDN technology (Software Defined Networks) are proposed. The proposed solution concept is based on four separate components of the heterogeneous information and communication infrastructure that are integrated into the global system: data centers, converged optical access networks, and the "last mile" segments based on fixed or mobile communication networks.

*Key words:* passive optical networks, convergent access networks, adaptive resource management, software-managed networks.

The list of author's publications:

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

1. Maksymyuk T. Study and Development of Next-Generation Optical Networks / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk // Smart Computing Review. - 2014. – Vol. 4. - №6. - pp. 470-480.
2. Klymash M. Method of spectral-time multiplexing of information flows in optical networks of access / M.Klymash, O.Krasko, T.Maksymyuk // Scientific works of Donetsk National Technical University. Series:Computing and Automation. Issue 2 (27). - Donetsk: DonNTU, 2014. - pp. 71-79. (<http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/27329>)

3. Krasko O. Analysis of optical signal parameters in a fully optical network with wavelength switching / O. Krasko, I. Demidov, M. Brich // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" Radioelectronics and Telecommunications - No. 796 - Lviv– 2014. - pp. 140-146.
4. Krasko O. Estimation of network parameters at the design stage of the optical transport system / O.Krasko // The Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" Radioelectronics and Telecommunications - No. 766 - Lviv. - 2013. - pp. 102-108.
5. Maksymyuk T. Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure /T.Maksymyuk, O.Krasko, M.Kyryk, V.Romanchuk, R.Kolodiy // Acta Electrotechnica et Informatica- 2017- Vol.17- no.4 -pp. 9-13.
6. Krasko O. Calculation of quality parameters of transport networks / O. Krasko, O. Koretsky // Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic" Radio Electronics and Telecommunications - No. 705.- Lviv -2011. - pp.184-189.

*Proceedings that certify an approvement of thesis:*

7. Romanchuk V. Development the Methods of Conversion to Photonic Transport Networks. / V. Romanchuk, O. Krasko, O. Koretsky. // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Proceedings of the XIth International Conference TCSET'2012, Lviv – Slavske, Ukraine February 21–24, 2012, - pp. 258-258.
8. Dumych S. The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network / S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko, P. Guskov // Experience, Development and Application of CAD in Microelectronics: Materials of the XII International Conference CADSM 2013, February 19-23, 2013, Polyana, Ukraine / National University of Lviv Polytechnic. - Lviv, 2013. - p. 88.
9. Krasko O. Advanced Multi-Wavelength Data Transmission Method for Optical Access Networks /O. Krasko, P. Guskov, T. Maksymyuk // Modern Problems of Radio Electronics, Telecommunications, Computer Engineering TCSET'2016: Materials of the XIII International Conference, 2014, Lviv, Slavske, Ukraine /

Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv Polytechnic National University.  
- Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2014. pp. 518-520.

10. Maksymyuk T. Software Defined Optical Switching for Cloud Computing Transport Systems / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Jo // ACM IMCOM 2015: Proceedings (January 8–10, 2015, Bali, Indonesia). – 2015. – p. 42.

11. Krasko O. Data flows transmission models in converged optical access networks. / O. Krasko, M. Klymash, O. Lavriv // Problems of Infocommunications. Science and Technology – 2015 IEEE Second International Scientific-Practical Conference (Kharkiv, October 13-15, 2015). – 2015. – pp. 65–68.

12. Krasko O. Wavelength rearrangement and load balancing algorithm for OWTDMA-PON network / O. Krasko // Modern problems of radio electronics, telecommunications, computer engineering TCSET'2016: materials of the XIII International Conference, February 23-26, 2016, Lviv, Slavske, Ukraine / Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv Polytechnic National University. - Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2016. - pp. 950-952.

13. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O.Krasko, M.Brych, A.Masyuk, M. Klymash // Problems of infocommunications. Science and Technology: Materials of the 3rd International Scientific and Practical Conference (Kharkiv, October 4-6, 2016). - 2016. - P. 33-35.

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

15. Krasko O. Network Functions Virtualization for Flexible Deployment of Converged Optical-Wireless Access Infrastructure / O. Krasko, H. Al-Zayadi, V. Pashkevych, H. Kopets, B. Humeniuk // IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET'2018, Lviv – Slavske, Ukraine February 20–23, 2018. - paper #425.

16. Romanchuk V. Transition to photonic networks. / V. Romanchuk, O. Krasko, // Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Modern

Problems of Telecommunications and Training of Specialists in the Field of Telecommunications - 2011" SPTTEL - 2011, Lviv, October 27-30, 2011. - Lviv - 2011. pp. 37 - 39.

17. Romanchuk V. Investigation of the Efficiency of Dynamic Routing Methods on the Transport Network / V. Romanchuk, O. Koretsky, O. Krasko, O. Syrotynsky // Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Telecommunications and Training of Specialists in the Field of Telecommunications - 2010" SPTTEL - 2010, Lviv, October 28-31, 2010. - Lviv - 2010 - pp. 22-25.

18. Krasko O. Investigation of time parameters of quality in photonic transport systems. / O. Krasko, O. Koretsky // Materials of the international scientific and technical conference "Problems of telecommunications", Kyiv, April 16-19, 2013. - Kyiv, 2013. - pp. 113-115.

19. Krasko O. Effectiveness of Virtual Concatenation Algorithms for Next Generation SDH/SONET Networks / O. Krasko // Computer Science and Engineering 2013: Proceedings of the 6th International Academic Conference of Young Scientists (CSE-2013), Lviv, 21–23 November. – 2013. – pp. 38–39.

20. Krasko O. Analysis of the efficiency of building photonic transport networks. / O.V. Kraskov // Materials of the 5th International Conference of Young Scientists CSE-2011. - Lviv: Lviv Polytechnic Publishing House, 2011. - pp. 236-237.

21. Krasko O. Definition of efficiency of use of concatenation mechanisms for networks NG SDH blocks / O. Krasko // Materials of the All-Ukrainian scientific and practical conference "Modern problems of telecommunications and training of specialists in the field of telecommunications - 2013" SPTTEL - 2013, Lviv, October 30 - November 2, 2013. - Lviv - 2013. - pp. 227-232.

22. Krasko O. Adaptation of bandwidth in networks NG-SDH / WDM / O.Krasko, O.Lavriv, O.Syrotinsky // Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Telecommunications and Training of Specialists in the Field of Telecommunications - 2014". Lviv October 30 - November 2, 2014 - Lviv - 2014. - pp. 201 - 205.

23. Krasko O. Method of calculation of delay in optical networks with switching blocks / O. Krasko//Materials of the All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Modern Problems of Telecommunications and Training of Specialists in the Field of Telecommunications-2010" SPTTEL-2010, Lviv, October 28-31,2010.- Lviv- 2010-pp.31-33.

24. Krasko O. Dynamic Bandwidth Allocation for 5G Optical Backhaul Networks with Wavelength Division Multiplexing / O.V. Krasko, M.V. Brych, A. Al-Anssari, N. Qasim // International Scientific-Practical Conference (I International Symposium) "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication," November 9-11, 2017, Chernivtsi, Ukraine. – pp. 110-111.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	19
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ТА МОДЕЛЕЙ КОНВЕРГЕНЦІЇ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ З ПАКЕТНОЮ КОМУТАЦІЄЮ .....	26
1.1. Тенденції зростання трафіку в сучасних телекомунікаційних мережах доступу .....	26
1.2. Аналіз сучасних тенденцій конвергенції телекомунікаційних мереж.....	28
1.3. Розвиток оптичних мереж зі спектральним ущільненням каналів.....	31
1.4. Аналіз алгоритмів динамічного резервування ресурсів у пасивних оптичних мережах доступу .....	40
1.5. Висновки до 1-го розділу .....	43
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В КОНВЕРГЕНТНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ ДОСТУПУ .....	44
2.1. Архітектура та основні функціональні елементи конвергентних оптичних мереж доступу .....	44
2.1.1. Модель розподілу каналних ресурсів пасивної оптичної мережі у низхідному напрямку передавання .....	46
2.1.2. Модель розподілу каналних ресурсів пасивної оптичної мережі у висхідному напрямку передавання .....	48
2.2. Удосконалений метод розподілу каналних ресурсів у пасивній оптичній мережі доступу .....	49
2.3. Алгоритм мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки .....	55
2.4. Модель конвергенції фіксованих та мобільних мереж доступу .....	57
2.5. Методи розподілу пропускної здатності в конвергентних оптичних мережах доступу.....	59
2.5.1. Методи розподілу пропускної здатності в реальному масштабі часу ....	59
2.5.2. Методи розподілу пропускної здатності в нереальному масштабі часу	61



2.5.3. Модель трафіку опорної транспортної мережі для гетерогенних систем мобільного зв'язку .....	64
2.5.4. Метод балансування трафіку між сегментами мережі доступу з урахуванням їх взаємозв'язності .....	67
2.5.5. Алгоритм групування потоків опорної транспортної мережі при здійсненні хендоверу в мережі мобільного зв'язку .....	68
2.6. Висновки до 2-го розділу .....	69

### РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАВАННЯ ПАКЕТНОГО ТРАФІКУ В КОНВЕРГЕНТНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ ДОСТУПУ..... 71

3.1. Дослідження статистичних характеристик трафіку мережі мобільного зв'язку за допомогою мережних аналізаторів.....	71
3.1.1. Дослідження статистичних характеристик трафіку в мережі мобільного зв'язку для веб-сервісів .....	72
3.1.2. Дослідження статистичних характеристик трафіку в мережі мобільного зв'язку для сервісів потокового відео .....	78
3.1.3. Дослідження статистичних характеристик трафіку в мережі мобільного зв'язку для сервісів IP-телефонії .....	83
3.2. Моделювання статистичних характеристик агрегованого трафіку в опорній мережі мобільного зв'язку.....	92
3.3. Моделювання запропонованого алгоритму мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки .....	97
3.4. Моделювання трафіку в ультраціільних гетерогенних мережах мобільного зв'язку 5G.....	98
3.5. Моделювання запропонованого методу балансування трафіку між сегментами мережі доступу з урахуванням їх взаємозв'язності.....	102
3.6. Висновки до 3-го розділу .....	104

### РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-КЕРОВАНОЇ КОНВЕРГЕНТНОЇ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ БЕЗПРОВІДНОГО ЗВ'ЯЗКУ ..... 106

4.1. Інфраструктура конвергентної оптичної мережі доступу .....	106
4.1.1. Методи розгортання окремих сегментів оптичної мережі доступу .....	107
4.1.2. Методи групування ресурсів у конвергентних оптичних мережах доступу .....	109
4.2. Інтеграція оптичних та безпроводних мереж доступу в єдину конвергентну мережу .....	110
4.3. Інтеграція централізованих мереж C-RAN в конвергентну мережу доступу	112
4.4. Модель віртуалізації ресурсів конвергентної програмно-конфігурованої оптичної мережі доступу .....	115
4.5. Практична реалізація конвергентної оптичної мережі доступу з віртуалізацією мережних функцій.....	120
4.5.1. Розподіл ресурсів оптичної інфраструктури у конвергентній мережі доступу .....	121
4.5.2. Управління ресурсами для забезпечення гарантованих показників ефективності конвергентної мережі доступу .....	123
4.5.3. Забезпечення гарантованих показників ефективності при мобільності кінцевих користувачів .....	125
4.6. Висновки до 4-го розділу .....	126
ВИСНОВКИ.....	127
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	130
ДОДАТОК 1. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ .....	148
ДОДАТОК 2. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ .....	151

## ВСТУП

Розвиток нових мультимедійних послуг, зростання якості контенту, розвиток концепції хмарних обчислень, а також стрімкий розвиток інформаційних технологій генерує все більше трафіку в телекомунікаційних мережах. Розвиток мережі високошвидкісного доступу до Інтернету в Україні віднесено до основних пріоритетів державної стратегії розвитку інформаційного суспільства. Причому, в останні роки спостерігається тенденція до зростання частки трафіку мобільних користувачів у мережі Інтернет, що зумовлено стрімким розвитком мереж 4G та 5G. Зокрема, мережі мобільного зв'язку будуть мати у тисячу раз вищу швидкість ніж існуючі мережі 4G, що призведе до суттєвого зростання трафіку в оптичних мережах доступу. Тому, багато досліджень спрямовані на розроблення нових методів передавання даних для оптичних мереж доступу, які б дали змогу забезпечувати необхідну пропускну здатність в залежності від поточних вимог абонентського навантаження.

Найефективнішим методом підвищення пропускну здатності оптичних мереж доступу є використання технології спектрального ущільнення каналів. Проте, в умовах флуктуаційного характеру трафіку сучасних мереж із пакетною комутацією, виникає проблема низької ефективності використання пропускну здатності каналів. Ця проблема пов'язана із високою мобільністю абонентів мобільного зв'язку і, як наслідок, частих змін навантаження у комірках, а також із періодичною зміною навантаження у фіксованих мережах доступу. Тому, сучасні конвергентні оптичні мережі доступу потребують нових методів передавання пакетного трафіку в оптичних транспортних мережах, які б враховували динаміку зміни вимог до пропускну здатності каналів та часові статистичні залежності інтенсивності навантаження у сегментах мобільного та фіксованого доступу.

Проблематика підвищення ефективності передавання пакетного трафіку в оптичних мережах доступу широко висвітлена у роботах провідних

українських та зарубіжних учених, серед яких: Ільченко М.Ю., Климаш М.М., Лісовий І.П., Агеєв Д.В., Бондаренко О.В., Манько О.О, Убайдуллаєв Р.Р., Петренко І.І, Mukherjee B., Kramer G., Lee C., Shin D. та багато інших.

Проте, досі нерозв'язаними залишаються завдання динамічного розподілу пропускної здатності оптичних мереж доступу в умовах флуктуаційного характеру трафіку, інтеграції мереж фіксованого та мобільного доступу на основі єдиної конвергентної архітектури, ефективного планування оптичної мережі доступу з урахуванням часових статистичних залежностей інтенсивності навантаження, а також програмно-керованих алгоритмів балансування навантаження в конвергентній мережі доступу.

Таким чином, ефективне використання пропускної здатності каналів зв'язку в конвергентних оптичних мережах доступу в умовах флуктуацій інтенсивності пакетного трафіку є невирішеним на сьогодні протиріччям у світовій та українській науці. Тому актуальним є наукове завдання розроблення моделей, методів та алгоритмів передавання інформаційних потоків у конвергентних оптичних мережах з інтеграцію сегментів мобільного та фіксованого доступу в умовах нестационарної інтенсивності трафіку та змінних вимог до параметрів якості передавання даних.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Тематика дисертаційних досліджень відповідає науковому напрямку кафедри телекомунікацій Національного університету «Львівська політехніка» - «Інфокомунікаційні системи та мережі». Дисертаційна робота виконана в межах держбюджетних науково-дослідних робіт: «Підвищення ефективності оптичних мереж доступу з використанням кодового мультиплексування каналів» (ДБ/Доступ), (2009 – 2010 рр.), № держреєстрації 0109U001147; «Дослідження та розроблення телекомунікаційних мережних систем для застосувань телематики та телеметрії» (ДБ/КОМ), (2011-2012 рр.), № держреєстрації 0111U001223; «Моделі та структури конвергентних телекомунікаційних мереж на основі Cloud – технологій» (ДБ/CLOUD), (2013–

2014 рр.), № держреєстрації 0113U003184; «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 та госпдоговірної науково-дослідної роботи № 0439 «Розробка та проектування міських ділянок ВОЛЗ (волоконно-оптичних ліній зв'язку) з подальшим використанням їх для будівництва міської WIMAX мережі та надання послуги Internet для абонентів», які виконувались за участі здобувача у Національному університеті «Львівська політехніка».

**Мета і завдання дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності використання пропускної здатності конвергентних оптичних мереж з інтеграцією фіксованого та мобільного доступу в умовах нестационарної інтенсивності трафіку та змінних вимог до параметрів якості передавання даних.

В межах дисертаційних досліджень сформульовано та розв'язано такі завдання, як:

1. Аналіз стану та тенденцій розвитку конвергентних оптичних мереж доступу для визначення основних факторів, які обмежують їх ефективність.
2. Удосконалення моделей розподілу ресурсів на каналному рівні пасивних оптичних мереж доступу зі спектральним ущільненням для підвищення ефективності використання пропускної здатності у висхідному та низхідному каналах.
3. Розроблення моделі конвергенції мереж фіксованого та мобільного доступу для підвищення ефективності процесу управління інформаційними

потоками та розподілу пропускної здатності між різними сегментами мережі доступу.

4. Розроблення методів балансування трафіку в оптичних мережах доступу, які б враховували зміну інтенсивності навантаження в конвергентних мережах з інтеграцією фіксованого та мобільного доступу.

5. Розроблення удосконалених моделей віртуалізації для програмно-конфігурованих мереж доступу, які б враховували конвергенцію оптичного та мобільного сегментів цих мереж.

6. Моделювання та дослідження показників ефективності функціонування конвергентної оптичної мережі доступу із використанням запропонованих методів, моделей та алгоритмів.

**Об'єктом дослідження** в дисертації є процес передавання та розподілу інформаційних потоків у конвергентних оптичних мережах доступу.

**Предметом дослідження** є показники ефективності процесу передавання інформаційних потоків у оптичних мережах доступу.

**Методи дослідження.** В процесі досліджень використано основи теорії волоконно-оптичного зв'язку, теорії ймовірності та математичної статистики, теорію телетрафіку, методи аналітичного та імітаційного моделювання.

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

1. Вперше запропоновано модель конвергенції фіксованих та мобільних мереж доступу, яка, на відміну від існуючих, враховує періодичність зміни абонентського трафіку в комірках мереж мобільного зв'язку, що дало змогу підвищити ефективність використання пропускної здатності оптичних каналів зв'язку в конвергентній мережній інфраструктурі.

2. Вперше запропоновано метод балансування трафіку між окремими сегментами мережі доступу, який, на відміну від існуючих, враховує взаємозалежності інтенсивності навантаження в окремих сегментах мережі, що дало змогу підвищити сумарну ефективність використання пропускної здатності у конвергентній оптичній мережі доступу.

3. Набула подальшого розвитку модель віртуалізації мережних функцій шляхом застосування адаптивного планування та розподілу ресурсів з програмним управлінням конвергентною інфраструктурою мережі доступу, що дало змогу підвищити сумарну пропускну здатність мережі мобільного зв'язку з одночасним підвищенням ефективності використання оптичних каналів передавання даних.

4. Удосконалено метод розподілу каналних ресурсів у пасивних оптичних мережах доступу зі спектральним ущільненням каналів шляхом групування спектрально-часових ресурсних блоків для абонентської та службової інформації, що дало змогу підвищити ефективність використання пропускну здатності мережі за рахунок адаптації процесів передавання службового трафіку.

**Практичне значення отриманих результатів** полягає у можливості їх безпосереднього застосування для підвищення ефективності існуючих та перспективних конвергентних оптичних мереж доступу. А саме:

1. Розроблено алгоритм мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки, який дає змогу підвищити коефіцієнт використання пропускну здатності пасивної оптичної мережі до 5% у низхідному каналі та до 15% у висхідному каналі в залежності від поточної інтенсивності трафіку.

2. Розроблено алгоритм групування інформаційних потоків комірок мобільного зв'язку при здійсненні хендоверу, який дає змогу знизити обсяг службового трафіку в конвергентній мережі доступу до 20 % в залежності від поточного рівня мобільності абонентів.

3. Запропоновано алгоритм агрегації ресурсних блоків в конвергентній оптичній мережі доступу, який дає можливість у періоди пікового навантаження підвищувати пропускну здатність для сегменту або комірки до 160, 240 або 320 Гбіт/с при агрегації 2, 3 або 4 ресурсних блоків, відповідно.

4. Запропоновано архітектуру конвергентної мережі доступу з інтеграцією сегментів фіксованого та мобільного зв'язку, яка дає змогу мультиплексувати сигнали мережі радіодоступу в межах спектрально-часових ресурсних блоків за технологією пасивних оптичних мереж доступу.

**Особистий внесок здобувача.** Усі наукові результати, подані у дисертації одержані здобувачем особисто. У працях опублікованих у співавторстві авторові належать: у роботах [1, 10, 16] – модель розподілу каналних ресурсів у пасивних оптичних мережах доступу; [2, 9, 14] – методи мультиплексування корисного та службового трафіку в оптичних мережах; [3,6,7,8,17,18,22] – розроблення імітаційних моделей для дослідження мережі; [5, 11, 13, 24] – модель конвергенції фіксованих та мобільних мереж доступу; [8] – реалізація програмного керування вузлами оптичної мережі доступу на основі SDN, [15] – модель віртуалізації мережних функцій в конвергентній мережі доступу.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати наукових досліджень доповідалися та обговорені на всеукраїнських та міжнародних науково-технічних конференціях: «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій» (м. Львів, 2010-2014), «Computer Science & Engineering» (м. Львів, 2011, 2013), «Проблеми телекомунікацій» (Київ, 2013), «IEEE Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (м. Львів-Славсько, 2012, 2014, 2016), ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (Bali, Indonesia, 2015), IEEE International Scientific-Practical Conference on Problems of infocommunications science and technology (м Харків, 2015, 2016), «IEEE Conference on Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» (сmt. Поляна-Свалява, 2013), IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies (м. Львів, 2017), "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication" (м. Чернівці, 2017), «International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering», (м.



Львів-Славсько, 2018). Також результати роботи обговорені на засіданнях та наукових семінарах кафедри телекомунікацій.

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 24 наукові праці, серед них: статей у періодичних фахових виданнях – 6 [1-6], з них в журналах, що включені до міжнародних наукометричних баз – 5, у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 18 [7-24].

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і 2 додатків. Загальний обсяг роботи становить 153 сторінки друкарського тексту, в тому числі 7 сторінок вступу, 101 сторінку основного тексту, 63 рисунки, 5 таблиць, список використаних джерел зі 158 найменувань, 2 додатки.

# **РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ТА МОДЕЛЕЙ КОНВЕРГЕНЦІЇ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ З ПАКЕТНОЮ КОМУТАЦІЄЮ**

## **1.1. Тенденції зростання трафіку в сучасних телекомунікаційних мережах доступу**

Невпинний розвиток інформаційних та телекомунікаційних технологій стимулює розроблення значної кількості нових послуг, зниження їх вартості та відповідне стрімке зростання кількості користувачів. Як стверджують аналітики компанії Cisco, кількість користувачів Інтернет на сьогоднішній день вже становить понад 20 мільйонів, при чому до 2020 року очікується, що дана кількість зросте вдвічі. Це призведе до зростання річних обсягів трафіку до понад 2 зеттабайтів на рік [25-29]. Відповідно, інформаційно-комунікаційні технології поступово впроваджуються в усі сфери життя та відіграють значну роль у ефективному економічному розвитку України та покращенні якості життя громадян. Як показує приклад програм розвитку провідних країн світу, використання інформаційно-комунікаційних технологій у різних сферах економіки та державного управління значно підвищує темпи економічного та соціального розвитку. Тому, важливим завданням є модернізація телекомунікаційної інфраструктури з врахуванням можливого її використання з для забезпечення інформаційно-комунікаційних послуг загального, відомчого та спеціального використання. Саме тому, необхідно розробити нові наукові та методологічні засади, а також практичні рекомендації та рішення щодо побудови та удосконалення інформаційно-комунікаційної інфраструктури в масштабах держави.

Як показано на рис. 1.1. загальнодержавна інформаційно-комунікаційна система потребує ефективної інтеграції оптичних транспортних систем, оптичних мереж доступу, мереж мобільного зв'язку та центрів обробки даних,

які в комплексі дають змогу передавати великі обсяги абонентського трафіку як загального так і спеціального призначення [30-33].

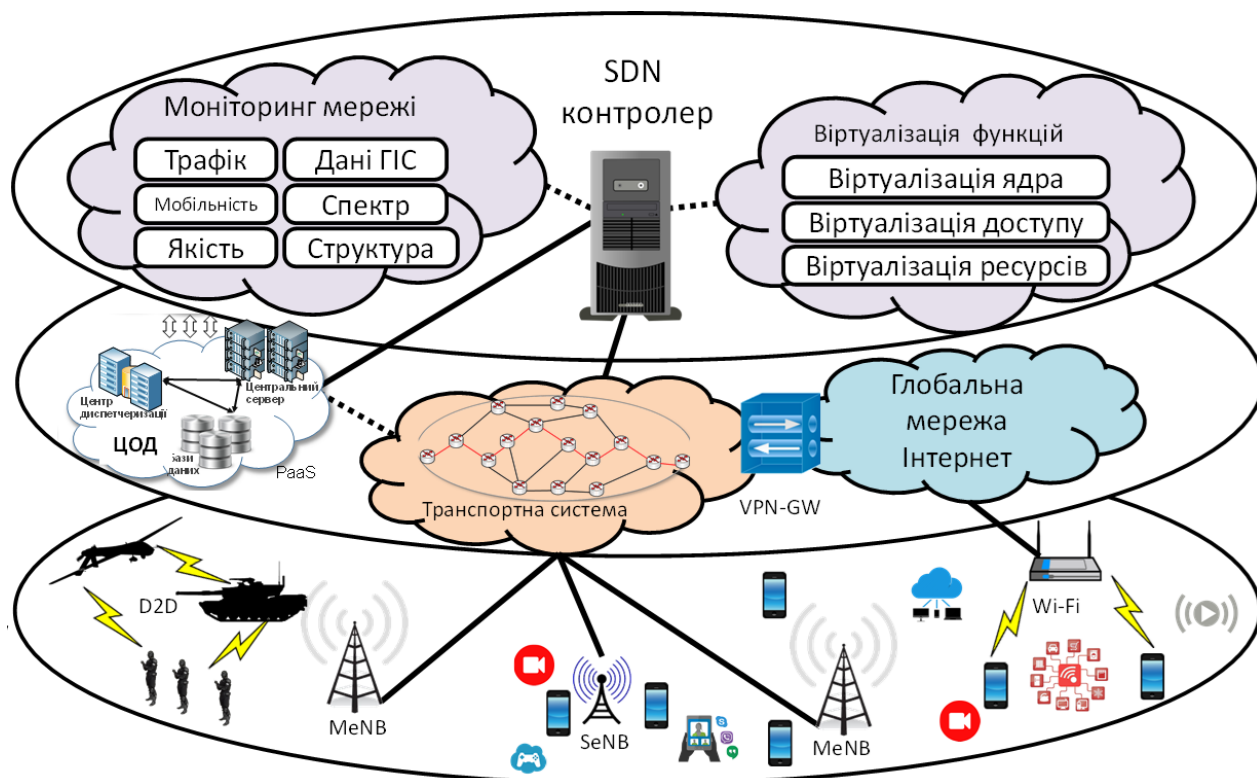


Рис.1.1. Інформаційно-телекомунікаційна система державного масштабу з інтеграцією окремих мереж доступу.

В рамках стратегії розвитку інформаційного суспільства, затвердженого Кабінетом Міністрів України розпорядженням № 386 від 15.07.2013, зазначено, що значним фактором стримування розвитку електронних сервісів державного управління в Україні є низькі показники розповсюдження Інтернету та його невелика швидкість, що особливо відчутно у сегменті мобільного зв'язку. Тому, серед основних пріоритетів формування сучасної інформаційної інфраструктури є забезпечення швидкого та доступного за вартістю Інтернету по всій території України. Значна увага в даній концепції приділяється сегментам мобільного зв'язку, ефективна модернізація якого наразі активно здійснюється шляхом побудови нових мереж четвертого покоління. В подальшому, очікується розгортання мереж мобільного зв'язку п'ятого

покоління (5G) та також розвитком систем Інтернет речей, Індустрія 4.0 та елементів електронного урядування [34-36].

Як стверджують прогнози ряду компаній, мережі мобільного зв'язку 5G повинні забезпечувати у 1000 разів більшу загальну пропускну, ніж поточні мережі стандарту LTE. Це, в свою чергу, неодмінно спричинить зростання трафіку у відповідних транспортних сегментах оптичних мереж доступу [37-34]. Саме тому, сучасні дослідження переважно мають на меті розробити нові методи передавання та мультиплексування інформаційних потоків як у оптичних транспортних мережах так і в оптичних мережах доступу [45-51].

Особливо важливим це питання постає в контексті стімкого 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 [52-59].

Таким чином, основна ідея роботи полягає у побудові конвергентної інфраструктури мережі доступу, яка б дала змогу ефективно інтегрувати сегменти фіксованого та мобільного зв'язку з метою наскрізного контролю за якістю надання інформаційних послуг для кінцевих користувачів. Це, в свою чергу повинно призвести до позитивних соціально-економічних перетворень в масштабах держави та покращення динаміки розвитку економіки за рахунок використання новітніх досягнень інформаційно-комунікаційних технологій.

## **1.2. Аналіз сучасних тенденцій конвергенції телекомунікаційних мереж**

В останні роки, в телекомунікаційних мережах з'явилась нова концепція конвергенції різноманітних технологій зв'язку у єдину систему. Ця тенденція спостерігається як в мережах фіксованого зв'язку на прикладі конвергенції технологій каналної та оптичної комутації, так і в мережах мобільного зв'язку на прикладі технологій LTE та Wi-Fi в єдину мережу 5G.

Такий підхід дає змогу в повній мірі підтримувати взаємну сумісність технологій та можливість тунелювання трафіку за принципами IP over SDH, SDH over DWDM та IP over DWDM [60, 61]. Проте, наразі використання переваг конвергенції у повній мірі ускладнюється несумісністю каналної та пакетної комутації, а також пропрієтарністю деяких технологій

Проте, для подальшого розвитку інформаційно-комунікаційних технологій, конвергенція технологій є надзвичайно важливим фактором, який дасть змогу інтегрувати різноманітні сегменти доступу без внесення значного надлишку, який наразі притаманний технології IPoSDN (NG SDH).

З точки зору мережі доступу на основі технології пасивних оптичних мереж PON (Passive Optical Network), принцип конвергенції можна інтерпретувати як «все поверх PON», тобто мережа PON повинна бути адаптована до всіх можливих технологій фіксованого та мобільного зв'язку, а також мати щзмогу ефективно передавати трафік усіх існуючих та перспективних технологій зв'язку [62-65]. Тому, окрім наявності необхідних інтерфейсів на крайових вузлах, PON потребує адаптації до існуючих та перспективних методів передавання як пакетного трафіку так і радіосигналів мереж мобільного зв'язку [66-69].

Саме тому, в сучасних мережах основний акцент повинен бути направлений на технології пакетної комутації з максимально ефективним використанням частотно-часових ресурсів [70-73]. Це, в свою чергу, потребує певної стандартизації каналного рівня первинної мережі та мережі доступу. Зокрема, найбільш перспективним на сьогодні стандартом для каналного рівня, є стандарт IEEE 802.3 Ethernet, який ефективно інтегрований як в мережах електричного зв'язку так і в оптичних мережах доступу [74-76].

Відповідно, сучасні мережі є більш клієнт-орієнтовані, а сама концепція мережі зформована на основі поділу транспорт-доступу (рис.1.2) [77].

Транспортна мережа – представляє собою сукупність мережних вузлів та ліній, які забезпечують передавання інформаційних потоків для надання послуг

абонентам [78]. В свою чергу, мережа доступу є сукупність вузлів, які відповідають за безпосередню доставку даних до кінцевих користувачів [76].

Тому, сучасні рішення для транспортних мереж та мереж доступу повинні бути більш сумісними з точки зору тунелювання інформаційних потоків та забезпечення сервісів типу E2E (End to End) незалежно від проміжних ланок телекомунікаційної інфраструктури [78].

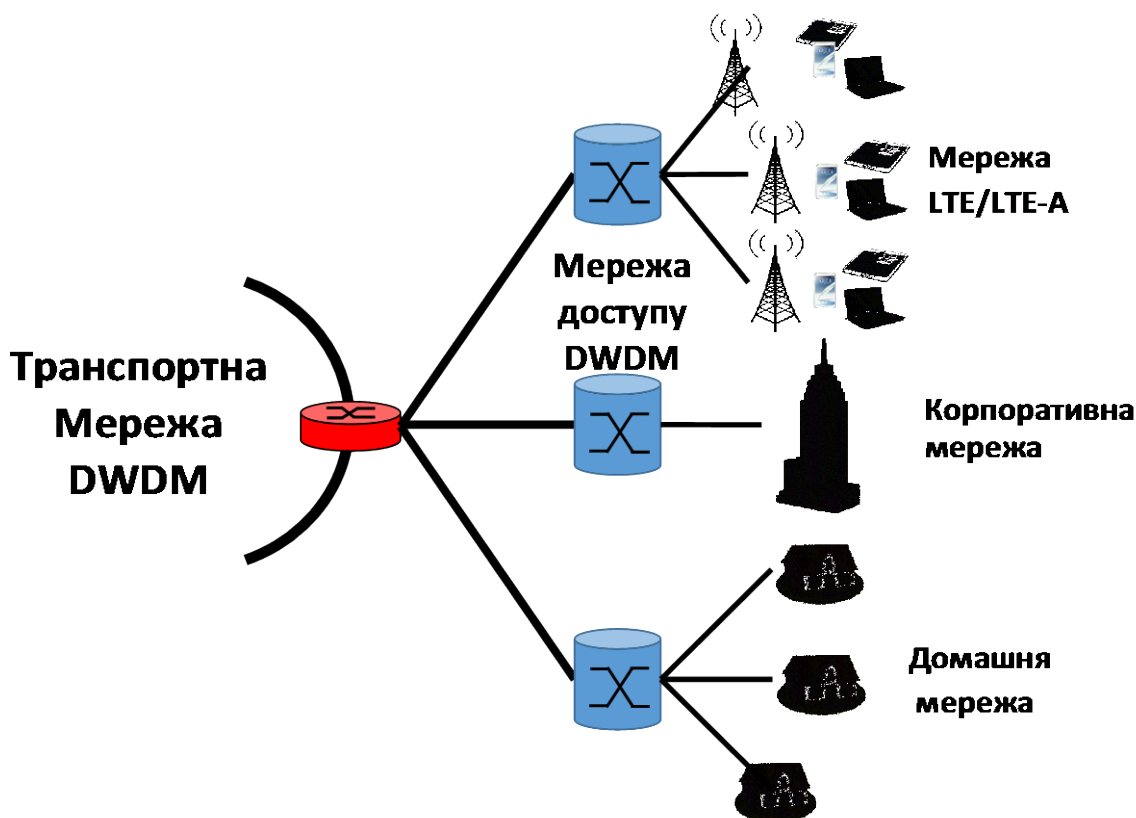


Рис 1.2. Структура сучасної мережі доступу

Разом із збільшенням вимог до широкопasmового доступу від звичайного користувача та бізнес клієнта, мережа широкопasmового доступу стала необхідною конструкцією для оператора. Волоконні системи стали основною течією у розробленні широкопasmового доступу. Зростання кількості абонентів з технологією “волокно до будинку” (FTTH), оснований на більш новій архітектурі, також дає можливість для доступу до послуг з доданою вартістю (тобто “triple play” рішення таке, як Інтернет, телефонія та цифрове

телебачення). Клієнтські потреби на рахунок широкосмуговості продовжують зростати, таким чином застосування чистого волокна у мережах доступу являється напрямом для широкосмугової розробки, і FTTH рішення стає центром уваги серед операторів у розробці мереж [79].

На сучасному телекомунікаційному ринку усі оператори забезпечують обладнанням для GPON, яке буде не тільки плавно успадковувати гігабітну мережу але й підтримувати ADSL2+, VDSL2, та IP телефонію [80]. На даний момент GPON рішення було підтримано усіма постачальниками, наприклад у Huawei, Ericsson, та Motorola настільки єдина та потужна платформа, яка не тільки забезпечує (волокно до дому, будинку, кварталу і тд.), але й представляє можливість для об'єднання у платформи мережі наступного покоління. Окрім того, передові GPON рішення сучасності не тільки підтримують FTTH, але також є сумісним з “волокном до кварталу” (FTTC), волокном до будинку (FTTB) у певному разі [81-90].

На даний час, GPON може надавати послуги через пасивні оптичні волокна при симетричному бітрейті 1,25 Гбіт/с, чи асиметричному бітрейті 2,5 Гбіт/с при скачуванні та 1,25 Гбіт/с при завантажуванні на відстані 20км [82-83]. Під час скачування, GPON обладнання передає зашифрований трафік користувача через спільну смугу пропускання, а при загрузці, воно використовує технологію множинного доступу з часовим поділом (TDMA) для забезпечення спільного високошвидкісного каналу. У той же час, обладнання GPON підтримує динамічний широкосмуговий алгоритм, роблячи передачу трафіка до терміналу оптичної мережі (ONU) більш гнучкою [85-90].

### **1.3.Розвиток оптичних мереж зі спектральним ущільненням каналів**

Для підвищення пропускної здатності в оптичних транспортних системах використовується технологія спектрального ущільнення каналів DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing) [91-94]. На відміну від традиційних систем, які використовують передавання на одній дожині хвилі, в системах зі

спектральним ущільненням каналів використовується набір несучих, які паралельно передаються в єдиному оптичному волокні. За рахунок такого підходу, досягається значно вища швидкість передавання даних. Якщо в системах з часовим розділенням каналів максимальна швидкість становить лише 40 Гбіт/с, що відповідає потоку STM-256 синхронної цифрової ієрархії, то системи DWDM забезпечують швидкості у кілька терабіт за секунду [91-94].

На рис. 1.3. представлено спрощений приклад системи DWDM. Дана система базується на використанні мультиплексорів, які забезпечують мультиплексування великої кількості довжин хвиль в єдине оптичне волокно та демультиплексорів, які виконують зворотню функцію розділення окремих довжин хвиль [95]. Таким чином, технологія DWDM функціонує на межі фізичного та каналного рівня [92-95].



Рис. 1.3. Принцип функціонування системи зі спектральним ущільненням каналів.

Враховуючи стрімкий розвиток телекомунікаційних мереж у нас час, системи DWDM активно використовуються не тільки в транспортних мережах, але і у мережах доступу, зокрема у великих містах. Оскільки побудова мережної інфраструктури DWDM з кожним роком стає все дешевшою, вони починають активно використовуватись для розгортання сегментів останньої милі. На сьогоднішній час найбільшого поширення набули системи DWDM-32 та DWDM-64, які використовують 32 та 64 довжини хвилі в одному оптичному волокні. Проте, є значна кількість технічних рішень від провідних виробників, які дають змогу ущільнювати до 512 довжин хвиль. Відповідно, можна зробити висновок, що оптичні мережі зі спектральним ущільненням дають змогу



підвищувати пропускну здатність практично необмежено, для забезпечення невинно зростаючих обсягів трафіку в телекомунікаційних мережах [96].

Враховуючи, що технологія DWDM працює на каналному рівні, вона дає змогу гнучко розподіляти трафік між різними абонентами, за рахунок комутації довжин хвиль, що істотно розширює можливості майбутніх систем передавання даних. Можливість об'єднання голосового та пакетного трафіку в рамках єдиного оптичного волокна суттєво спрощує механізми мультиплексування трафіку та дає змогу розвантажити існуючі системи NGSDH, за рахунок усунення складних механізмів конкетенації віртуальних контейнерів [19, 21, 22]. Таке рішення, дає змогу пришвидшити конвергенції технологій каналної та пакетної комутації, а також прискорити повний перехід до комутації пакетів. При інтеграції окремих сегментів на рівні DWDM, мультиплексори/демультиплексори частково виконують функції статичної маршрутизації та комутації [17, 18, 97-99].

При розвитку телекомунікаційної інфраструктури немає єдиного правильного підходу, який би задовольнив усі можливі вимоги операторів та абонентів. Гнучкість системи DWDM дає можливість операторам самим визначати ті чи інші технічні рішення як в транспортних сегментах так і в сегментах останньої милі. При цьому, основним критерієм операторів постає максимізація ефективності використання ресурсів при забезпеченні необхідних вимог до якості обслуговування абонентів, таких як затримка, джиттер пропускну здатність та цілісність даних [23]. Відповідно, чим більше буде різноманіття технічних рішень, тим більше гнучко оператори зв'язку зможуть побудувати свою мережну інфраструктуру до конкретних ринкових умов. На сьогоднішній час, найбільш поширеним випадком є інтеграція DWDM, Ethernet та NGSDH в єдину мережну систему, яка об'єднує транспортні сегменти та сегменти мереж доступу. Таке рішення забезпечує ефективне передавання пакетного трафіку разом із потоками синхронної цифрової ієрархії. Таким чином, ефективність завантаження каналів зростає за рахунок ефективного

розподілу потоків між багатьма довжинами хвиль у мережі зі спектральним ущільненням каналів. Це підтверджує теоретичні очікування від виграшу при конвергенції різних технологій на основі єдиної транспортної системи зі спектральним ущільненням каналів DWDM [20, 100].

Відповідно, концепція розвитку конвергентних телекомунікаційних мереж формує новий підхід до управління ресурсами мережі, який полягає не у створенні фізичних каналів первинної мережі, а до адаптивного утворення віртуальних каналів довільної пропускної здатності, для передавання пактеного трафіку з гарантованими параметрами якості обслуговування.

Тому, системи DWDM повинні розглядатися не як класичні лінії зв'язку, а як сукупність віртуальних каналів з динамічно змінними параметрами та гнучкими можливостями стосовно маршрутизації та комутації інформаційних потоків. Якщо перші системи зі спектральним ущільненням каналів мали на меті просте лінійне нарощування пропускної здатності, то на сьогоднішній час вона мають змогу забезпечувати гнучку динамічну віртуальну топологію, яка може бути адаптивно змінена у відповідності до поточних потреб телекомунікаційної мережі. Відповідно, окрім традиційних мультиплексорів, в сучасних системах використовують реконфігуровувані оптичні мультиплексори вводу/виводу ROADM (Reconfigurable Optical Add Drop Multiplexer). Крім того, замість класичних комутаторів з оптоелектронними передворенням, в сучасних мережах використовують повністю оптичні комутатори типу OXC (Optical Cross Connect) та перетворювачі довжин хвиль, що дає змогу в комплексі підвищити гнучкість оптичної мережної інфраструктури [8, 16, 101].

Таким чином, багатоканальні системи DWDM знижують проблему дефіциту ресурсів телекомунікаційної мережі за рахунок повної зв'язності та доступності комутації каналів між будь-яким вхідним та вихідним портом. У поєднанні із новітніми досягненнями технологій комутації пакетів та блоків на оптичному рівні, система здатна у найкоротший час визначити необхідний

маршрут та зарезервувати відповідні частотно-часові ресурси для передавання пакету або групи пакетів між двома вузлами.

Одним із способів розподілу каналів upstream ONU є мультиплексування по довжині хвилі (WDM), де кожен ONU працює на своїй довжині хвилі [102-104]. Хоча це досить просте рішення (з теоретичної точки зору), фактично, воно не реалізується з економічних причин. WDM - варіант вимагає або приймача, що настроювався, або набору приймачів в OLT, щоб обслуговувати декілька каналів. Ще серйозніша проблема виникає для мережевих операторів ONU: замість даних про тип ONU, йому буде треба знати, з якими довжинами хвиль працює кожен з ONU [104]. Кожен ONU повинен буде використовувати вузьку і керовану смугу і, як наслідок, стане дорожчим. Для некваліфікованого користувача буде важко замінити несправний ONU, оскільки модуль з неправильною довжиною хвилі може інтерферувати з іншим ONU в PON.

У мережах доступу велика частина трафіку поширюється з мережі до користувача (downstream) і від користувача в мережу (upstream), а не за схемою користувач-користувач (peer-to-peer). Таким чином, видається розумним розподіл downstream і upstream каналів. Простий розподіл каналів може бути заснований на просторовому розподілі SDM (Space Division Multiplexing), де для передачі, в кожному з напрямів використовуються різні оптичні волокна [105]. Щоб заощадити на волокні і зменшити витрати на усунення можливих несправностей, можна застосувати одне волокно для обмінів в обох напрямках. В цьому випадку використовуються дві довжини хвилі: зазвичай 1310 нм ( $\lambda_1$ ) для передачі upstream і 1550 нм ( $\lambda_2$ ) для передачі downstream. Пропускна спроможність кожного з каналів може задаватися незалежно [7].

Розподіл за часом виявляється переважним для оптичних каналів, оскільки дозволяє використовувати в OLT одну довжину хвилі, наприклад 1310 нм, і один трансивер, що знижує вартість цього варіанту.

Через різницю відстаней між OLT і ONU, послаблення оптичного сигналу в PON виявляється для ONU різним. Рівень сигналу, що приходить на вхід OLT, буде різним для кожного часового домену.

В якості альтернативи, можна дозволити ONU регулювати його трансиверу рівень передаваної потужності, так, що рівень сигналу на вході OLT від усіх ONU будуть ідентичними. Цей метод не занадто привабливий для розробників трансиверів, оскільки це робить обладнання ONU складнішим, вимагає спеціального протоколу для забезпечення зворотного зв'язку з боку OLT для кожного ONU, і, що особливо важливе, погіршить робочі характеристики усіх ONU до рівня найбільш віддаленого пристрою [3,4,6,106].

Іншою проблемою є те, що заборонити ONU відправку даних не достатньо. Річ у тому, що навіть у відсутності даних, лазери генерують шумовий сигнал. Емісійний шум від декількох ONU, розміщених зблизька OLT, може легко спотворити сигнал від віддаленого ONU. Таким чином, ONU повинен відключати свій лазер в паузах між його часовими доменами. Оскільки лазери охолоджуються при відключенні, їх слід прогрівати при включенні, вихідна потужність лазера може флюктуватися на початку передачі [107].

Ethernet PON (EPON) є мережею, що базується на PON, яка транспортує дані, інкапсульовані в Ethernet - кадри (визначено стандартом IEEE 802.3). При цьому використовується канальне кодування 8B/10B (8 призначених для користувача біт перетворюються в 10 канальних) [108-110].

Застосування пасивних оптичних мереж розглядалося в якості технології мереж доступу задовго до широкого впровадження Інтернет. Рекомендації ITU G.983 для FSAN (Full Service Access Network) визначають оптичний доступ типу PON для мереж, де на рівні L2 застосовується ATM. У 1995, коли стартувала ініціатива FSAN, на ATM поклалися великі надії. Передбачалося, що цей стандарт стане основою технології локальних мереж, MAN і опорних мереж. Проте, відтоді технологія Ethernet обійшла ATM і стала універсальним мережевим стандартом. У світі використовується більше 320 мільйонів

інтерфейсів. Швидкий гігабітний Ethernet використовується все більше, стало доступним обладнання і 10-гігабітного Ethernet. Зараз очевидно, що Ethernet став найбільш широко використовуваною технологією для MAN і WAN. Враховуючи, що 95% LAN використовують Ethernet, стає зрозуміло, що ATM PON не може конкурувати в якості засобу з'єднання двох мереж Ethernet [111, 112].

З іншого боку, Ethernet представляється цілком логічним вибором для мережі, орієнтованої на IP - доступ. Після впровадження нових технологій гарантії якості обслуговування (QoS), Ethernet стала мережею, здатною підтримувати передачу даних, голосу і відео [113-115]. Ці технології включають режим повнодуплексного обміну, це, передусім (P802.1p), і віртуальних локальних мереж (VLAN; P802.1Q). Ethernet є недорогою технологією, яка є всюдисущою з великою різноманітністю доступного обладнання.

Усі ONU синхронізуються від загального часозадаючого джерела і кожному ONU виділяється певний часовий домен. Кожен домен може використовуватися для передачі декількох кадрів Ethernet. ONU повинен буферизувати, отримані від клієнта кадри, до тих пір, поки не прийде його часовий домен. Коли приходить його часовий домен, ONU передає усі накопичені в буфері кадри з максимальною канальною швидкістю, яка повинна відповідати одному із стандартів Ethernet (10/100/1000/10000 Мбіт/с). Якщо в буфері немає кадрів, щоб заповнити увесь домен, передаються порожні 10-бітові символи.

Можливі різні схеми виділення часових доменів, починаючи від статичних TDMA (Time - Division Multiple Access), до динамічних, таких, що враховують миттєве значення розміру черги в кожному ONU (схема статистичного мультиплексування). Можливі і інші схеми виділення часових доменів, включаючи схеми, що використовують значення пріоритету трафіку, якість

обслуговування QoS (Quality of Service), угоди про рівні обслуговування SLA (Service - Level Agreement) і так далі [116-119].

Можлива децентралізована схема динамічного надання тимчасових доменів, в якій ONU вирішують, коли слід посилати дані і як довго це повинно тривати. Ці схеми в якійсь мірі нагадують маркерний підхід, за виключення того, що тут використовується пасивне кільце. У такій схемі кожен ONU, перш ніж передавати дані, посилає спеціальне повідомлення, що повідомляє про число байт, які треба переслати. ONU, який повинен передавати наступним, (наприклад, при карусельному алгоритмі) буде моніторити передачу попереднього ONU і почне свою передачу так, щоб кадр прийшов в OLT відразу після завершення передачі попереднього ONU. Таким чином, запобігають зіткнення і втрати смуги каналу. Проте, ця схема має істотне обмеження: вона вимагає зв'язності між ONU. Це накладає деякі обмеження на топологію PON; зокрема, мережа має бути виконана у вигляді кільця або ширококомовної зірки. Ця вимога небажана, оскільки (а) може знадобитися велика довжина волокон, або (б) волокна можуть бути вже укладені за іншою схемою. Взагалі, переважний алгоритм повинен підтримувати будь-яку топологію PON точка-мультиточка.

У оптичних мережах доступу, ми можемо враховувати тільки зв'язність OLT з кожним ONU (downstream трафік) і кожного ONU з OLT (upstream трафік). Це вірно для усіх топологій PON. Отже, OLT є єдиним пристроєм, який може здійснювати арбітраж для доступу до каналу з розподілом за часом.

Проблема схеми динамічного арбітражу, що базується на OLT, полягає в тому факті, що OLT не знає, скільки байт буферизував кожен ONU. Імпульсивність інформаційного трафіку заважає передбаченню рівня заповнення буфера з прийнятною точністю. Якщо OLT треба здійснити привласнення тимчасового домена, він повинен знати точно стан цього ONU. Одним з рішень може бути використання схеми, що базується на обміні повідомленнями Grant і Request. Запити (Requests) посилаються ONU, щоб

повідомити про зміну стани ONU, наприклад, об'єму даних, що буферизують. OLT обробляє усі запити і привласнює різні тимчасові домени для ONU. Оскільки декілька неініціалізованих ONU можуть відгукнутися на одне і те ж повідомлення GATE, повідомлення REPORT можуть стикатися. В цьому випадку ONU, чиї REPORT зіткнулися, не отримають тимчасового домена. Якщо ONU не отримає часовий домен в межах інтервалу таймауту, він знатиме, що сталося зіткнення, і спробує повторити ініціалізацію, пропустивши випадкове число повідомлень ініціалізацій GATE. При повторних зіткненнях псевдовипадкова витримка подвоюється [120-122].

Повідомлення GATE передає ONU до 4 доменів передачі (grants). У разі, коли ONU має більше за одну заповнену чергу, він може вирішувати сам, як розподіляти ресурси між чергами. Повідомлення REPORT передає OLT стан до 8 черг. Кожна черга може оголошувати (у повідомленнях Report) про декілька порогів, так що OLT може виділити ресурс буфера, базуючись на одному з цих порогів, уникаючи таким чином втрат смуги із-за недовикористання ресурсу домена. Число порогів, які можуть бути передані в повідомленні REPORT, залежить від того, скільки черг декларується. Встановлена межа в 64 байти для повідомлення REPORT. ONU, який анонсує 8 черг може мати до 2 порогів на чергу. Якщо для ONU доступна тільки одна черга, може анонсуватися до 13 порогів. в доставляється ONU за допомогою повідомлень Grant [120].

Перевага централізованого ухвалення рішення про привласнення часових доменів пов'язана з тим, що OLT знає стан усієї мережі і може перейти на інший алгоритм, якщо це потрібно, ONU не потрібне моніторити стан мережі або погоджувати які-небудь параметри. Це робить ONU простіше і дешевше, а мережа в цілому надійніше.

#### **1.4. Аналіз алгоритмів динамічного резервування ресурсів у пасивних оптичних мережах доступу**

Резервування ресурсів є одним із ключових аспектів забезпечення належної пропускної здатності у оптичних мережах. Не зважаючи на те, що сучасне мережне обладнання здатне функціонувати на швидкостях, близьких до швидкості світла, є два важливих фактори, які обмежують пропускну здатність оптичних телекомунікаційних мереж: швидкість перемикання передавачів/приймачів та коефіцієнт використання пропускної здатності.

Перший фактор є фіксованим в процесі виготовлення передавальних та приймальних модулів. Тому, покращення даного параметру можливе лише при розробці нових більш ефективних пристроїв. В свою чергу коефіцієнт використання пропускної здатності залежить від обраного методу доступу до середовища на каналному рівні, а також ряду інших внутрішніх та зовнішніх факторів. Особливо важливим параметром є саме метод доступу до середовища на каналному рівні, який в першу чергу визначає наскільки ефективно буде розподілена пропускна здатність між кількома користувачами. В спільних середовищах, таких як радіоканали або мережі за топологією спільної шини необхідно використовувати методи випадкового доступу з прослуховуванням каналів або механізми детермінованого доступу з попереднім резервуванням ресурсів. В мережах EPON (Ethernet Passive Optical Networks) спільна оптоволоконна лінія під'єднується до OLT (Optical Line Terminal), і тому пропускна здатність даного оптичного волокна повинна бути заздалегідь розподілена в часі між користувачами в обох напрямках передавання сигналу. В мережах EPON, як і у всіх інших мережах PON, за планування пропускної здатності у низхідному та висхідному каналі відповідає вузол OLT. У низхідному каналі, розподіл пропускної здатності є доволі простим, оскільки OLT має можливість буферизувати пакети для різних ONU (Optical Network Unit) і контролювати часові інтервали для кожного з них, в залежності від поточної кількості пакетів у черзі та чинних вимог SLA (Service Level



Agreement) для кожного ONU. У висхідному каналі, кожен ONU повинен прослуховувати середовище перед тим як здійснювати передавання даних. Проте, особливості побудови пасивних оптичних мереж не дають змогу вузлам ONU прослуховувати висхідні канали інших ONU. Тому, використання методів випадкового доступу з прослуховуванням середовища, які використовуються у мережах Wi-Fi та мережах Ethernet на основі витієї пари, не є придатним для пасивних оптичних мереж.

Тому, для мереж EPON важливо розробити ефективний механізм розподілу пропускної здатності між абонентами в низхідному каналі. Одним з таких механізмів є протокол MPCP (Multi Point Control Protocol), який використовується в OLT і відповідає за розподіл пропускної здатності між вузлами ONU у висхідному каналі. Ця процедура здійснюється шляхом передавання контрольних повідомлень між вузлом OLT та вузлами ONU. Перше повідомлення GATE передається до вузлів ONU для того, щоб повідомити їх про вільні часові інтервали, коли вони можуть здійснювати передавання даних у висхідному каналі. Причому повідомлення GATE передається з урахуванням тривалості поширення сигналу між OLT і ONU. В свою чергу, ONU передають до OLT повідомлення REPORT на початку або в кінці свого часового вікна для передавання у висхідному каналі. В повідомленнях REPORT передається вимога вузла ONU у пропускній здатності. Ця вимога визначається в залежності від завантаженості буфера вузла та поточного значення часового вікна для передавання даних. При формуванні часових інтервалів для наступного циклу передавання, OLT враховує вимоги усіх вузлів ONU і розподіляє пропускну здатність між ними пропорційно до цих вимог. Найпростішим прикладом розподілу, є рівноцінний розподіл тривалості передавання даних для всіх вузлів.

Проте, такий розподіл не завжди є виправданим, особливо у випадках коли вузли ONU нерівномірно завантажені. Тому, з точки зору максимізації

коефіцієнта використання пропускної здатності, необхідно використовувати динамічні алгоритми розподілу каналних ресурсів між вузлами ONU.

Ряд досліджень проблеми динамічного розподілу пропускної здатності систематизовано у дослідженнях [123, 124]. Для розподілу пропускної здатності, є ряд параметрів, які необхідно враховувати для реалізації ефективних рішень з точки зору балансу між вартістю та якістю послуг, зокрема з урахуванням затримки, коефіцієнта використання пропускної здатності, класів QoS, джиттера та енергоспоживання. Тому, багато досліджень були спрямовані саме на пошук нових алгоритмів розподілу пропускної здатності, які б забезпечили більш ефективне співвідношення між вищезгаданими параметрами. Для стандарту EPON, метод контролю за розподілом пропускної здатності (MPCP) є обов'язковим, проте, є можливість для його модифікації з метою забезпечення більшої гнучкості. Таким чином, даний стандарт дає змогу науковцям та виробникам обладнання розробляти та впроваджувати нові рішення, з метою підвищення ефективності функціонування мережі в цілому.

Не зважаючи на те, що на сьогоднішній день наявні достатньо ефективні рішення для розподілу пропускної здатності, необхідно розробити нові методи, які б дали змогу враховувати більше параметрів мережі. Є методи, які більш ефективні з точки зору коефіцієнта використання пропускної здатності, в той час як інші методи забезпечують нижчу затримку, або меншу складність реалізації. В останні роки, глобальне потепління призводить до того, що виробники активно шукають шляхи підвищення енергетичної ефективності телекомунікаційних мереж. Для алгоритмів розподілу пропускної здатності, складність реалізації є ключовим параметром, який визначає енергетичну ефективність системи та сумарну вартість обладнання.

## **1.5.Висновки до 1-го розділу**

У розділі детально проаналізовано стан та тенденції розвитку конвергентних оптичних мереж доступу і визначено основні обмеження, зумовлені неефективним розподілом ресурсів, значним обсягом службового трафіку, складністю процесу адаптивного управління ресурсами мережі, з одночасним забезпеченням належних параметрів пропускної здатності оптичних каналів, відсутністю єдиної площини керування, процесом розподілу інформаційних потоків у конвергентній оптичній мережі з поєднанням сегментів фіксованого та мобільного доступу, а також непристосованістю існуючих оптичних мереж доступу до розгортання опорних транспортних каналів, для гетерогенних мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого покоління, із забезпеченням високої ефективності використання пропускної здатності каналів, а також гнучкості та масштабованості оптичної інфраструктури.

## **РОЗДІЛ 2. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ В КОНВЕРГЕНТНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ ДОСТУПУ**

### **2.1. Архітектура та основні функціональні елементи конвергентних оптичних мереж доступу**

Перехід оптичних мереж до парадигми IP поверх DWDM стимулював розвиток оптичних мереж доступу нового покоління, які підтримують конвергенцію різнотипних сегментів мережі доступу. Повний перехід транспортних мереж на технології пакетної комутації, у поєднанні із розвитком мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого поколінь, призвів до повної конвергенції мереж доступу до технологій пакетної комутації, усуваючи, таким чином, усі вузькі місця на переходах між сегментами пакетної та каналної комутації.

Проте, при передаванні пакетного трафіку в конвергентних мережах доступу, виникає проблема низької ефективності використання пропускної здатності у зв'язку із флуктуаційним характером пакетного трафіку в IP мережах. Це потребує складних алгоритмів адаптивного розподілу пропускної здатності, які б давали змогу підлаштовувати параметри кожного каналу в залежності від поточних умов в мережі. Наявні на сьогодні алгоритми є ефективними для сегментів фіксованих мереж доступу, які побудовані за архітектурою “волокно до...” (FTTx – Fiber to the...). При побудові конвергентних мереж, в яких оптична інфраструктура, окрім житлових та корпоративних сегментів доступу, одночасно використовується як опорна транспортна мережа для систем мобільного зв'язку, динаміка зміни інтенсивності трафіку є значно вищою, що пояснюється високою мобільністю абонентів у мережах мобільного зв'язку.

Пасивні оптичні мережі будуються на основі централізованої архітектури, де є основний вузол OLT і велика кількість абонентських вузлів ONU. Такі

мережі називають пасивними, оскільки в мережі розподілу даних між користувачами немає активних елементів. Передавання даних реалізується шляхом широкоповного передавання потоку, який розгалужується у пасивних сплітерах, до абонентських вузлів ONU. У зворотному напрямі, окремі потоки аналогічно збираються у сплітері та передаються до OLT. Сигнали в обох напрямках передавання мультиплексуються в одному оптичному волокні, використовуючи різні частотні діапазони. Функціональна схема пасивної оптичної мережі доступу представлена на рис. 2.1.

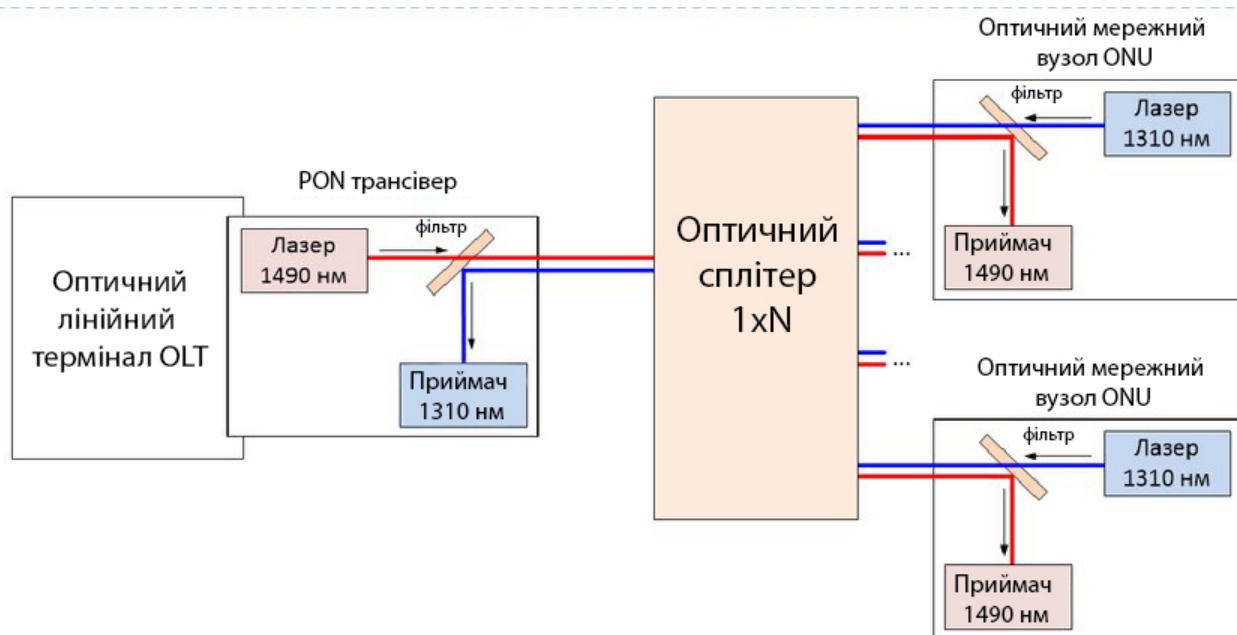


Рис. 2.1. Функціональна схема пасивної оптичної мережі

Для організації взаємодії центрального вузла з абонентськими використовується протокол управління множиною вузлів MPCP (Multi-Point Control Protocol). Протокол базується на двох типах керуючих повідомлень: GATE і REPORT. Повідомлення GATE йдуть від OLT до всіх ONU. У них міститься інформація про режими мовлення, ідентифікатор одержувача, часові мітки, тощо. У відповідь вузли ONU посилають на OLT повідомлення REPORT, в яких передають інформацію про свій стан. Протокольна діаграма взаємодії OLT та ONU показана на рисунку 2.2.

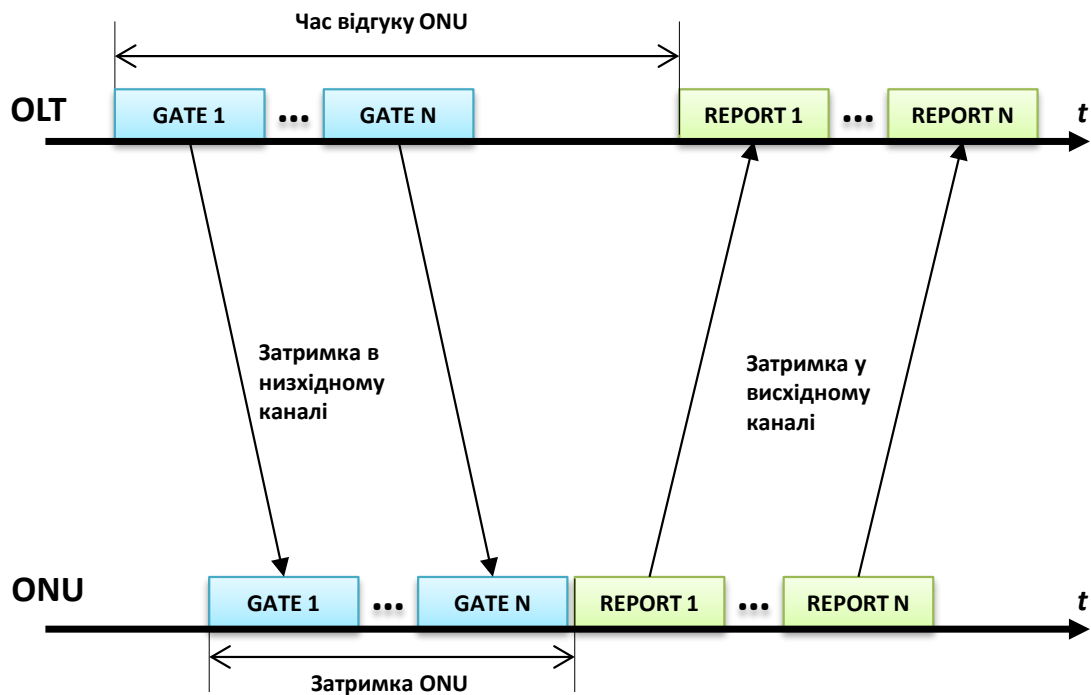


Рис. 2.2. Протокольна діаграма взаємодії OLT та ONU.

Повідомлення REPORT допомагають OLT правильно розподіляти смугу у зворотному потоці. Протокол MPCP має два режими роботи: режим ініціалізації і нормальний режим роботи. Відповідно, абонентські вузли можуть знаходитися в двох станах. Режим ініціалізації необхідний для того, щоб OLT міг виявити і зареєструвати нові вузли ONT.

### 2.1.1. Модель розподілу каналних ресурсів пасивної оптичної мережі у низхідному напрямку передавання

При передаванні інформаційного потоку від вузла OLT (Optical Line Terminal) до вузлів ONU (Optical Network Unit), OLT адаптивно визначає часові інтервали в яких передаються дані для кожного вузла ONU (рис. 2.3) [1]. Спочатку вузол OLT аналізує вхідні пакети і розподіляє каналні ресурси у низхідному каналі пропорційно до обсягу даних кожного вузла. Кадр PON у низхідному каналі складається із заголовку PCBd (Physical Control Block

downstream) та корисного навантаження. Структура кадру PON у низхідному каналі представлена на рис. 2.4.

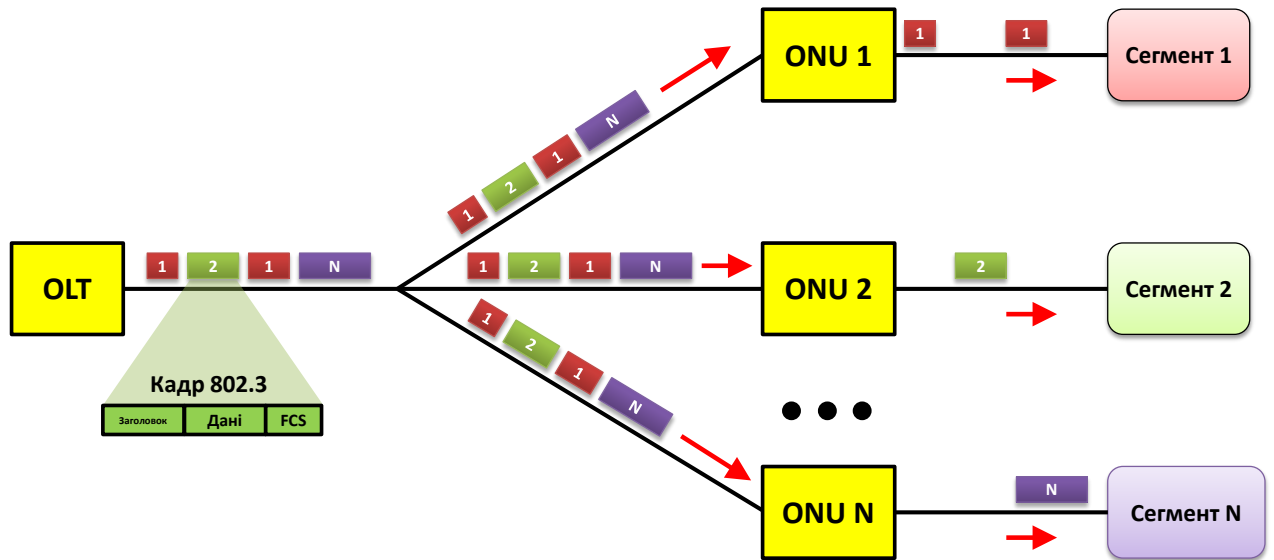


Рис. 2.3 Принцип часового мультиплексування в низхідному каналі.

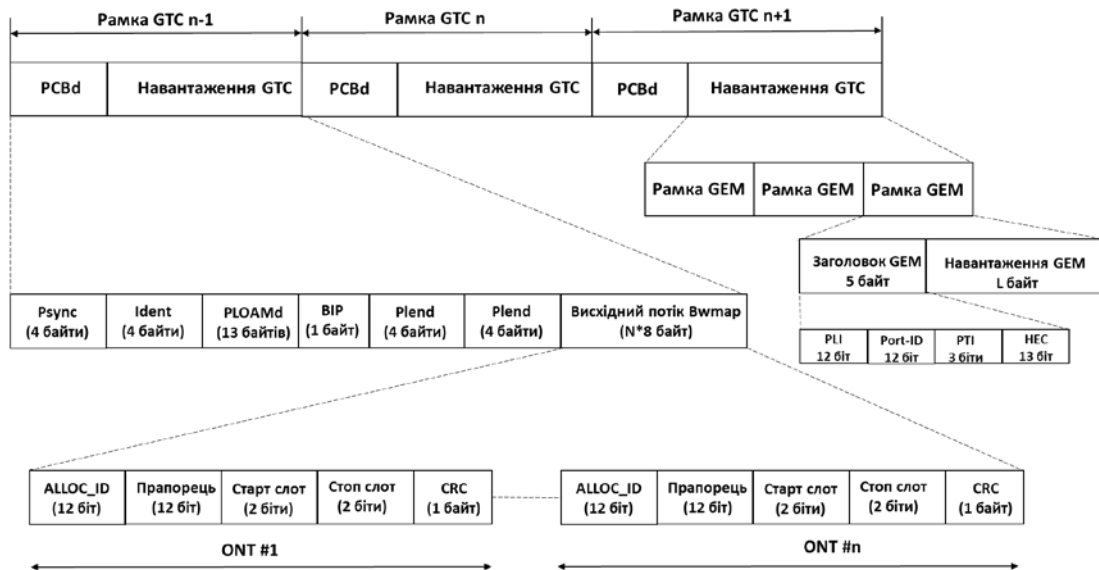


Рис. 2.4. Структура кадру пасивної оптичної мережі у низхідному напрямку передавання.

Кожен ONU отримує інформацію з PCBd для налаштування параметрів передавання інформації. Корисне навантаження передається послідовністю кадрів GEM (GPON Encapsulation Method). Кожен вузол ONU визначає

призначений для нього кадр GEM відповідно до значення Port-ID в заголовку GEM. Заголовок PBCsd містить інформацію про розподіл каналних інтервалів між вузлами ONU у висхідному напрямку передавання.

### 2.1.2. Модель розподілу каналних ресурсів пасивної оптичної мережі у висхідному напрямку передавання

У лінії вверх, користувачі здійснюють одночасне передавання кадрів, проте кожен ONU формує їх у кадри фіксованого розміру, і передає в узгоджений з OLT проміжок часу (рис. 2.5) [1,11]. При чому, якщо обсяг корисних даних є меншим від стандартного часового кадру, то він доповнюється нулями для того, щоб не порушувати синхронізацію. Це спричиняє суттєве погіршення коефіцієнту використання пропускнуої здатності каналів у транспортній мережі.

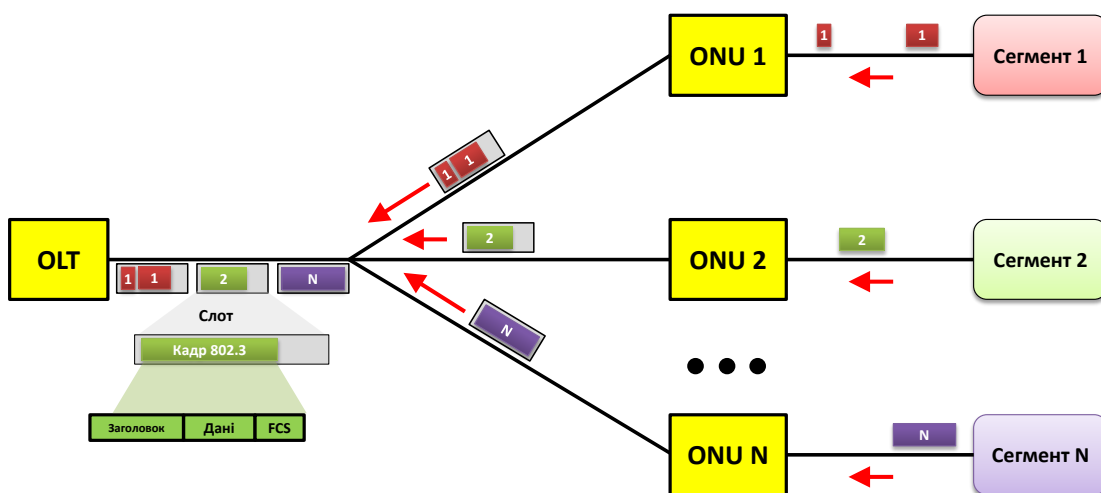


Рис.2.5. Принцип часового мультиплексування у висхідному каналі

Кожен вузол ONU передає свій кадр до вузла OLT протягом попередньо узгодженого каналного інтервалу. Кадри ONU мультиплекуються у загальний кадр GTC у висхідному напрямку передавання, таким чином, щоб не виникло колізій між даними різних ONU. Кожен кадр ONU містить заголовок, в якому



міститься інформація, яка необхідна OLT для узгодження параметрів передавання даних та розподілу каналних ресурсів (рис. 2.6).

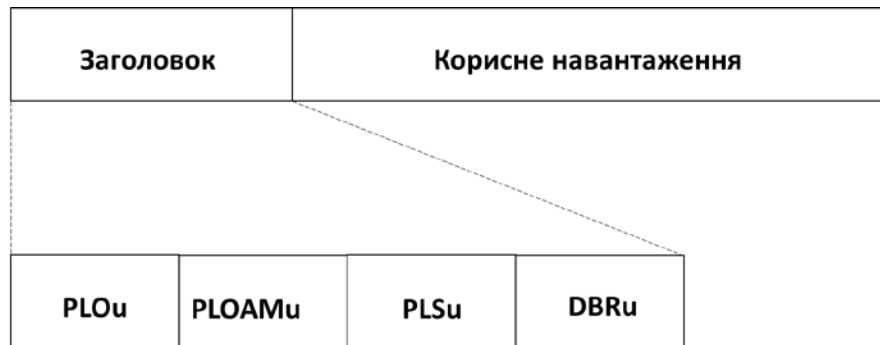


Рис. 2.6. Структура кадру пасивної оптичної мережі у висхідному напрямку передавання.

Кожен ONU отримує інформацію з PСVd для налаштування параметрів передавання інформації. Корисне навантаження передається послідовністю кадрів GEM (GPON Encapsulation Method). Кожен вузол ONU визначає призначений для нього кадр GEM відповідно до значення Port-ID в заголовку GEM. Заголовок PСVd містить інформацію про розподіл каналних інтервалів між вузлами ONU у висхідному напрямку передавання. Кадр GTC передає 155520 байт протягом інтервалу 125 мкс, що відповідає пропускній здатності 9,95328 Гбіт/с.

## **2.2. Удосконалений метод розподілу каналних ресурсів у пасивній оптичній мережі доступу**

У пасивних оптичних мережах зі спектральним ущільненням каналів, OLT розподіляє каналні інтервали незалежно для кожної довжини хвилі, що часто призводить до неефективного використання пропускної здатності. Після проходження IP-пакетів до термінального вузла OLT, виникає необхідність швидкого їх розділення між вузлами призначення. Однією з існуючих проблем яка виникає у термінальному вузлі мережі є затримка при перетворенні агрегованого трафіку в абонентський трафік. Дана затримка зумовлена тим, що вхідні пакети поступають на вхід послідовно. Термінальний вузол обробляє

заголовок кожного пакету, аналізуючи його адресу призначення та пріоритет. При послідовному розподілі пакетів виникає затримка, зумовлена часом очікування окремих пакетів у буфері. Зменшення часу затримки, можна досягти двома шляхами: підвищення швидкості передавання в одному хвильовому каналі або збільшення кількості хвильових каналів. Перший варіант є неприйнятним, оскільки подальше підвищення швидкості передавання даних в одному каналі суттєво обмежується нелінійними ефектами та дисперсією. Другий варіант більш ефективний з точки зору нарощування пропускної здатності каналу, але спричиняє неефективне використання ресурсів мережі. Для підвищення ефективності використання пропускної здатності в пасивних оптичних мережах доступу зі спектральним ущільненням каналів запропоновано удосконалений метод розподілу каналних ресурсів [2,9]. На відміну від вищерозглянутих моделей, запропонований метод розподілу полягає у формуванні спектрально-часових ресурсних блоків для обох напрямків передавання (рис. 2.7).

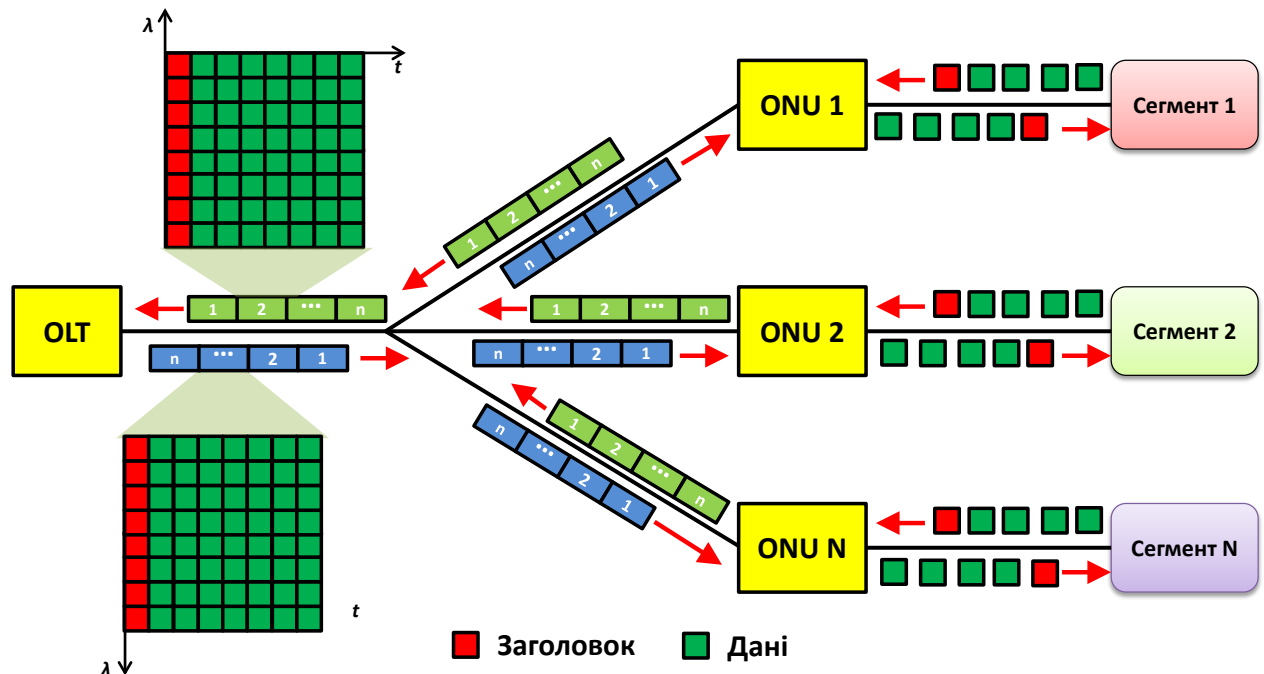


Рис. 2.7. Принцип спектрально-часового методу розподілу каналних ресурсів між вузлами в обох напрямках передавання.

Розмір ресурсного блоку дорівнює  $n \times m$ , де  $n$  відповідає кількості часових інтервалів, а  $m$  – кількості довжин хвиль, що використовуються. Кожен ресурсний елемент займає часовий інтервал у 15 мкс, і частотну смугу у 200 ГГц. Максимальна кількість корисного навантаження, яке може передаватись одним ресурсним елементом дорівнює  $S_{RE}=19440$  байт, що відповідає бітовій швидкості передавання даних у 9,95328 Гбіт/с. Таким чином, сумарна тривалість ресурсного блоку становить 120 мкс, що забезпечує його зворотною сумісністю із стандартним розміром часового кадру пасивної оптичної мережі  $T_{GPON}=125$  мкс.

Розподіл пропускної здатності між користувачами здійснюється шляхом виділення певних ресурсних елементів для кожного вузла ONU. Кожен вузол ONU отримує інформацію про виділені для нього ресурсні елементи по службових каналах, розташування яких у ресурсному блоці є фіксованим.

Запропонована ресурсна сітка представляється у матричній формі наступним чином:

$$\mathbf{S} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} & S_{17} & S_{18} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} & S_{27} & S_{28} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} & S_{37} & S_{38} \\ S_{41} & S_{42} & S_{43} & S_{44} & S_{45} & S_{46} & S_{47} & S_{48} \\ S_{51} & S_{52} & S_{53} & S_{54} & S_{55} & S_{56} & S_{57} & S_{58} \\ S_{61} & S_{62} & S_{63} & S_{64} & S_{65} & S_{66} & S_{67} & S_{68} \\ S_{71} & S_{72} & S_{73} & S_{74} & S_{75} & S_{76} & S_{77} & S_{78} \\ S_{81} & S_{82} & S_{83} & S_{84} & S_{85} & S_{86} & S_{87} & S_{88} \end{pmatrix}, \quad (2.1)$$

де  $S_{ij}$  – кількість байт, які можна передати одним ресурсним елементом (19440 байт в стандарті GPON).

Для розподілу ресурсів вузла OLT між вузлами ONU, кожному ONU присвоюється бінарна матриця розподілу, яка визначає які саме ресурсні елементи будуть використовуватись для обслуговування даного вузла. Бінарний елемент матриці  $b_{ij}$  визначає асоціацію ресурсного елемента  $i$ -ї довжини хвилі та  $j$  – часового інтервалу з необхідним вузлом ONU:

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо елемент не використовується для ONU} \\ 1, & \text{якщо елемент використовується для ONU} \end{cases} \quad (2.2)$$

Відповідно, матриця розподілу записується наступним чином:

$$\mathbf{B}_{\text{ONU}} = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} & b_{14} & b_{15} & b_{16} & b_{17} & b_{18} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} & b_{24} & b_{25} & b_{26} & b_{27} & b_{28} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & b_{34} & b_{35} & b_{36} & b_{37} & b_{38} \\ b_{41} & b_{42} & b_{43} & b_{44} & b_{45} & b_{46} & b_{47} & b_{48} \\ b_{51} & b_{52} & b_{53} & b_{54} & b_{55} & b_{56} & b_{57} & b_{58} \\ b_{61} & b_{62} & b_{63} & b_{64} & b_{65} & b_{66} & b_{67} & b_{68} \\ b_{71} & b_{72} & b_{73} & b_{74} & b_{75} & b_{76} & b_{77} & b_{78} \\ b_{81} & b_{82} & b_{83} & b_{84} & b_{85} & b_{86} & b_{87} & b_{88} \end{pmatrix} \quad (2.3)$$

Кожному вузлу ONU, присвоюється унікальна матриця розподілу, причому окремі елементи даних матриць можуть співпадати між собою. Це забезпечує гнучкість в керуванні пропускнуою здатністю каналу та покращує масштабованість мережі доступу за рахунок одночасного розподілу усіх каналних ресурсів оптичної мережі та усунення необхідності багатократного передавання однакових блоків даних до різних вузлів ONU.

Відповідно, інформаційний потік між вузлом OLT та кількома вузлами ONU розраховується наступним чином:

$$\mathbf{S}_{\text{ONU}} = \mathbf{S} \circ \mathbf{B}_{\text{ONU}} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} b_{ij}, \quad \forall i, j \quad (2.4)$$

Запропонований метод не ускладнює фізичний процес передавання даних, оскільки характеристики такої системи на фізичному рівні аналогічні до характеристик звичайних систем зі спектральним ущільненням каналів.

Таким чином, пропускна здатність каналу зв'язку між OLT та ONU буде розраховуватись наступним чином:

$$C_{\text{ONU}} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n S_{ij} \circ b_{ij}}{T_{\text{GPON}}}, [\text{Гбіт/с}] \quad (2.5)$$

Мінімальна межа пропускнуої здатності, яка може бути виділена для одного вузла ONU, становить:

$$C_{ONU \min} = \frac{8S_{RE}}{T_{GPON}}, [\text{Гбіт/с}], \quad (2.6)$$

де  $S_{RE}$  – інформаційна ємність одного ресурсного елемента,  $T_{GPON}$  – тривалість часового кадру пасивної оптичної мережі.

Максимальна межа пропускної здатності одного ресурсного блоку становить:

$$C_{RB} = \frac{8S_{RE} \cdot n \cdot m}{T_{GPON}}, [\text{Гбіт/с}] \quad (2.7)$$

При розподілі корисної та службової інформації у відповідності до поточних стандартів мінімальна та максимальна пропускна здатність становить:

$$C_{ONU \min} = \frac{19440 \cdot 8}{125 \cdot 10^{-6}} = 1.24416 \text{ Гбіт/с}. \quad (2.8.a)$$

$$C_{RB} = \frac{19440 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 8}{125 \cdot 10^{-6}} = 79.62624 \text{ Гбіт/с}. \quad (2.8.б)$$

Запропонована архітектура IPoDWDM для транспортного рівня мережі, дозволяє знизити вимоги до рівня агрегації з точки зору сумісності форматів представлення інформаційних потоків. При використанні IPoDWDM на транспортному рівні, зникає необхідність виведення окремих каналів з транспортних модулів STM-n на рівні доступу, або потреба у виділенні окремих довжин хвиль. Це з одного боку знижує вимоги до синхронізації, а з іншого підвищує коефіцієнт використання пропускної здатності системи за рахунок введення комбінованого методу спектрально-часового мультиплексування (OWTDM – Optical Wavelength Time Division Multiplexing). На рисунку 2.8 представлено відмінності між старою (рис. 2.8 а) та новою (рис. 2.8 б) архітектурами оптичної мережі.

Для того щоб ефективно використовувати пропускну спроможність мережі, і при цьому знизити затримку пакетів у термінальному вузлі OLT пропонується новий метод передавання зі спектрально-часовим мультиплексуванням каналів (OWTDM – Optical Wavelength-Time Division

Multiplexing). Даний метод полягає у формуванні на виході крайового вузла спектрально-часової ресурсної сітки []. Перевагою даного методу є можливість зміни кількості ресурсних елементів, які виділяються для одного користувача, що забезпечує гнучкість в керуванні пропускнуою здатністю каналу та покращує масштабованість мереж доступу.

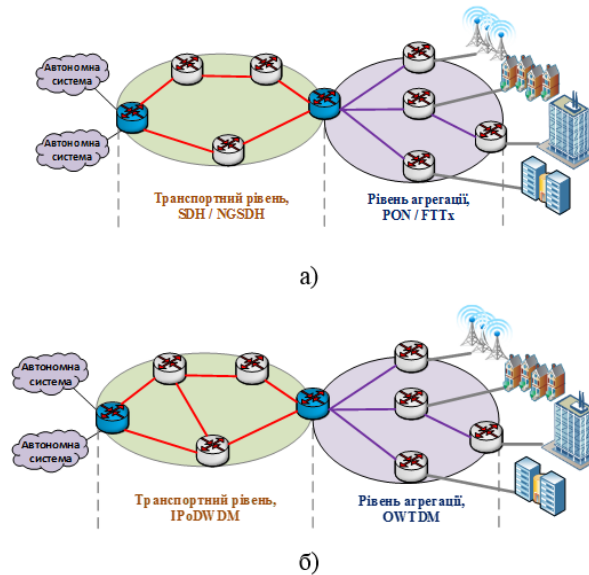


Рис. 2.8. Архітектура оптичної мережі SDH/PON та запропонована архітектура IPoDWDM/OWTDM.

Фізично це не ускладнює процес передавання, оскільки для оптичного волокна характеристики сигналу OWTDM аналогічні до характеристик звичайного сигналу WDM. Проте на каналному рівні дані розподіляються по ресурсним елементам які представляються у вигляді часових символів на окремих довжинах хвиль (рис. 2.9).

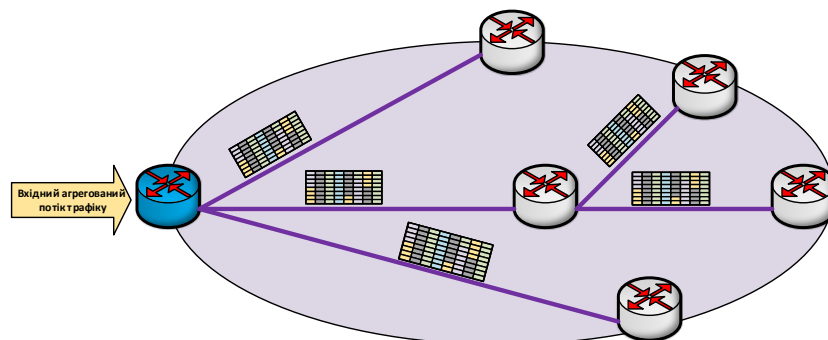


Рис.2.9. Структурна схема організації потоків в оптичних мережах доступу.

### 2.3. Алгоритм мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки

Вхідний агрегований потік IP-пакетів подається на класифікатор, який формує з нього окремі абонентські потоки IP-пакетів, які мають різні адреси призначення та вимоги до пропускної здатності. Після цього, пристрій керування ресурсами розподіляє потоки по ресурсних елементах в залежності від вимог до пропускної здатності.

Для усунення недоліків мереж Gigabit Ethernet, запропонований метод OWTDM, який передбачає формування спектрально-часової ресурсної сітки, що дозволяє адаптивно регулювати пропускну здатність для окремих користувачів. Практично цей метод реалізується на основі існуючих пасивних оптичних мереж, з незначною видозміною каналного рівня. Структурно-функціональні схеми вузлів OLT та ONU представлено на рис. 2.10 [14].

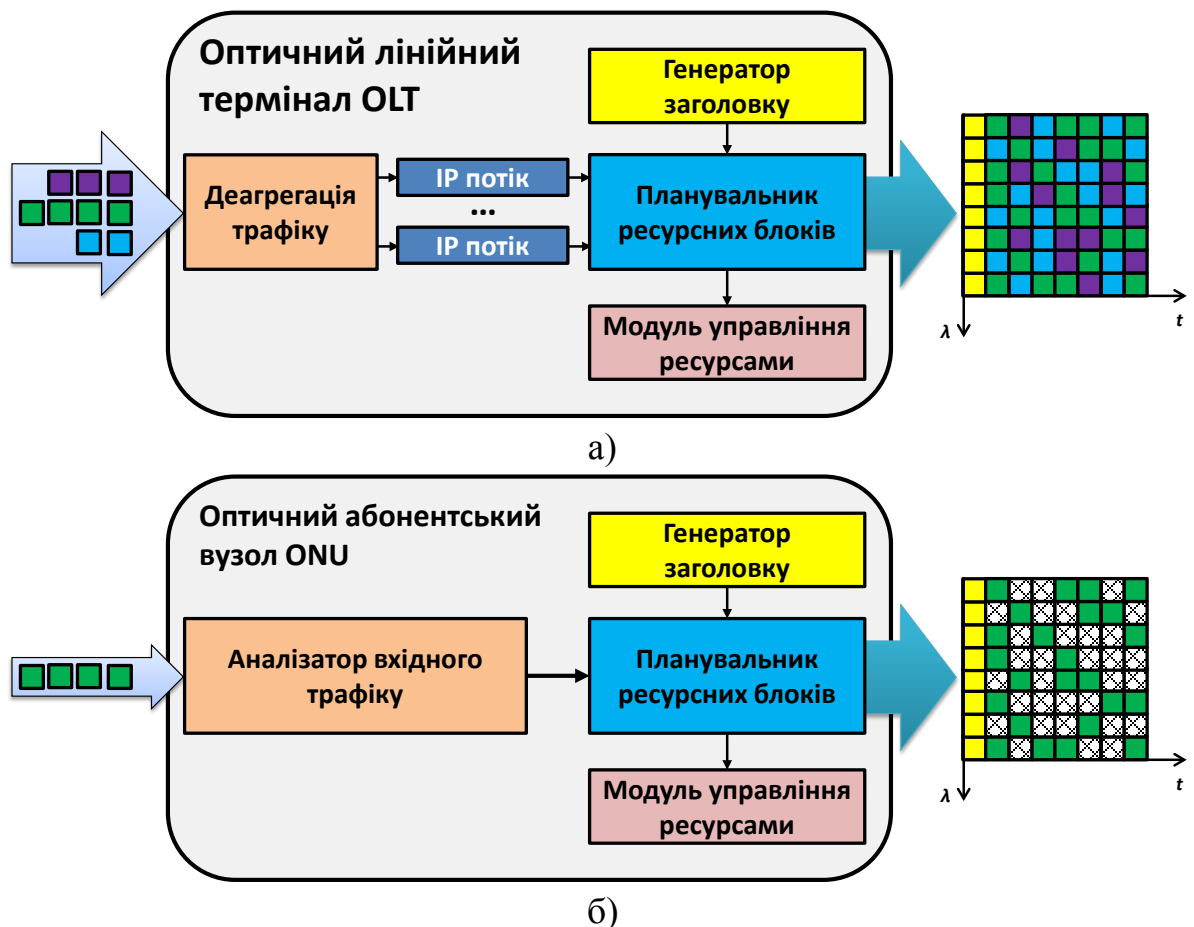


Рис. 2.10. Структурно-функціональна схема вузла OLT – а) та ONU – б).

Структура запропонованого ресурсного блоку представлена на рис. 2.11.

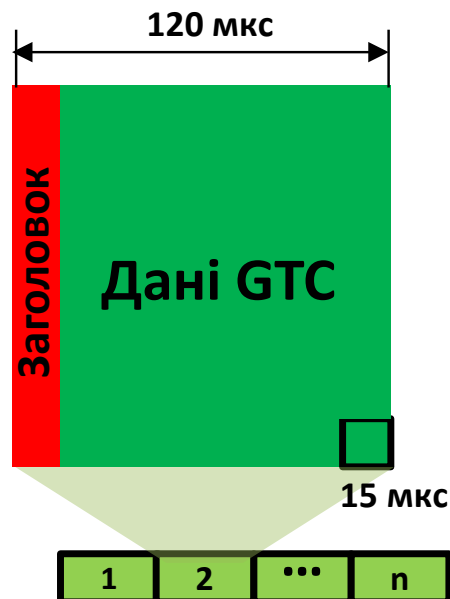


Рис. 2.11. Запропонована структура універсального ресурсного блоку.

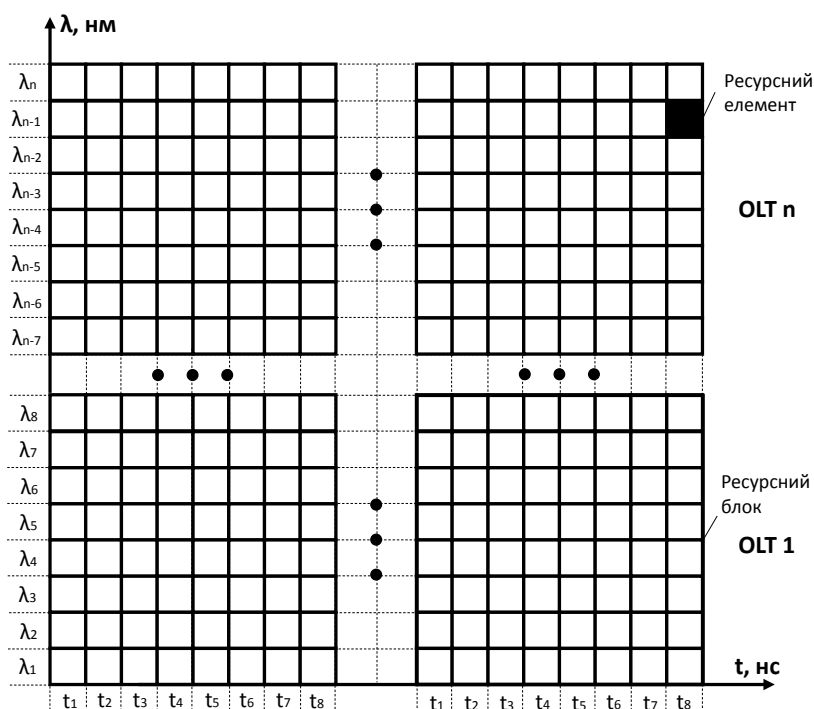


Рис.2.12. Організація спектрально-часових ресурсів конвергентної оптичної мережі доступу

Як зображено на рисунку 2.12, дані окремих користувачів розподіляються по часових інтервалах та довжинах хвиль, відповідно. Дані, які призначені для різних OLT передаються різними наборами довжин хвиль які не



перекриваються між собою, і можуть передаватись паралельно в одному волокні у транспортних сегментах мережі.

## **2.4. Модель конвергенції фіксованих та мобільних мереж доступу**

Важливим аспектом, який необхідно враховувати при розподілі пропускної здатності між комірками гетерогенних мереж мобільного зв'язку, є тип послуг, який переважає в поточний момент часу. В мережах GSM переважає голосовий трафік, який потребує фіксованої бітової швидкості. Тому для таких комірок необхідна пропускна здатність опорної мережі прямо пропорційно залежить від поточної кількості абонентів. Натомість, в сучасних мережах LTE та перспективних мережах 5G, основна частка трафіку припадає на передавання пакетних даних, що призводить до значного розкиду значень пропускної здатності абонентів. В роботі пропонується нова модель конвергенції опорної транспортної мережі гетерогенних мереж мобільного зв'язку з існуючою пасивною оптичною мережею. Запропонована модель враховує нестационарність трафіку в комірках мережі мобільного зв'язку та його періодичні статистичні характеристики, що дає змогу підвищити ефективність розподілу пропускної здатності. Враховуючи 15 різних значень спектральної ефективності радіоканалів LTE, сумарний обсяг трафіку у комірці може змінюватись у значному діапазоні, в залежності від поточного розташування абонентів. Крім того, частка службової інформації в радіоінтерфейсі LTE зростає пропорційно з кількістю абонентів. Приймаючи до уваги те, що в LTE абонент може використовувати усю доступну пропускну здатність комірки, очевидно, що необхідна пропускна здатність опорної мережі обернено пропорційно залежить від кількості абонентів у комірці. Додатковим фактором, який враховується у запропонованій моделі є процес хендоверу, який генерує до 10% від загального обсягу трафіку в опорній транспортній системі. Крім того, модель також враховує додатковий службовий трафік для тунелювання

пакетів на транспортному рівні зі збереженням IP-адреси абонента, частка якого становить близько 15% [24].

Для спрощення моделі, прийmemo, що частотні ресурси комірки рівномірно розподілені між усіма активними абонентами. В такому випадку, сумарна пропускна здатність комірки розраховується наступним чином:

$$C_{ком} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \cdot W \cdot Seff_i, \quad (2.9)$$

де  $N$  – кількість абонентів у комірці,  $W$  – сумарна частотна смуга доступна для комірки,  $Seff_i$  – спектральна ефективність  $i$ -го абонента. Для спрощення, прийmemo, що пропускна здатність комірки у низхідному та висхідному каналі є однаковою. Тоді, мінімальне необхідне значення пропускної здатності для опорної мережі комірки у низхідному каналі розраховується у відповідності до виразів (2.8) та (2.9) наступним чином:

$$C_{onDL} = \left[ \frac{k_{X2} \cdot k_t \cdot C_{ком}}{C_{ONU\ min}} \right] \cdot C_{ONU\ min}, \quad (2.10)$$

де  $k_{X2}$  – коефіцієнт даних хендоверу, який становить від 1.05 до 1.2 в залежності від мобільності абонентів,  $k_t$  – коефіцієнт надлишковості тунелювання пакетів на транспортному рівні, який становить 1.1. Аналогічно, для висхідного каналу пропускна здатність опорної транспортної мережі становить:

$$C_{onUL} = \left[ \frac{k_{X2} \cdot C_{ком}}{C_{ONU\ min}} \right] \cdot C_{ONU\ min}. \quad (2.11)$$

Запропонована модель підтримує тунелювання сигналів від вузлів обробки (BBU) до віддалених радіомодулів в мережах Cloud-RAN. Транспортування здійснюється поверх оптичної мережі в межах спектрально-часових ресурсних блоків, і може співіснувати паралельно із трафіком мереж LTE та фіксованих сегментів доступу. Запропонована модель підтримує підключення

мікрокомірок безпосередньо до вузла BBU для централізованої обробки, використовуючи конвергентну оптичну інфраструктуру.

На рис. 2.13 представлено принцип мультиплексування інформаційних потоків в запропонованій моделі конвергенції опорної транспортної мережі гетерогенних мереж мобільного зв'язку з існуючою пасивною оптичною мережею [13].

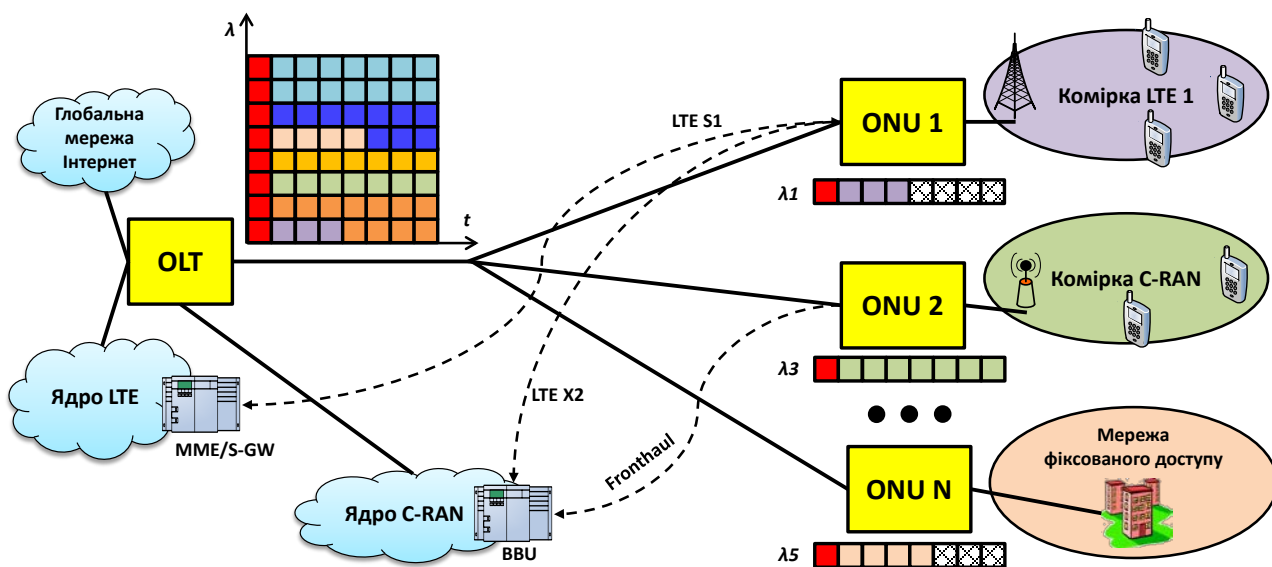


Рис. 2.13. Принцип мультиплексування інформаційних потоків в запропонованій моделі конвергенції оптичної мережі доступу

## 2.5. Методи розподілу пропускної здатності в конвергентних оптичних мережах доступу

### 2.5.1. Методи розподілу пропускної здатності в реальному масштабі часу

Перший метод динамічного розподілу пропускної здатності був запропонований у [125]. Особливістю даного методу є почергове опитування із адаптивною тривалістю циклу (IPACT – Interleaved Polling with Adaptive Cycle Time). При використанні IPACT, вузол OLT відсилає повідомлення до вузлів ONU до того, як буде отримана відповідь від усіх ONU. Це гарантує

максимальне використання висхідного каналу для вузла OLT. Проте, якщо один з вузлів ONU має довгу чергу вхідних пакетів, висхідний канал може бути зайнятим протягом тривалого часу. В такому випадку, інші вузли отримують менше каналних ресурсів, що спричиняє зниження пропускної здатності для відповідних сегментів. Тому, максимальна пропускна здатність, яка виділяється для вузла ONU обмежується шляхом використання механізму максимального часового вікна.

Усі методи, які базуються на основі IPACT, називаються методами динамічного виділення пропускної здатності в реальному часі, оскільки вони не допускають жодних зупинок в процесі функціонування [126]. Це дає змогу виділяти канал для кожного ONU на його вимогу. На рис. 2.14, зображено схематичну часову діаграму взаємодії OLT та ONU, при використанні методу динамічного виділення пропускної здатності в реальному часі. Вузли ONU відсилають свої пакети по черзі протягом виділеного для них часового вікна, відповідно до вказівок вузла OLT.

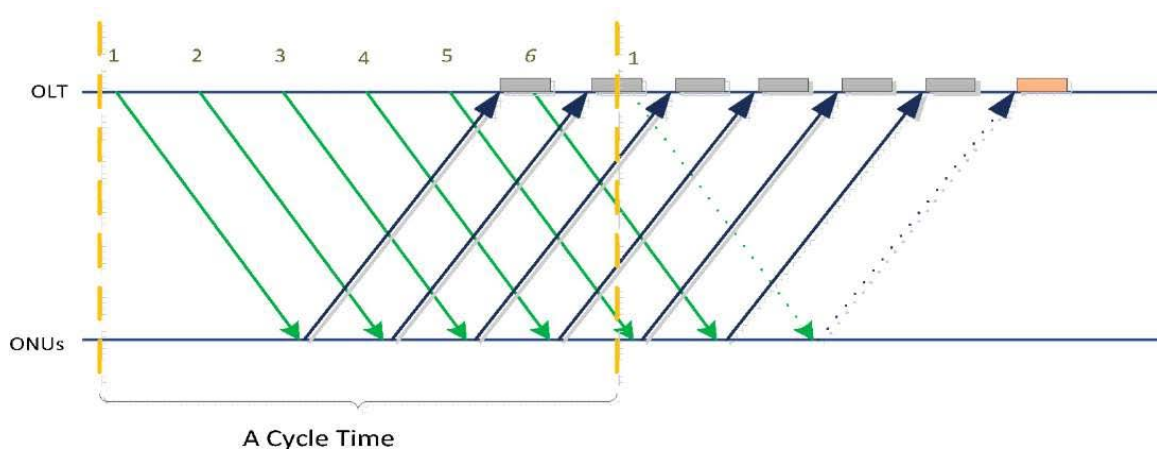


Рис. 2.14. Часова діаграму взаємодії OLT та ONU, при використанні методу динамічного виділення пропускної здатності в реальному масштабі часу

Якщо використання пропускної здатності користувачів відрізняється один від одного, деякі вузли ONU можуть простоювати в той час як інші будуть перевантаженими. В такому випадку, пропускна здатність повинна перерозподілитись між усіма вузлами ONU відповідно до їх поточних потреб.

Проблемою алгоритмів розподілу пропускної здатності реального часу є те, що вони не в змозі розподіляти невикористану пропускну здатність у циклі між перевантаженими вузлами ONU. При збільшенні тривалості часового вікна, можна виділяти для одного ONU достатньо великий обсяг пропускної здатності протягом одного циклу. Проте, в такому випадку пакети від інших ONU будуть доставлені з більшою затримкою у зв'язку із збільшенням часу їх буферизації. Це спричиняє несправедливий розподіл між вузлами ONU, оскільки один з них може істотно домінувати над іншими з точки зору використання пропускної здатності. З іншого боку, при зменшенні максимального розміру часового вікна, більше повідомлень GATE та REPORT буде пересилатись між OLT та ONU, що призведе до значного надлишку службової інформації в мережі.

### **2.5.2. Методи розподілу пропускної здатності в нереальному масштабі часу**

Для того, щоб справедливо розподілити пропускну здатність між високонавантаженими вузлами ONU, запропоновано метод почергового опитування із зупинкою. При використанні даного методу, OLT очікує на повідомлення REPORT від вузлів ONU, протягом одного циклу. Потім, OLT відсилає повідомлення GATE до кожного вузла ONU для розподілу пропускної здатності у наступному циклі. За допомогою даного методу, OLT отримує дані про вимогу пропускної здатності від кожного ONU, ще до початку його обслуговування. Таким чином, OLT має змогу справедливо розподіляти надлишкову пропускну здатність між високонавантаженими вузлами ONU. Проте, такий метод призводить до виникнення порожніх часових інтервалів у висхідному каналі. Тривалість таких часових інтервалів визначається як сума тривалості обчислень в OLT та час обігу петлі (RTT - Round Trip Time) між OLT та ONU. Для спрощення, приймемо однаковий час RTT для всіх ONU:

$$T_0 = RTT + T_{OLT}, \quad (2.12)$$

де  $T_0$  – тривалість порожнього часового інтервалу,  $T_{OLT}$  – затримка обчислень в OLT.

На рис. 2.15. зображено загальний алгоритм функціонування методів розподілу пропускної здатності в нереальному масштабі часу. Після того, як OLT обслуговує вузли ONU, він не може надсилати службові повідомлення GATE протягом часу на обчислення  $T_{OLT}$ . Можливість використання висхідного каналу з'являється лише після того як буде одержана відповідь від ONU, який обслуговувався першим.

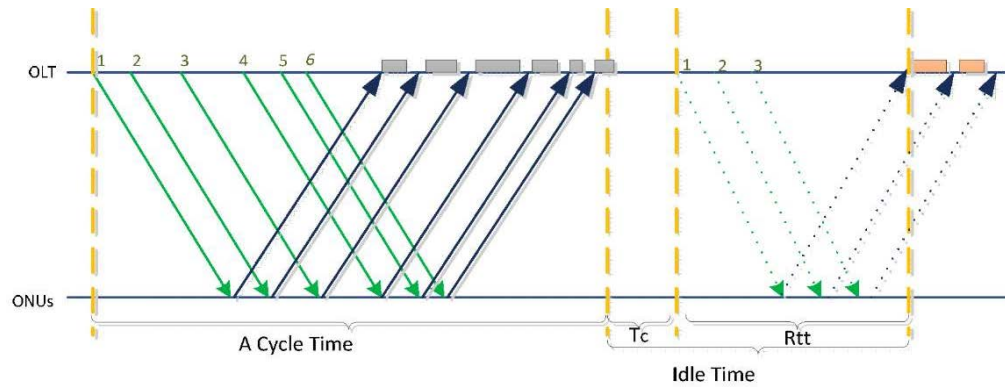


Рис. 2.15. Часова діаграма взаємодії OLT та ONU, при використанні методу динамічного виділення пропускної здатності в нереальному масштабі часу.  
Figure 3.2: Bandwidth allocation for upstream channel in Offline DBA Algorithm

Алгоритм розподілу пропускної здатності нереального часу збирає дані про вимогу пропускної здатності протягом одного циклу. Відповідно, протягом циклу є вузли, які більше завантажені, в той час як деякі вузли завантажені значно менше. Механізм розподілу надлишкової пропускної здатності EBD, розподіляє надлишок пропускної здатності від мало завантажених ONU до перевантажених ONU. Мінімальна пропускна здатність, яка може бути зарезервована для ONU, серед  $N$  вузлів, з використанням EBD розраховується наступним чином:

$$B_i^{MIN} = \frac{(T_{цикл} - N \times T_3)}{N} \times R, \quad (2.13)$$

де  $T_{цикл}$  – тривалість циклу,  $T_z$  – тривалість захисного інтервалу,  $R$  – бітова швидкість передавання даних (біт/с). Відповідно, пропускна здатність, яка виділяється для  $ONU_i$  розраховується наступним чином:

$$B_i = \begin{cases} R_i, & \text{при } R_i < B_i^{MIN} \\ B_i^{MIN}, & \text{при } R_i \geq B_i^{MIN} \end{cases}, \quad (2.14)$$

де  $R_i$  – вимога пропускної здатності  $i$ -го вузла ONU. Справедливий розподіл надлишкової пропускної здатності в циклі між високонавантаженими вузлами ONU здійснюється відповідно до наступних співвідношень:

$$B_i^{надл} = \frac{B_{сум}^{надл} \times R_i}{\sum_{k \in K} R_k}, \quad (2.15)$$

$$B_i = B_i^{MIN} + B_i^{надл}, \quad (2.16)$$

де  $B_i^{надл}$  – надлишкова пропускна здатність, виділена для вузла  $i$ ,  $K$  – кількість високонавантажених вузлів ONU.

В ряді робіт, запропоновано використання резервних часових інтервалів для виділення пропускної здатності вузлам ONU [127-132]. У такому випадку, дані часові інтервали резервуються для малозавантажених вузлів ONU ще до одержання повідомлень REPORT від усіх вузлів ONU. Таким чином, немає потреби розраховувати надлишок пропускної здатності для малозавантажених вузлів ONU. Для даних вузлів ONU, використовуються резервні часові канали, що дає змогу рівномірно розподілити решту пропускної здатності між високонавантаженими вузлами ONU.

Перевагою такого методу є підвищення ефективності обслуговування малозавантажених вузлів ONU. Проте, якщо дані вузли ONU, є перевантаженими, резервні часові інтервали будуть простоювати. Для вирішення даної проблеми, у роботі [133], було запропоновано удосконалення даного алгоритму. При відсутності малозавантажених вузлів ONU, резервні часові інтервали використовуються одним із високонавантажених вузлів.

Альтернативний метод був запропонований у роботі [134]. Даний метод не використовує резервування каналних інтервалів, на відміну від попередніх методів. Натомість вузол OLT виділяє надлишкову пропускну здатність відповідно до потреб вузлів ONU.

Усі вищезазначені методи запропоновані для вирішення проблеми неефективного використання пропускну здатності в алгоритмах розподілу нереального часу. Оскільки дані алгоритми змінюють порядок обслуговування, вони призводять до зміни часу затримки пакетів. Методи запропоновані у роботах [133,134] потребують використання додаткових повідомлень GATE та REPORT, що призводить до надлишку службової інформації у висхідному та низхідному каналі мережі.

Ряд інших методів, використовують передбачення розміру черги для того щоб оцінити час очікування пакетів у буфері ONU. За рахунок цього, ONU передбачає кількість пакетів в буфері під час наступного циклу, і відповідно повідомляє свою вимогу до пропускну здатності висхідного каналу наперед. Таким чином досягається зменшення часу очікування пакетів у буфері вузла ONU [135, 136]. Проте, враховуючи неоднорідність трафіку в локальних мережах, а також мережах мобільного зв'язку, при помилці передбачення може виникнути надлишок пропускну здатності у вузлі, що призведе до відповідного зростання затримки пакетів у інших вузлах ONU.

### **2.5.3. Модель трафіку опорної транспортної мережі для гетерогенних систем мобільного зв'язку**

Хоча транспортна мережа складається з різних типів трафіку від мікрокомірок, більшість трафіку в мережі – це дані призначені для користувачів. Проте, основні витрати припадають на транспортування інформації між сусідніми мікрокомірками. Необхідно зазначити, що в даній роботі ігнорується трафік управління і синхронізації, так як його обсяг



невеликий. Принцип ідеальної системи безпроводного зв'язку передбачає, що процес передавання інформації між БС в макрокомірці повинен бути пов'язаний тільки з пропускною здатністю і середньою спектральною ефективністю в кожній комірці. Для спрощення процесу моделювання, передбачається, що всі мікрокомірці мають однакову пропускну здатність і однакову середню спектральну ефективність.

Трафік в мережі централізованого типу, який передається між базовими станціями та абонентами, можна поділити на два види: uplink (трафік, який передається від абонента до БС) і downlink (від БС до абонента). Пропускна здатність uplink мікро-БС визначається як:

$$T_{micro-up}^{cen} = 0.04 \times B_{micro}^{cen} \times S_{micro}^{cen} \quad (2.17)$$

де  $B_{micro}^{cen}$  – ширина смуги пропускання мікро-БС;  $S_{micro}^{cen}$  – середня спектральна ефективність мікро-БС.

В свою чергу, downlink передається через інтерфейс S1 в транспортних каналах мережі і шукається як:

$$T_{micro-down}^{cen} = (1 + 0.1 + 0.04) \times B_{micro}^{cen} \times S_{micro}^{cen} \quad (2.18)$$

Пропускна здатність uplink макро-БС визначається як:

$$T_{macro-up}^{cen} = 0.04 \times B_{macro}^{cen} \times S_{macro}^{cen} \quad (2.19)$$

де  $B_{macro}^{cen}$  – ширина смуги пропускання макро-БС;

$S_{macro}^{cen}$  – середня спектральна ефективність макро-БС.

Downlink розраховується за формулою:

$$T_{macro-down}^{cen} = (1 + 0.1 + 0.04) \times B_{macro}^{cen} \times S_{macro}^{cen} \quad (2.20)$$

Припустимо, що об'єм трафіку, який передається в транспортній мережі, в кожній мікрокомірці врівноважений. Загальна кількість мікроосередків в макрокомірці -  $N$ . Загальна пропускна здатність uplink транспортної мережі в централізованій архітектурі розраховуються як:

$$T_{\Sigma-up}^{cen} = N \times (T_{micro-up}^{cen} + T_{macro-up}^{cen}) \quad (2.21)$$

Загальна пропускна здатність downlink транспортної мережі в централізованій архітектурі:

$$T_{\Sigma-down}^{cen} = N \times (T_{micro-down}^{cen} + T_{macro-down}^{cen}) \quad (2.22)$$

Як наслідок, загальна пропускна здатність транспортної мережі центральної структури підсумовуються:

$$T_{\Sigma}^{cen} = T_{\Sigma-up}^{cen} + T_{\Sigma-down}^{cen} \quad (2.23)$$

У розподіленій структурі, сусідні мікрокомірки спільно направляють трафік до специфічних мікро-БС. Цей трафік – це не тільки дані синхронізації і управління, але і призначені для користувача дані. Суміжна множина мікрокомірок структурована в так званий кластер і число сусідніх мікроосередків в кластері позначається як  $K$ . Специфічна БС, яка збирає весь транзитний трафік з сусідніх комірок, сюди не входить. Отже, формула для визначення спектральної ефективності такого кластера має вигляд:

$$S_{micro}^{cl} = (K - 1) \times S_{micro}^{dist} \quad (2.24)$$

де  $S_{micro}^{dist}$  – спектральна ефективність однієї мікрокомірки в кластері.

Пропускна спроможність uplink такого кластера мікро-БС визначається як:

$$T_{micro-up}^{dis} = 1.14 \times B_{micro}^{dis} \times S_{micro}^{dist} \quad (2.25)$$

де  $B_{micro}^{dis}$  – ширина смуги пропускання мікро-БС.

Пропускна спроможність downlink кластера дорівнює:

$$T_{micro-down}^{dis} = 1.14 \times B_{micro}^{dis} \times (S_{micro}^{dist} + S_{micro}^{cl}) \quad (2.26)$$

Таким чином, загальна пропускна здатність транспортної мережі розподіленої структури:

$$T_{\Sigma}^{dis} = K \times (T_{micro-up}^{dis} + T_{micro-down}^{dis}) \quad (2.27)$$

## 2.5.4. Метод балансування трафіку між сегментами мережі доступу з урахуванням їх взаємозв'язності

В розділі запропоновано метод балансування трафіку між окремими сегментами мережі доступу, який враховує ступінь зв'язності вимог до пропускної здатності окремих сегментів мережі. Врахування зв'язності сегментів дає змогу оцінити, яким чином зміна інтенсивності трафіку в одному сегменті впливає на інтенсивність трафіку інших пов'язаних сегментів. Метод балансування трафіку перерозподіляє інформаційні потоки від малоавантажених ONU до перевантажених ONU між взаємопов'язаними сегментами (рис. 2.16) [5, 12]. Таким чином, досягається підвищення сумарної ефективності використання пропускної здатності у конвергентній оптичній мережі доступу.

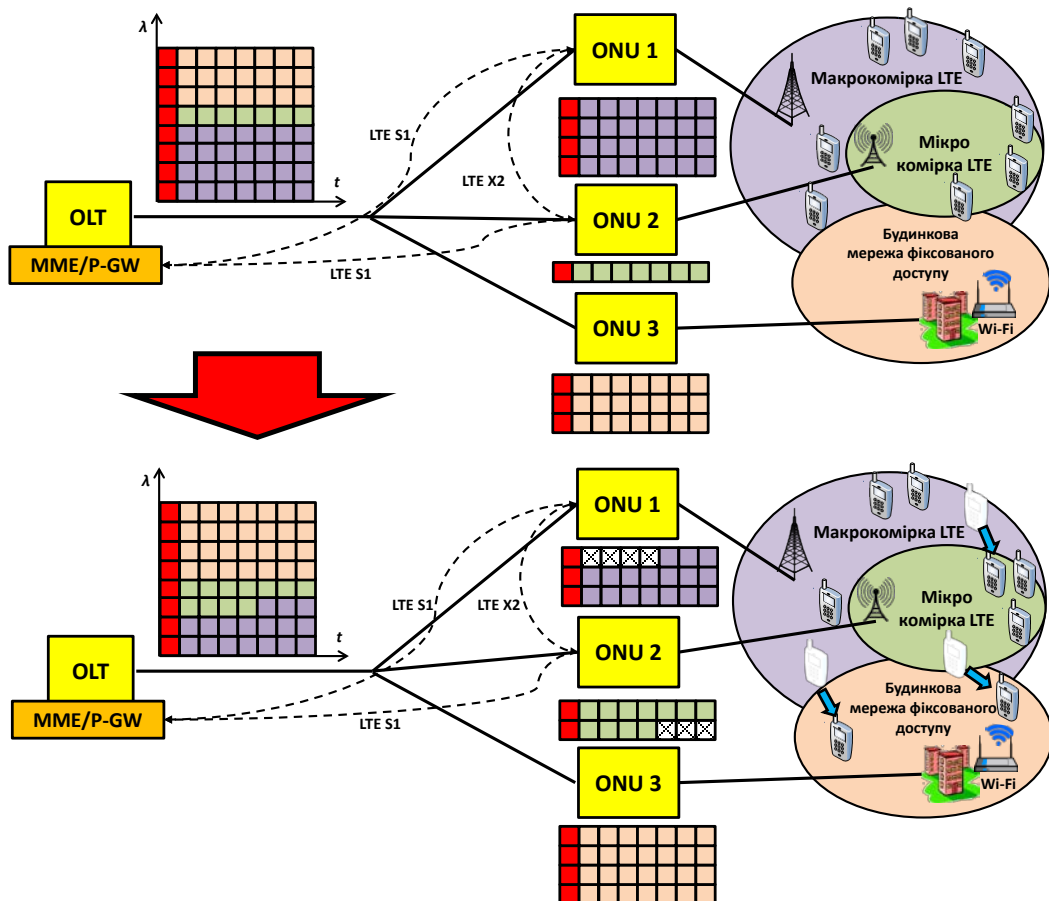


Рис. 2.16. Функціональна схема методу балансування трафіку між взаємопов'язаними сегментами конвергентної мережі доступу.

При балансуванні трафіку між сегментами доступу в конвергентній мережі вузол OLT аналізує ступінь зв'язності сегментів. Зміна інтенсивності навантаження в одному з сегментів частково може впливати на навантаження у взаємопов'язаних сегментах. Взаємопов'язані сегменти територіально перекриваються між собою, наприклад: макрокомірка-мікрокомірка, макрокомірка-житловий будинок, тощо.

### 2.5.5. Алгоритм групування потоків опорної транспортної мережі при здійсненні хендоверу в мережі мобільного зв'язку

Для зниження обсягу надлишкового трафіку, який генерується при хендоверах, в запропонованій моделі передбачено механізм багатоадресного передавання даних до кількох комірок одночасно. Після одержання запиту на хендовер, OLT виділяє однакові ресурсні елементи для даних поточної та цільової комірки. Таким чином, при здійсненні процедури хендоверу, зникає необхідність передавання даних абонента між комірками, оскільки ці дані вже заздалегідь відомі для комірки на момент здійснення хендоверу (рис. 2.17) [5].

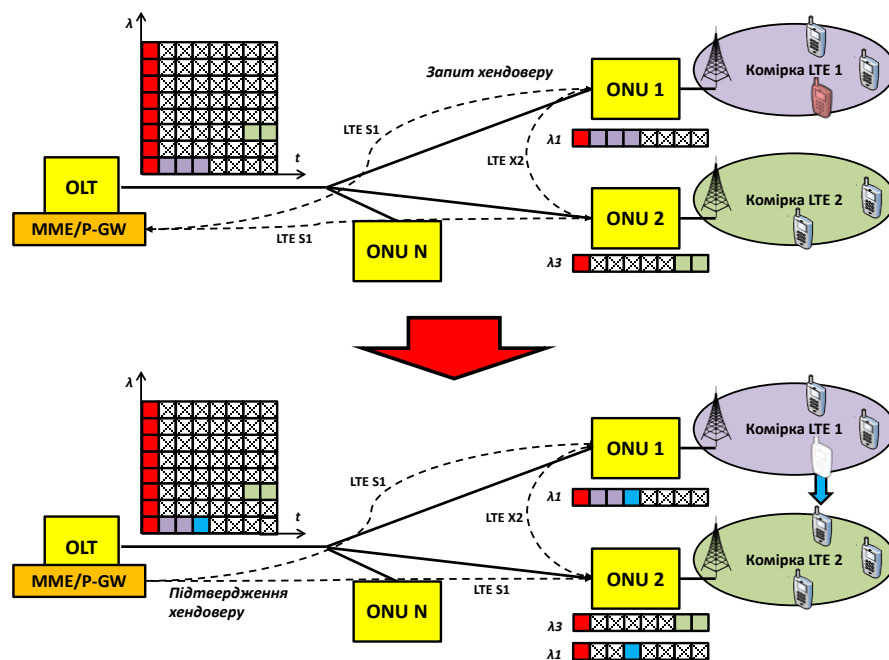


Рис. 2.17. Функціональна схема процесу мультиплексування даних при виконанні процедури хендоверу в мережі мобільного зв'язку.

Таким чином, пропускна здатність для опорної мережі при використанні даного алгоритму розраховується за наступними формулами:

$$C_{on UL} = \left[ \frac{C_{ком}}{C_{ONU min}} \right] \cdot C_{ONU min} \quad (2.28)$$

$$C_{on DL} = \left[ \frac{k_t \cdot C_{ком}}{C_{ONU min}} \right] \cdot C_{ONU min} \quad (2.29)$$

Запропонований алгоритм групування потоків опорної транспортної мережі функціонує за наступною послідовністю:

1. При здійсненні процедури хендоверу базова станція передає запит до ММЕ через інтерфейс S1.
2. ММЕ визначає цільову базову станцію, і повідомляє обидві залучені станції про підтвердження хендоверу.
3. Якщо обидві станції обслуговуються одним OLT, то їм виділяються спільні ресурсні елементи, в який передаються дані потрібного абонента.
4. При такому алгоритмі зникає необхідність передавати дані абонента між базовими станціями по інтерфейсу X2.

## 2.6. Висновки до 2-го розділу

Удосконалено модель розподілу каналних ресурсів у пасивних оптичних мережах доступу із спектральним ущільненням каналів шляхом групування спектрально-часових ресурсних блоків для абонентської та службової інформації, що дає змогу підвищити ефективність використання пропускної здатності мережі за рахунок зменшення обсягу службового трафіку.

Розроблено модель конвергенції фіксованих та мобільних мереж доступу, яка, на відміну від існуючих, враховує нестационарність абонентського трафіку в комірках мереж мобільного зв'язку та його періодичні статистичні характеристики, що дає можливість підвищити ефективність розподілу

каналних ресурсів в оптичній мережі доступу. Запропоновано модифіковану архітектуру конвергентної мережі доступу, яка дає змогу мультиплексувати радіосигнали через оптичні канали зв'язку в структурі спектрально-часових ресурсних блоків, що дає змогу розгорнути мережі LTE та Cloud-RAN на основі спільної опорної транспортної інфраструктури.

Запропоновано метод балансування трафіку між окремими сегментами мережі доступу, який, на відміну від існуючих, враховує ступінь зв'язності вимог до пропускної здатності окремих сегментів мережі, що дає змогу підвищити сумарну ефективність використання пропускної здатності у конвергентній оптичній мережі доступу. На основі запропонованого методу розроблено алгоритм групування інформаційних потоків комірок мобільного зв'язку при здійсненні хендоверу, який дає змогу знизити обсяг надлишкового трафіку в конвергентній мережі доступу до 20 % в залежності від поточної мобільності абонентів.

# РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕДАВАННЯ ПАКЕТНОГО ТРАФІКУ В КОНВЕРГЕНТНИХ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ ДОСТУПУ

## 3.1. Дослідження статистичних характеристик трафіку мережі мобільного зв'язку за допомогою мережних аналізаторів

Для визначення впливу типу сервісів у фіксованих та мобільних мережах на характеристики трафіку, необхідно провести дослідження процесу передавання інформаційних потоків за допомогою мережних аналізаторів. Для даної роботи використано програмне забезпечення CommView та Wireshark, які дозволяють перехоплювати інформаційні потоки, які проходять через мережний інтерфейс. Програмне зпбезпечення CommView використовувалось для аналізу співвідношення пакетів за розміром, а також за протоколами мережного, транспортного та прикладного рівнів. Програма Wireshark дозволяє зібрати статистику інтенсивності мережного трафіку та представити її у вигляді графічної залежності. Структурна схема експериментальної мережі, для дослідження статистичних характеристик трафіку, представлена на рис. 3.1.



Рис. 3.1. Структурна схема експериментальної мережі для дослідження статистичних характеристик трафіку.

Розроблена тестова модель мережі дає змогу фільтрувати трафік за наступними критеріями: протоколи прикладного, транспортного та мережного рівнів, номери портів, призначення пакетів, тощо. Для дослідження впливу різних сервісів отримано статистичні залежності трафіку при використанні трьох основних типів послуг, які переважають у мережах мобільного зв'язку четвертого покоління: веб-сервіси, потокове відео та IP телефонія, частки яких становлять 30%, 55% та 15%, відповідно. Для кожного з типів сервісів визначено співвідношення пакетів за розмірами та протоколами, і побудовано діаграми для різних рівнів моделі ISO/OSI.

### **3.1.1. Дослідження статистичних характеристик трафіку в мережі мобільного зв'язку для веб-сервісів**

Для аналізу трафіку веб-серфінгу, проведено моделювання поведінки абонентів мобільного зв'язку при перегляді веб-сторінок в соціальних мережах. Особливістю веб-серфінгу по ресурсах соціальних мереж є наявність значної кількості мультимедійного контенту. Згідно проведених досліджень, близько 40% користувачів соціальної мережі «Facebook» в процесі перегляду оновлень та спілкування в різноманітних спільнотах, прослуховують аудіозаписи, що спричиняє додаткове навантаження на мережу. Крім того веб-сторінки «Facebook», як і у інших соціальних мережах насичені великою кількістю високоякісних зображень, зокрема фотографій, якими користувачі діляться у колах свої друзів. Це спричиняє зростання обсягу веб-сторінок до кількох мегабайт, що в майже вдсятеро більше від типової сторінки пошукової системи Google. Результати аналізу сумарної інтенсивності трафіку, який пройшов через мережний інтерфейс при перегляді веб-сторінок протягом 30 хвилин, показані на рисунку 3.2.



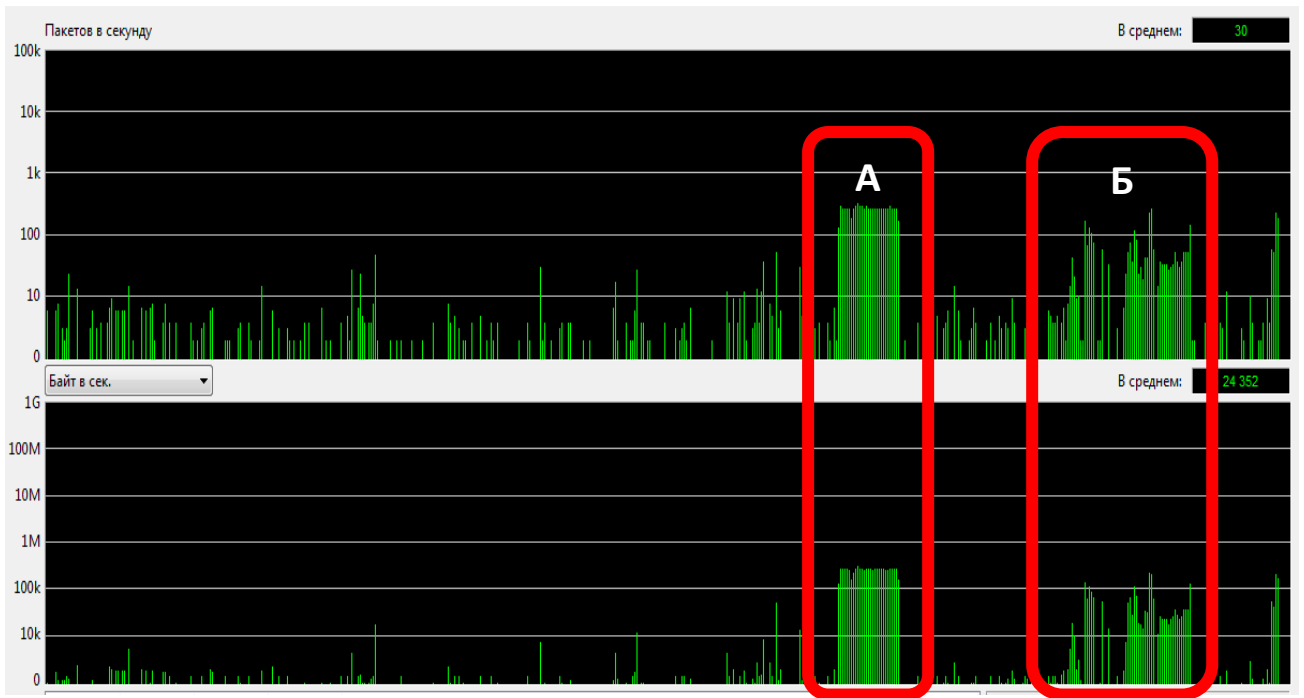


Рис. 3.2. Інтенсивність трафіку на мережному інтерфейсі при веб-серфінгу

З рис.3.2 легко можна визначити моменти різкого зростання інтенсивності трафіку, зумовлені прослуховуванням аудіозаписів (інтервал А) та переглядом альбому фотографій високої якості (інтервал Б).

Після статистичного аналізу усіх пакетів, які пройшли через мережний інтерфейс отримано дані про сумарний обсяг даних (табл. 3.1) та їх співвідношення по призначенню (рис.3.3).

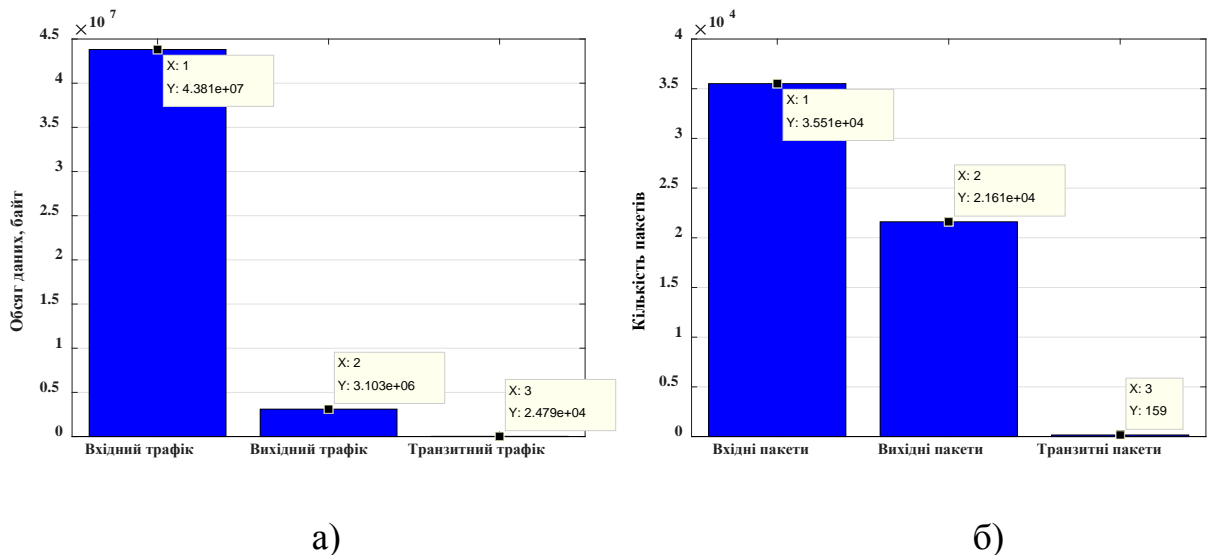


Рис. 3.3. Діаграми співвідношення трафіку за призначенням по обсягу даних – а) та по кількості пакетів – б)

## Статистичні параметри інтенсивності трафіку веб-сторінок

Середня інтенсивність надходження, пакетів/с	30
Середня інтенсивність трафіку, байт/с	24352
Загальна кількість, пакетів	57253
Загальний об'єм даних, байт	46998806

Для визначення співвідношення за типами данограм при веб-серфінгу в соціальних мережах, було проведено сортування даного потоку, з використанням фільтрів мережного рівня. На рис.3.4 представлено кругову діаграму відсоткового співвідношення данограм за протоколами мережного рівня. Результати показали, що 98% пакетів Ethernet інкапсулюють данограми IPv4, які містять дані призначені застосуванням кінцевого користувача.

Невелика частина (лише 1,65%) є данограмами IPv6, які використовуються при зверненні до DNS-серверів, що розташовані сегментах IPv6, і необхідні для коректної роботи механізмів контекстної трансляції NAT-PT (Network Address Translation and Protocol Translation) та трансляції доменних імен для шлюзів прикладного рівня DNS-ALG (Domain Name Service for Application Layer Gateway).

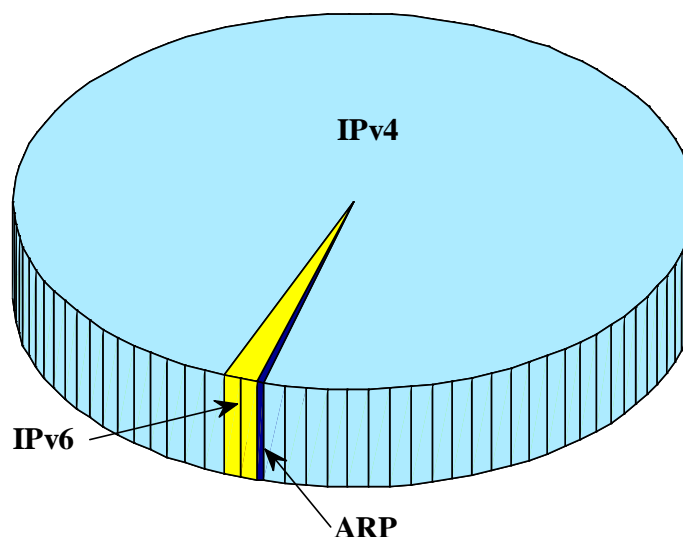


Рис. 3.4. Діаграма співвідношення кількості данограм за мережними протоколами для трафіку веб-сторінок

Приблизно 0,35 % від усіх данограм, становлять данограми протоколу ARP (Address Resolution Protocol), які містять інформацію про IP-адреси вузлів призначення. При пошуку необхідної фізичної адреси вузла призначення, вузол ініціатор розсилає ширококомвні кадри Ethernet з інкапсульованою ARP-данограмою. Всі вузли локальної мережі отримують даний ARP-запит і порівнюють зазначену там IP-адресу із власною. У разі їх збігу вузол призначення формує ARP-відповідь, у якій вказує свою IP-адресу та MAC-адресу, і відправляє його безпосередньо на MAC-адресу вузла ініціатора.

Мережний рівень відповідає лише за пересилання данограм між вузлами мережі. Для того щоб описати взаємодію між прикладними процесами, необхідно проаналізувати співвідношення данограм за протоколами транспортного рівня при перегляді веб-сторінок.

Основним протоколом для передавання данограм між прикладними процесами при веб-серфінгу є протокол TCP (Transmission Control Protocol). Його частка становить 97,24% від загальної кількості данограм. Це пояснюється тим, що TCP є протоколом із гарантованою доставкою кадрів за рахунок використання механізму квітування у поєднанні із алгоритмом «ковзного вікна», що дозволяє забезпечити коректне завантаження веб-сторінок у браузері кінцевого користувача. Лише 2,68 % данограм передані з використанням протоколу UDP (User Datagram Protocol). Цей протокол не вимагає підтвердження коректної доставки данограм і використовується у даному випадку для передавання данограм, призначених системним процесам. Зовсім невелика частина припадає на кадри повідомлень про помилки ICMP (Internet Control Message Protocol) та ICMPv6 – 0,2% та 0,3%, відповідно. Кругова діаграма співвідношення протоколів транспортного рівня показана на рис. 3.5.

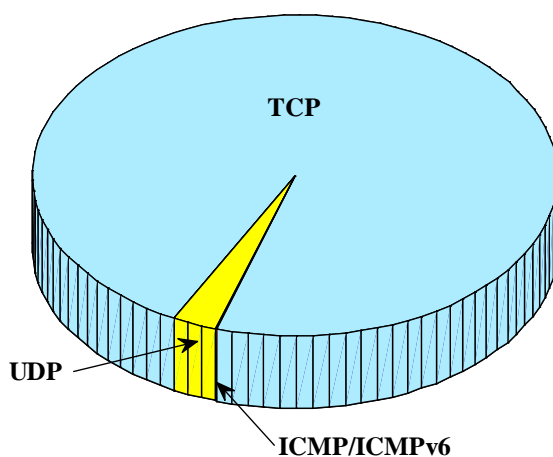


Рис. 3.5. Діаграма співвідношення кількості данограм за протоколами транспортного рівня для трафіку веб-сторінок

Для безпосередньої взаємодії користувача із прикладними процесами використовуються протоколи прикладного рівня. Основними протоколами передавання даних на прикладному рівні є HTTP (HyperText Transfer Protocol) та його захищена версія HTTPS (HTTP Secure). Ці протоколи відповідають за передавання веб-сторінок до прикладного процесу браузера. Саме тому при веб-серфінгу ці два протоколи складають 96 % усіх переданих данограм.

Частка пакетів з невизначеним протоколом становить 3,28%. До таких даних, переважно, відносяться фонові потоки оновлення антивірусних або інших прикладних програмних пакетів, оновлення електронної пошти та інші прикладні процеси. Вони можуть використовувати протокол передавання файлів FTP (File Transfer Protocol), а також протоколи доступу до електронної пошти SMTP (Simple Mail Transfer Protocol), POP3 (Post Office Protocol Version 3) та IMAP (Internet Message Access Protocol).

Протокол DNS використовується лише для трансляції доменних імен в IP-адреси серверів, і не приймає участі в процесі пересилання файлів. Тому його частка є відносно невеликою. Незначна частина пакетів використовує протокол NetBIOS (Network Basic Input/Output System). Це стандартний протокол, який використовується в операційних системах Windows, і відповідає за логічні імена комп'ютерів у мережі. NetBIOS є стандартним інтерфейсом

розробки застосувань API (Application Programming Interface) для забезпечення мережних операцій вводу/виводу й керування транспортними протоколами нижчого рівня. Програми, які використовують NetBIOS API інтерфейс, можуть працювати тільки при наявності даного протоколу. Кругова діаграма співвідношення данограм за протоколами прикладного рівня представлена на рис.3.6.

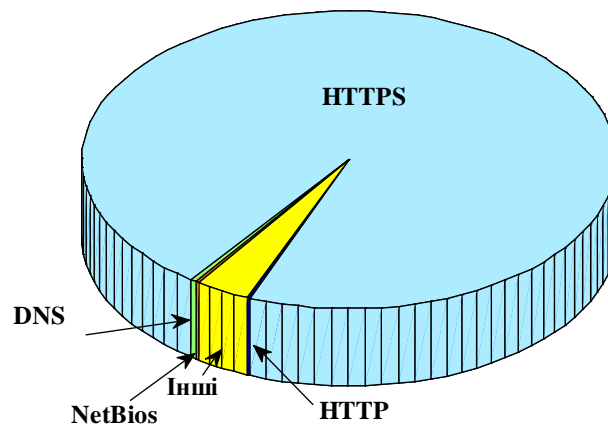


Рис.3.6. Діаграма співвідношення протоколів прикладного рівня для трафіку веб-сторінок.

Розмір типового кадру Ethernet становить від 64 до 1518 байт. З них 12 байт виділяються на MAC-адреси джерела (6 байт) та призначення (6 байт), 2 байти на вказівник інкапсульованого протоколу мережного рівня, 4 байти на поле контрольної суми CRC (Cyclic Redundancy Check). Розмір корисного навантаження становить від 46 до 1500 байт. Для спрощення, приведемо статистичні значення розподілу пакетів за розмірами корисного навантаження на прикладі кругової діаграми (рис.3.7).

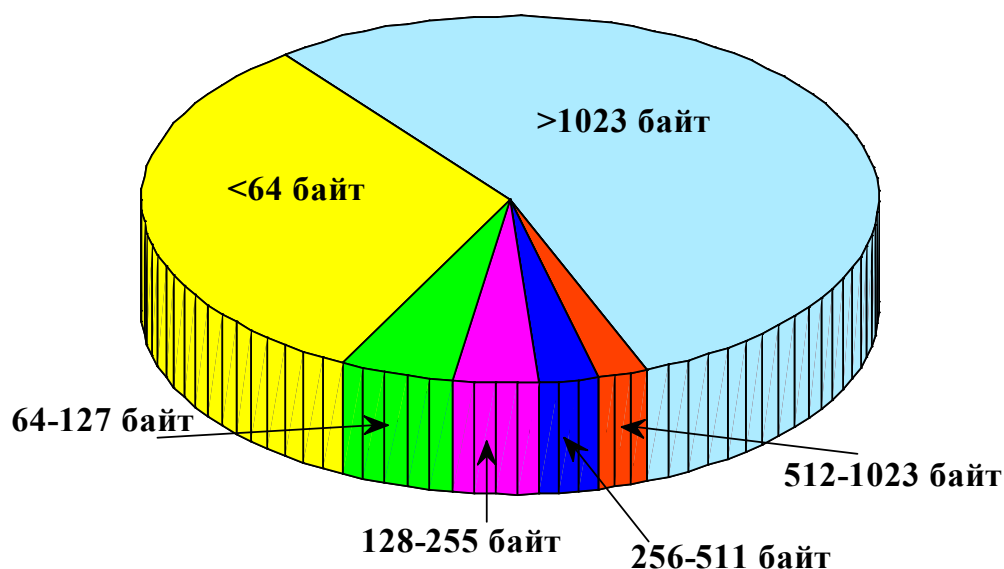


Рис. 3.7. Діаграма співвідношення розмірів пакетів для трафіку веб-сторінок.

### 3.1.2. Дослідження статистичних характеристик трафіку в мережі мобільного зв'язку для сервісів потокового відео

Одним із найпопулярніших сервісів в мережах мобільного зв'язку є перегляд потокового відео. Цей сервіс дозволяє переглядати відеоконтент в режимі онлайн, без попереднього завантаження файлу. Це зумовлює його поширене використання в соціальних мережах, оскільки користувачі можуть обмінюватись новими фільмами шляхом обміну посиланнями URL (Uniform Resource Locator). Крім того, зростання популярності такого виду сервісу зростає з появою нових спільнот для обговорення новин кінематографу та ознайомлення із прем'єрами.

Відеоінформація складається з послідовності нерухомих зображень (кадрів), які відтворюються з частотою 25-60 кадрів/с. При передаванні кожен кадр інтерпретується як об'єднання деякої кількості фіксованих точок (пікселів) з певною яскравістю і кольором. Конкретна швидкість передавання залежить від роздільної здатності (кількості пікселів в кадрі), частоти кадрів (кількості кадрів, що передається за одну секунду) та кількості інформації, якою

описується кожен піксель (біт на піксель). Залежно від необхідної якості відеопотоку, вимоги до пропускної здатності каналу зв'язку, в якому він передається, можуть змінюватися в широкому діапазоні: від одиниць до сотень Мбіт/с.

Саме тому, проведено дослідження процесу перегляду HD (High-Definition) відео у веб-ресурсах соціальних мереж ("Facebook", "YouTube"), та його впливу на характеристики трафіку в мережах мобільного зв'язку. Результати аналізу сумарної інтенсивності трафіку, який пройшов через мережний інтерфейс при перегляді HD-відео протягом 30 хвилин, показані на рисунку 3.8.

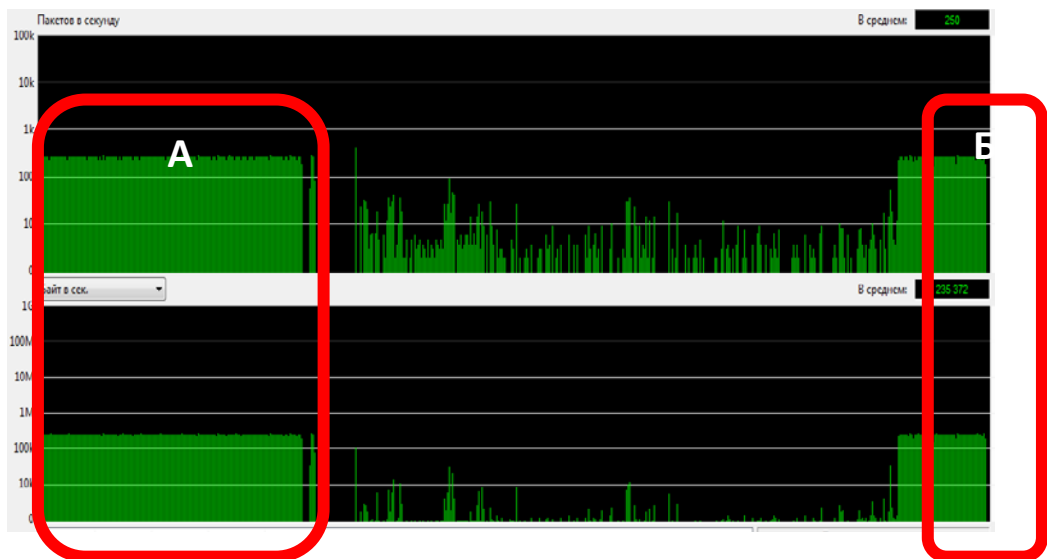


Рис. 3.8. Інтенсивність трафіку на мережному інтерфейсі при перегляді HD-відео

З рис. 3.8 легко можна визначити моменти різкого зростання інтенсивності трафіку, зумовлені періодом першої буферизації відеопотоку під час якої завантажилось 70% пакетів відеофайлу (інтервал А) та періодом другої буферизації під час якої довантажилось решта 30% пакетів відеофайлу (інтервал Б).

Після статистичного аналізу усіх пакетів, які пройшли через мережний інтерфейс отримано дані про сумарний обсяг даних (табл. 3.2).

## Статистичні параметри пакетів для трафіку HD 1080p

Середня інтенсивність надходження, пакетів/с	250
Середня інтенсивність трафіку, байт/с	235 372
Загальна кількість, пакетів	946 338
Загальний об'єм даних, байт	892 295 099

Співвідношення трафіку за призначенням представлено на рис. 3.9.

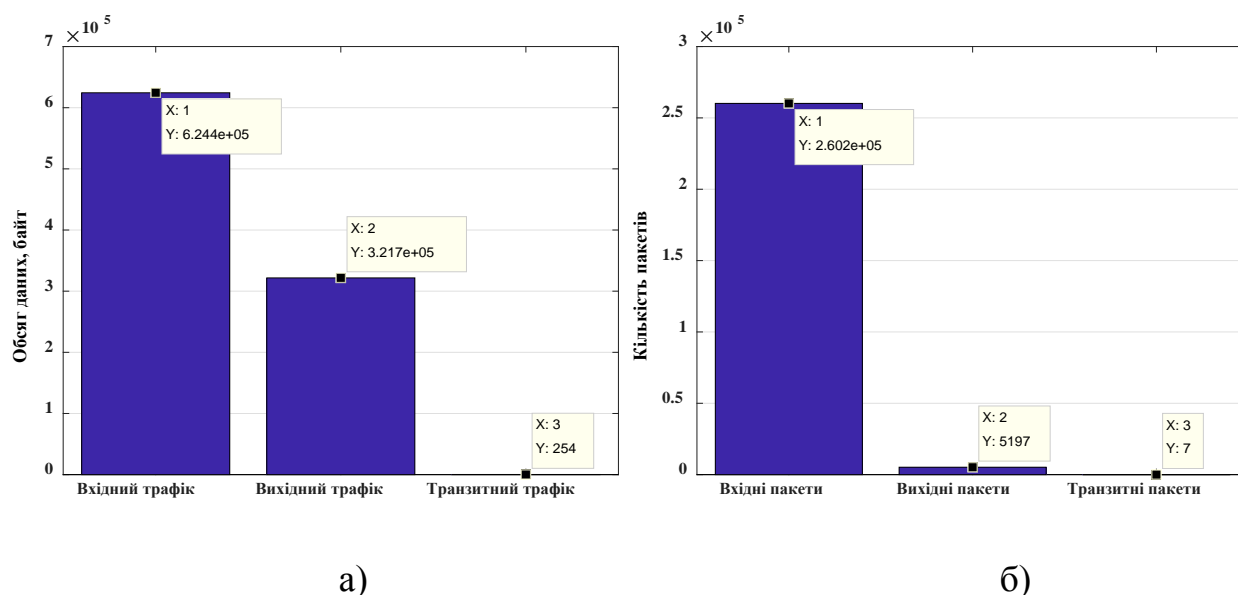


Рис. 3.9. Діаграми співвідношення трафіку за призначенням по обсягу даних – а) та по кількості пакетів – б)

Для визначення співвідношення за типами данограм при перегляді HD-відео в соціальних мережах було проведено сортування даного потоку з використанням фільтрів мережного рівня. На рис.3.10 представлено кругову діаграму відсоткового співвідношення данограм за протоколами мережного рівня.

Результати показали, що 99,69% пакетів Ethernet інкапсулюють данограми IPv4, які містять дані відеопотоку призначені прикладним мультимедійним застосуванням браузера. Невелика частина (0,29%) є данограмами IPv6, які використовуються при зверненні до DNS-серверів, що розташовані сегментах IPv6. Лише 0,02 % від усіх данограм, становлять



данограми протоколу ARP (Address Resolution Protocol), які містять інформацію про IP-адреси вузлів призначення.

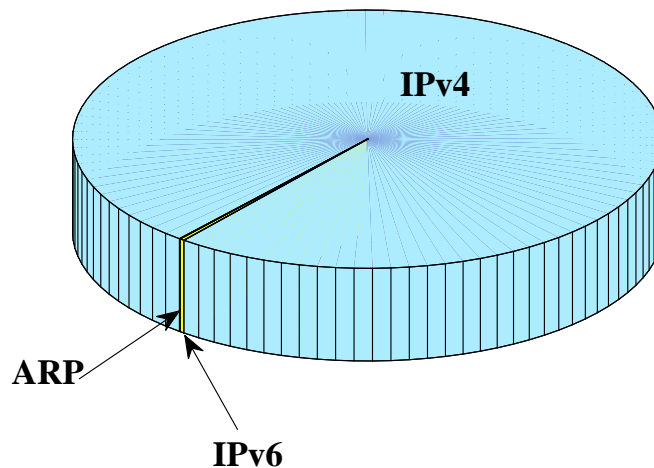


Рис. 3.10. Діаграма співвідношення мережних протоколів для трафіку HD 1080р.

Для того щоб описати взаємодію між прикладними процесами, необхідно проаналізувати співвідношення данограм за протоколами транспортного рівня при перегляді онлайн-відео.

Основним протоколом для передавання данограм між прикладними процесами при перегляді онлайн-відео на веб-сторінках є протокол TCP, як і для звичайного веб-серфінгу. Його частка становить 99,55 % від загальної кількості данограм. Це пояснюється тим, що перегляд відео контенту в режимі онлайн вимагає попередньої буферизації усіх кадрів, і, як наслідок, їх гарантованої доставки. Лише 0,337 % данограм передані з використанням протоколу UDP. Трохи більше 0,1 % данограм становлять кадри повідомлень про помилки ICMP та ICMPv6. Кругова діаграма співвідношення протоколів транспортного рівня показана на рис. 3.11.

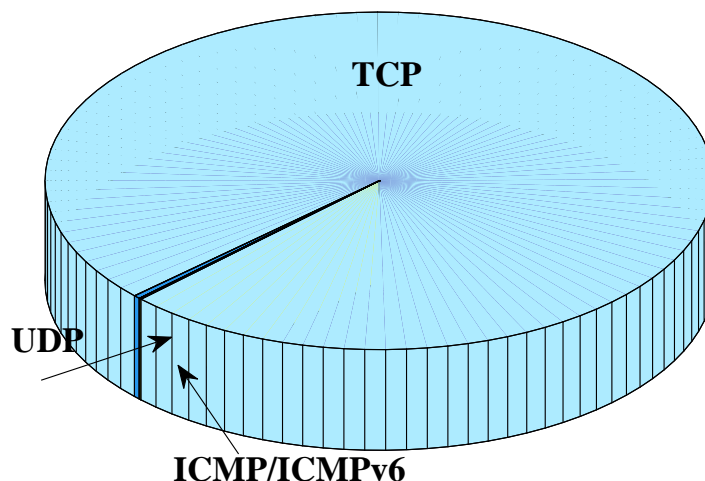


Рис.3.11. Діаграма співвідношення транспортних протоколів для трафіку HD 1080p

Аналізуючи данограми за протоколами прикладного рівня можна побачити, що майже 98% припадає на протокол HTTP, в той час як HTTPS – лише 1,6%. Це можна пояснити тим, що на відміну від веб-сторінок, відео потоки не вимагають захищеного передавання данограм. Тому, в даному випадку трафік HTTP є переважаючим. Кругова діаграма співвідношення данограм за протоколами прикладного рівня представлена на рис.3.12.

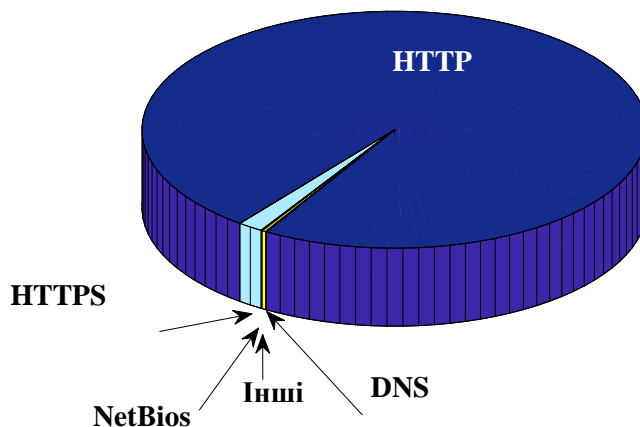


Рис.3.12. Діаграма співвідношення протоколів прикладного рівня для трафіку HD-відео.

Кругова діаграма співвідношення данограм за розмірами представлена на рис.3.13.

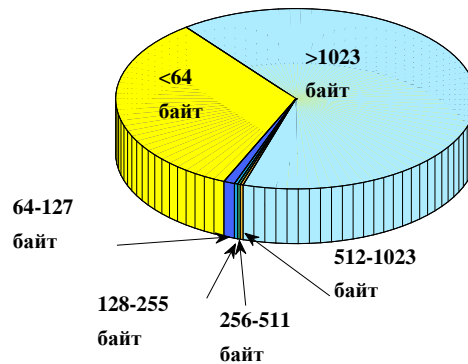


Рис. 3.13. Діаграма співвідношення розмірів пакетів для трафіку HD-відео.

### 3.1.3. Дослідження статистичних характеристик трафіку в мережі мобільного зв'язку для сервісів IP-телефонії

Для дослідження трафіку IP-телефонії використано один з найпоширеніший сервісів Skype. Каталог користувачів Skype розподілений по комп'ютерах користувачів мережі Skype, що дозволяє мережі легко масштабуватися до дуже великих розмірів (в даний момент більше 100 мільйонів користувачів, 15-25 мільйонів онлайн) без дорогої інфраструктури централізованих серверів.

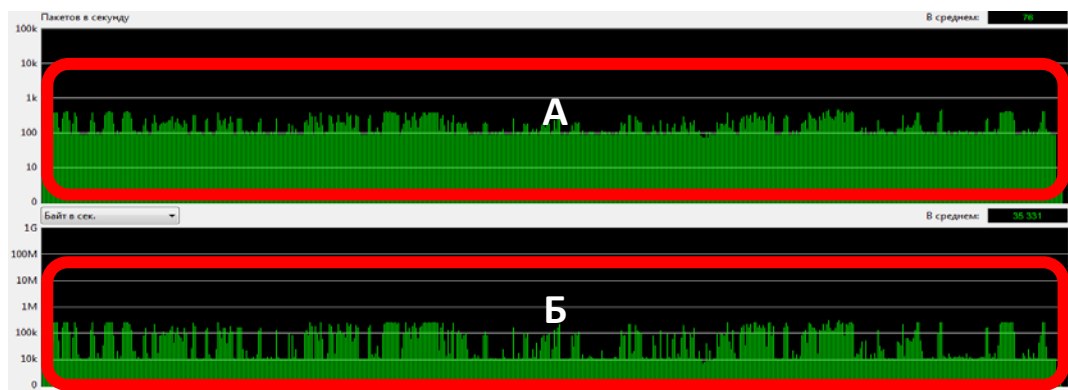
Крім того, Skype може маршрутизувати дзвінки через комп'ютери інших користувачів. Це дозволяє з'єднуватися один з одним користувачам, що знаходяться за NAT або брандмауером, проте створює додаткове навантаження на комп'ютери і канали користувачів, підключених до Інтернету безпосередньо.

Єдиним центральним елементом для Skype є сервер ідентифікації, на якому зберігаються облікові записи користувачів і резервні копії їх списків контактів. Центральний сервер потрібний тільки для установки зв'язку. Після того, як зв'язок встановлений, комп'ютери пересилають голосові дані безпосередньо один одному (якщо між ними є прямий зв'язок) або через Skype-посередник (супервузол – комп'ютер, у якого є зовнішня IP-адреса і відкритий TCP-порт для Skype). Зокрема, якщо два комп'ютери, що знаходяться усередині однієї локальної мережі, встановили між собою Skype-з'єднання, то зв'язок з

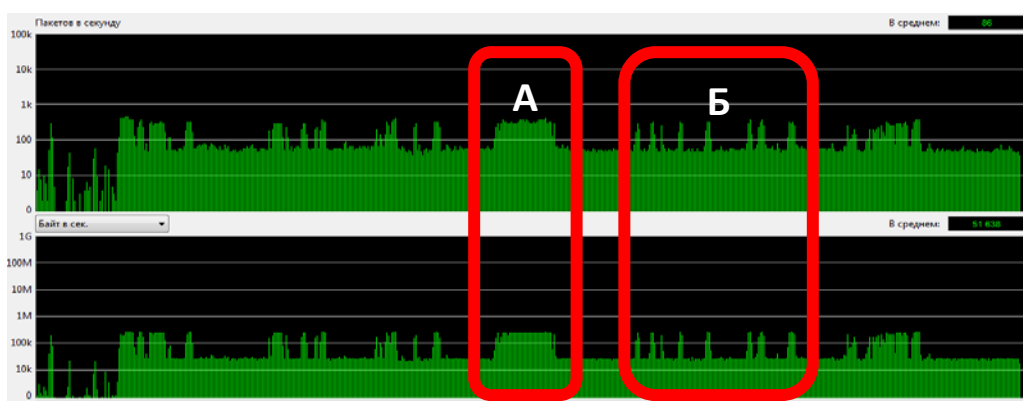
Інтернетом можна перервати і розмова продовжуватиметься аж до її завершення користувачами або якого-небудь збою зв'язку усередині локальної мережі.

Для статистичних досліджень, було проведено сеанси чату та голосового дзвінку, по 30 хвилин кожен. Результати аналізу сумарної інтенсивності трафіку, який пройшов через мережний інтерфейс при користуванні Skype в режимі чату, показані на рисунку 3.14.

З рис.3.14.а можна спостерігати, що пакетний трафік в режимі чату відносно стабільний (інтервал А). Але корисне навантаження пульсує з однаковою амплітудою у моменти пересилання повідомлень (інтервал Б). Результати аналізу при користуванні Skype в режимі розмови, показані на рисунку 3.14.б.



а)



б)

Рис. 3.14. Інтенсивність трафіку на мережному інтерфейсі при користуванні Skype в режимі чату – а) та в режимі розмови – б).

Таблиця 3.3.

Статистичні параметри пакетів для трафіку Skype в режимі чату

Середня інтенсивність надходження, пакетів/с	86
Середня інтенсивність трафіку, байт/с	51 638
Загальна кількість, пакетів	120 356
Загальний об'єм даних, байт	72 242 245

Таблиця 3.4.

Статистичні параметри пакетів для трафіку Skype в режимі розмови

Середня інтенсивність надходження, пакетів/с	76
Середня інтенсивність трафіку, байт/с	35 331
Загальна кількість, пакетів	241 049
Загальний об'єм даних, байт	111 610

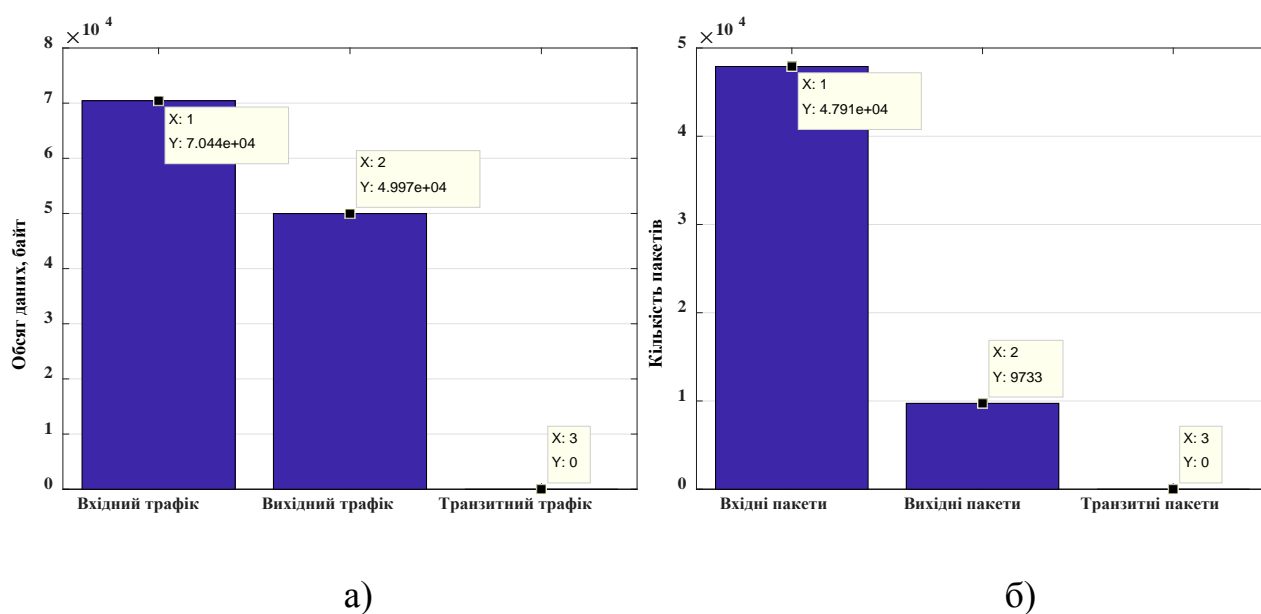


Рис. 3.15. Діаграми співвідношення трафіку за призначенням по обсягу даних – а) та по кількості пакетів – б) в режимі чату

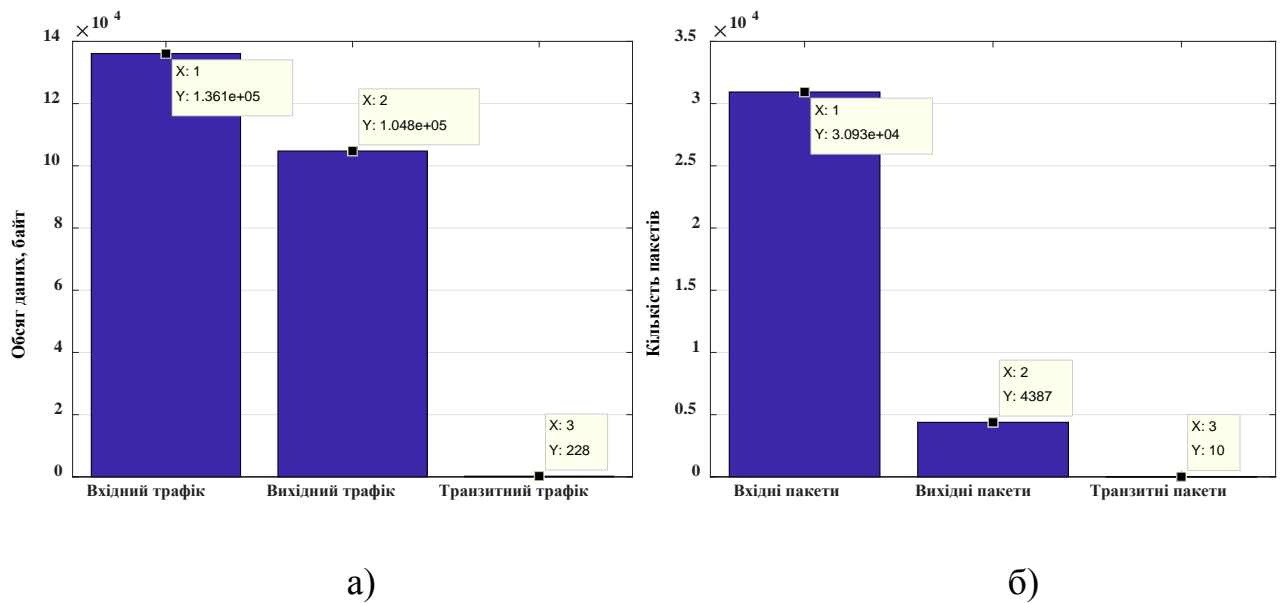


Рис. 3.16. Діаграми співвідношення трафіку за призначенням по обсягу даних – а) та по кількості пакетів – б) в режимі розмови

Для визначення співвідношення за типами данограм при використанні Skype в режимі чату, було проведено сортування даного потоку з використанням фільтрів мережного рівня. Чисельні дані про співвідношення данограм мережного рівня наведені на рис. 3.17.

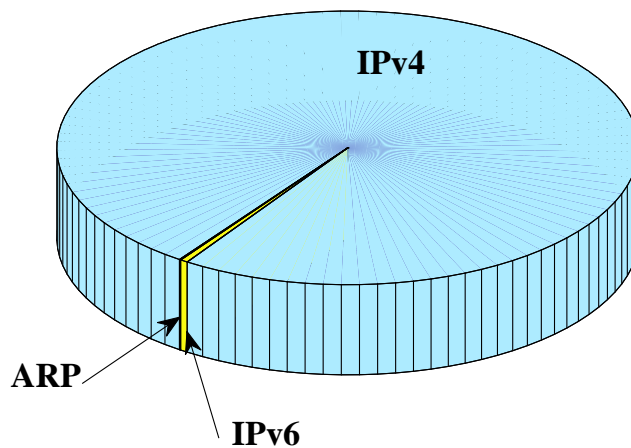


Рис. 3.17 Діаграма співвідношення мережних протоколів для трафіку Skype в режимі чату

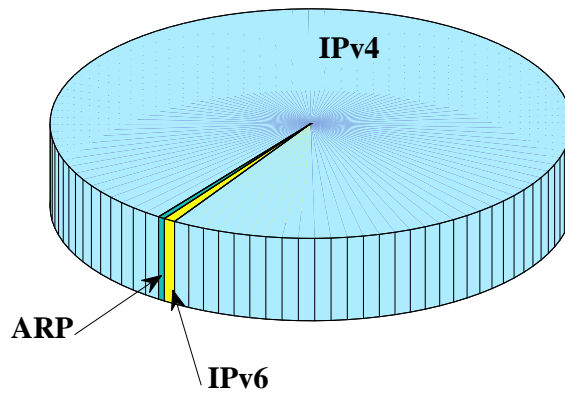


Рис. 3.18. Діаграма співвідношення мережних протоколів для трафіку Skype в режимі розмови

Результати показали, що, при користуванні скайпом, 99 % пакетів Ethernet інкапсулюють данограми IPv4, незалежно від режиму користування (чат або розмова). Невелика частина (~1%) є данограмами IPv6 та ARP.

Для того щ,об описати взаємодію між прикладними процесами, необхідно проаналізувати співвідношення данограм за протоколами транспортного рівня для обох, вищерозглянутих, режимів Skype.

В табл. 3.19 наведено абсолютну та відносну статистику отриманих кадрів транспортного рівня для режиму чату. На рис.3.19 показано кругову діаграму співвідношення данограм за протоколами транспортного рівня для режиму розмови.

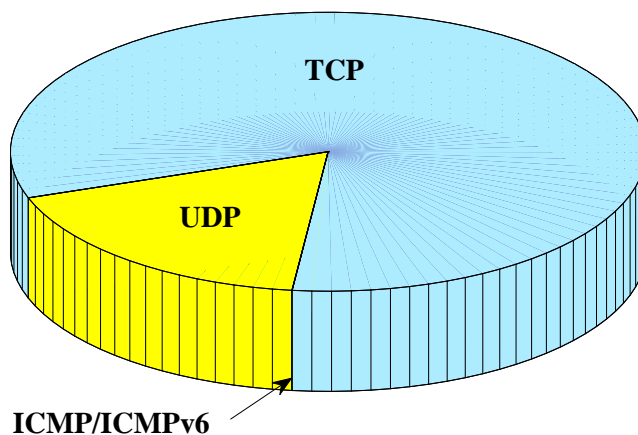


Рис.3.19. Діаграма співвідношення транспортних протоколів для трафіку Skype в режимі чату

На рис.3.20 відображена кругова діаграма співвідношення данограм за протоколами транспортного рівня для режиму розмови.

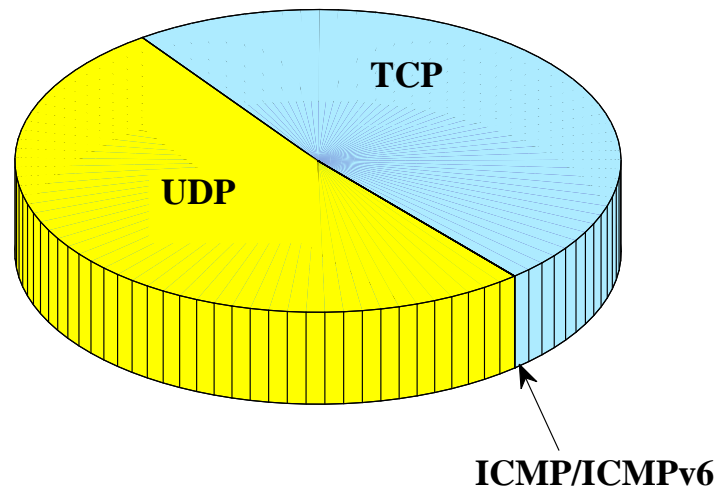


Рис.3.20. Діаграма співвідношення транспортних протоколів для трафіку Skype в режимі розмови

Отримані результати показують, що в режимі розмови основним протоколом для передавання данограм є UDP. Його частка становить понад 50% від усіх данограм, що припадає на передавання голосу. В режимі чату UDP використовується лише для передавання 17% данограм.

Аналізуючи данограми за протоколами прикладного рівня можна побачити, що HTTPS використовується лише для 40% пакетів. Майже 60% данограм призначені прикладним системним процесам Skype, тому в даній статистиці вони не ідентифіковані. Абсолютна та відносна статистика отриманих данограм за протоколами прикладного рівня наведена на рис. 3.21. для трафіку Skype в режимі чату. Статистика для режиму розмови наведена на рис. 3.22.



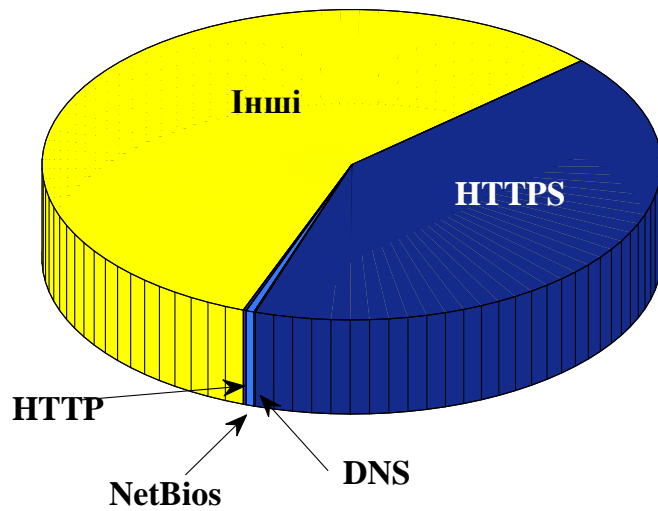


Рис.3.21. Діаграма співвідношення протоколів прикладного рівня для трафіку Skype в режимі чату

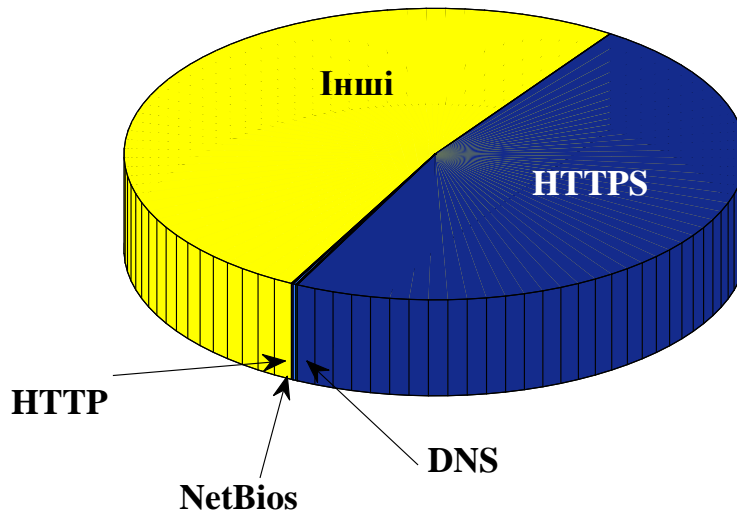


Рис.3.22. Діаграма співвідношення протоколів прикладного рівня для трафіку Skype в режимі розмови

Як видно з діаграм 3.21 та 3.22 в обох режимах роботи Skype більше половини данограм використовують на прикладному рівні протоколи, відмінні від стандартних протоколів HTTP/HTTPS та DNS. До таких протоколів відносяться протоколи STUN (Session Traversal Utilities for NAT) та TURN (Traversal Using Relay NAT), які призначені для того щоб забезпечити пірінгові з'єднання Skype, оминаючи NAT та брандмауер. STUN стандартизований набір

методів та мережних протоколів для забезпечення кінцевому вузлу можливості відкриття своєї публічної IP-адреси, навіть якщо він розташований за маршрутизатором з механізмом NAT (Network Address Translation). Це використовується для того щоб дозволити застосуванням, призначеним для передавання голосу та відео в реальному часі, а також текстовим повідомленням та іншим інтерактивним IP застосуванням безперешкодно проходити через NAT. Це досягається за рахунок того, що вузол отримує публічну IP адресу та номер порту, який NAT резервує для UDP застосувань віддалених вузлів. Протокол TURN дозволяє клієнтам за NAT або брандмауером, отримувати вхідні дані через TCP або UDP з'єднання. Це найбільш зручно для вузлів, які потребують пірінгового з'єднання типу "точка-точка". Абсолютні та відносні статистичні дані по розмірах корисного навантаження кадрів для трафіку представлені на рис. 3.23.

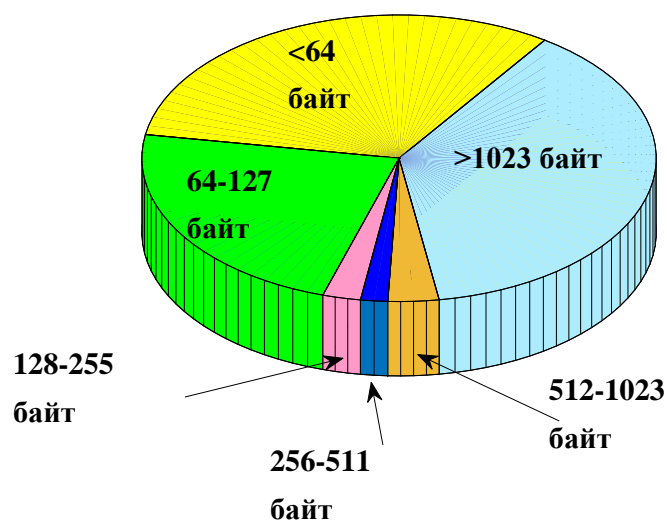


Рис. 3.23. Діаграма співвідношення розмірів пакетів для режиму чату

Статистичні дані по розмірах корисного навантаження кадрів для трафіку Skype в режимі розмови приведені на рис. 3.24.

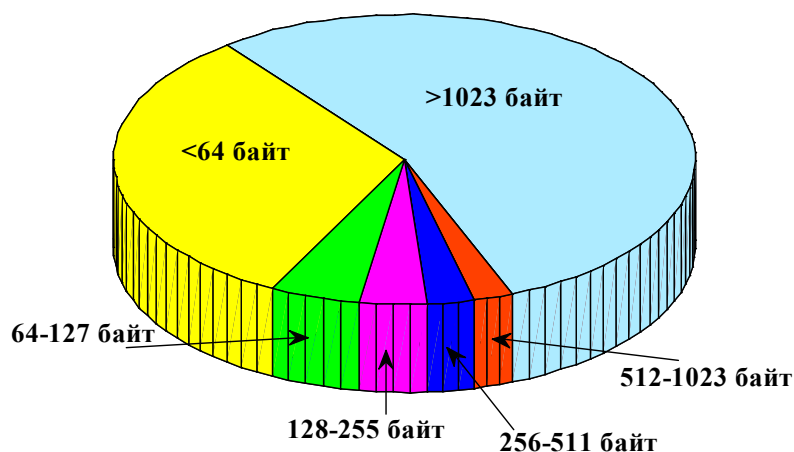


Рис. 3.24. Діаграма співвідношення розмірів пакетів для режиму розмови

На рис. 3.25 представлено профіль трафіку, який генерується одним абонентом, при користуванні сервісами локальних мереж протягом однієї хвилини, а на рис. 3.26. наведено його густину розподілу ймовірності. З рис. 3.25. можна спостерігати випадковий характер зміни трафіку, який генерується абонентом в мережах мобільного зв'язку.

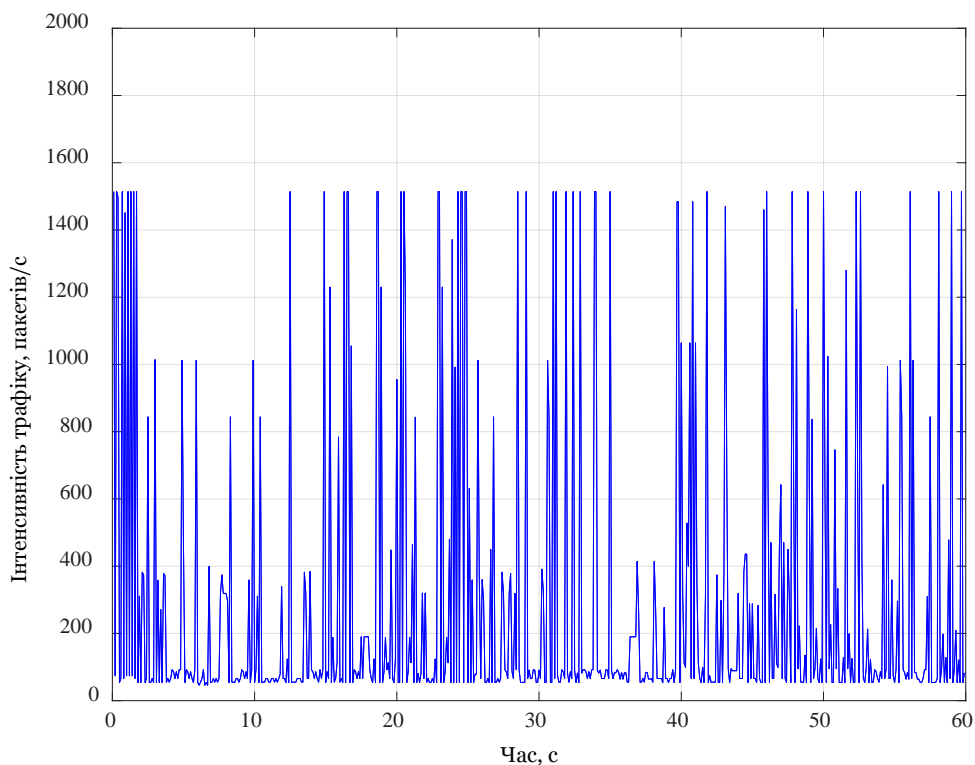


Рис. 3.25. Профіль трафіку одного абонента протягом однієї хвилини.

Відсутність чіткої закономірності інтенсивності трафіку можна спостерігати із залежності ймовірнісної функції розподілу (рис. 3.26). Згідно статистики, трафік в основному складається із пакетів мінімального розміру (64 байти), та пакетів максимального розміру (1518 байт).

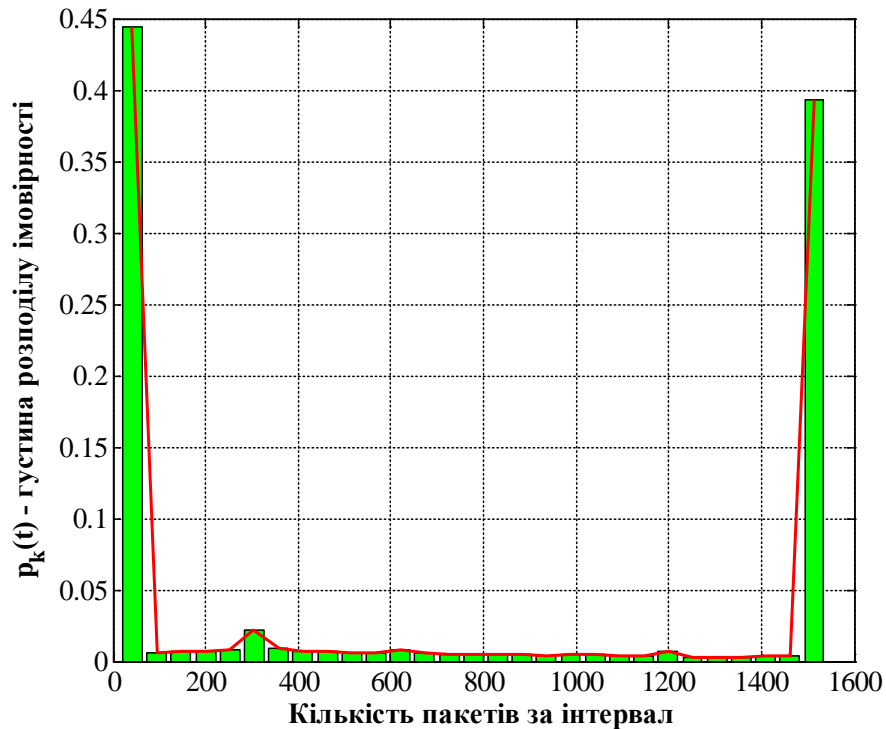


Рис. 3.26. Густина розподілу ймовірності для трафіку одного користувача

Отримані результати дають змогу визначити необхідні параметри для опорної транспортної мережі доступу. На основі отриманих статистичних залежностей, здійснюється наближена оцінка співвідношення між необхідною пропускною здатністю конвергентних оптичних мереж доступу в низхідному та висхідному напрямках передавання.

### **3.2. Моделювання статистичних характеристик агрегованого трафіку в опорній мережі мобільного зв'язку**

Дослідження статистичних характеристик мережного трафіку, проведене у попередньому пункті, показує лише статистику для одного мережного вузла, і тому, не дозволяє, у повній мірі, визначити вплив сервісів у мережах

мобільного зв'язку на характеристики мережного трафіку. Тому, необхідно провести дослідження агрегованого трафіку на виході базової станції. Для цього було проведено збір мережної статистики, проведено декомпозицію даного трафіку на  $N$  відрізків, та визначено агрегований сумарний трафік, який генерується у комірці мережі мобільного зв'язку.

Моделювання характеристик трафіку проводилось для гетерогенної мережі мобільного зв'язку з однією макрокоміркою та різною кількістю мікрокомірок. Безпроводний сегмент складається із великої кількості мікрокомірок, розташованих на відстані 50-200 м одна від одной. Крім того даний сегмент доповнюється макро рівнем, щоб забезпечити рівномірне покриття території. Макрокомірки розташовані приблизно на відстані 500 метрів одна від одной. На основі створеної моделі процесу агрегації трафіку в мережі мобільного зв'язку, одержано часові характеристики агрегованого трафіку, який генерується абонентами мережі мобільного зв'язку. На рис. 3.27 представлено профіль агрегованого трафіку, а на рис.3.28. наведено його густину розподілу ймовірності.

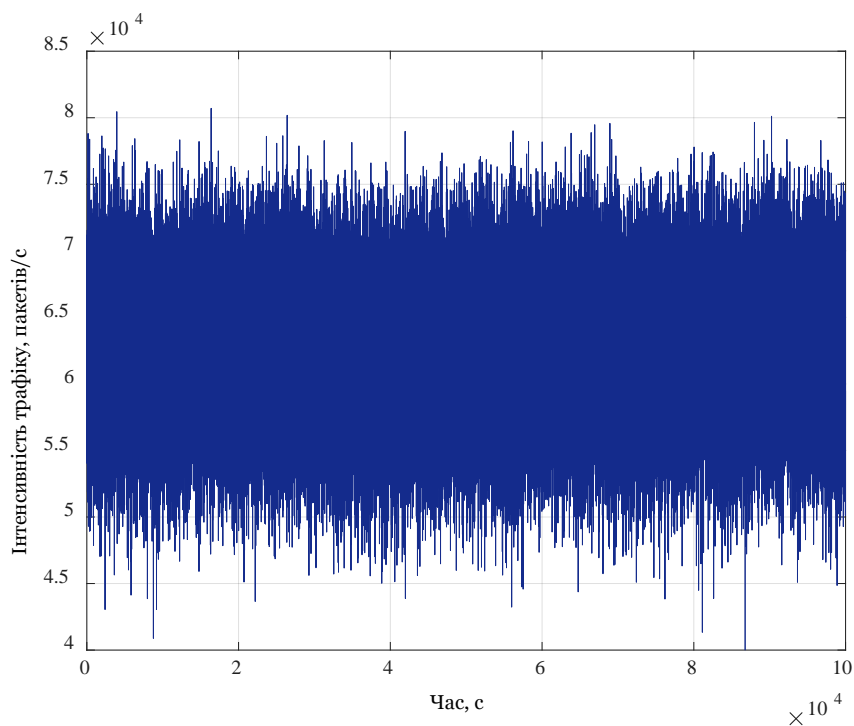


Рис. 3.27. Профіль агрегованого трафіку протягом однієї хвилини

З рис. 3.27 спостерігається закономірність зміни інтенсивності трафіку на рівні агрегації. Самоподібні властивості трафіку підтверджуються значенням параметра Херста  $H=0.76$ , який показує персистентність процесу надходження пакетів до агрегуючого маршрутизатора [137-139]. На рис. 3.28. показано залежність густини розподілу ймовірності для агрегованого трафіку. Як видно з рисунку, інтенсивність трафіку описується чітким законом розподілу.

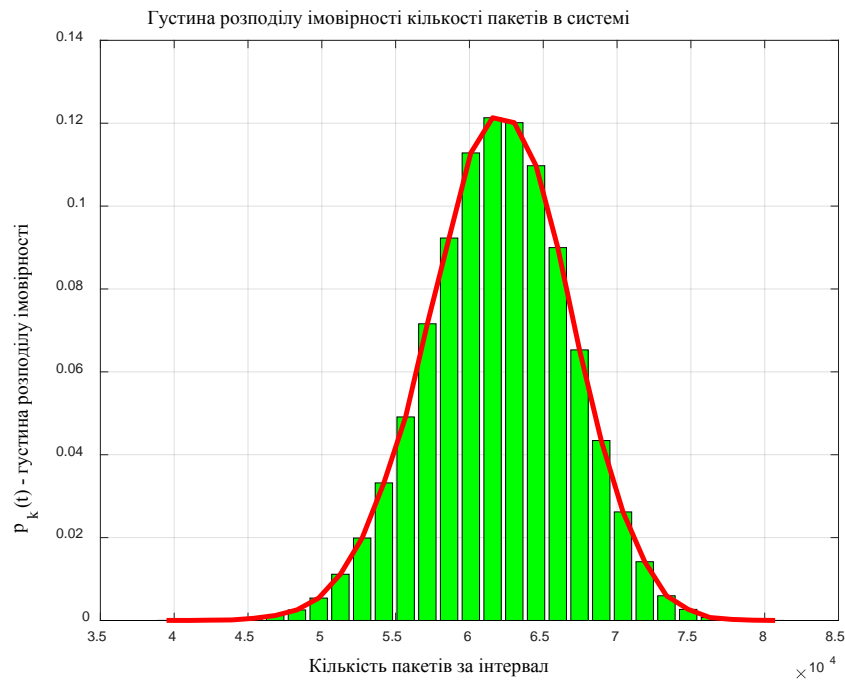


Рис. 3.28. Густина розподілу ймовірності для агрегованого трафіку

Моделювання проводилось для трьох значень спектральної ефективності радіоканалів: 5 біт/с/Гц (1 антена, 64 QAM), 10 біт/с/Гц (2 антени, 64 QAM) та 20 біт/с/Гц (4 антени, 64 QAM) [140-142]. Для кожного випадку визначено залежність необхідної пропускної здатності сегменту опорної транспортної мережі від кількості мікрокомірок (рис.3.29). Залежність пропускної здатності бездротових транспортних мереж від кількості мікроосередків з урахуванням різних середніх спектральних ефективностей показана на рис. 3.29а та рис. 3.29б. Отримані результати показують, що пропускна здатність транспортної мережі лінійно зростає зі збільшенням числа мікрокомірок. Коли кількість

мікрокомірок фіксована, то пропускна здатність транспортної мережі зростає зі збільшенням середньої спектральної ефективності в мікрокомірках.

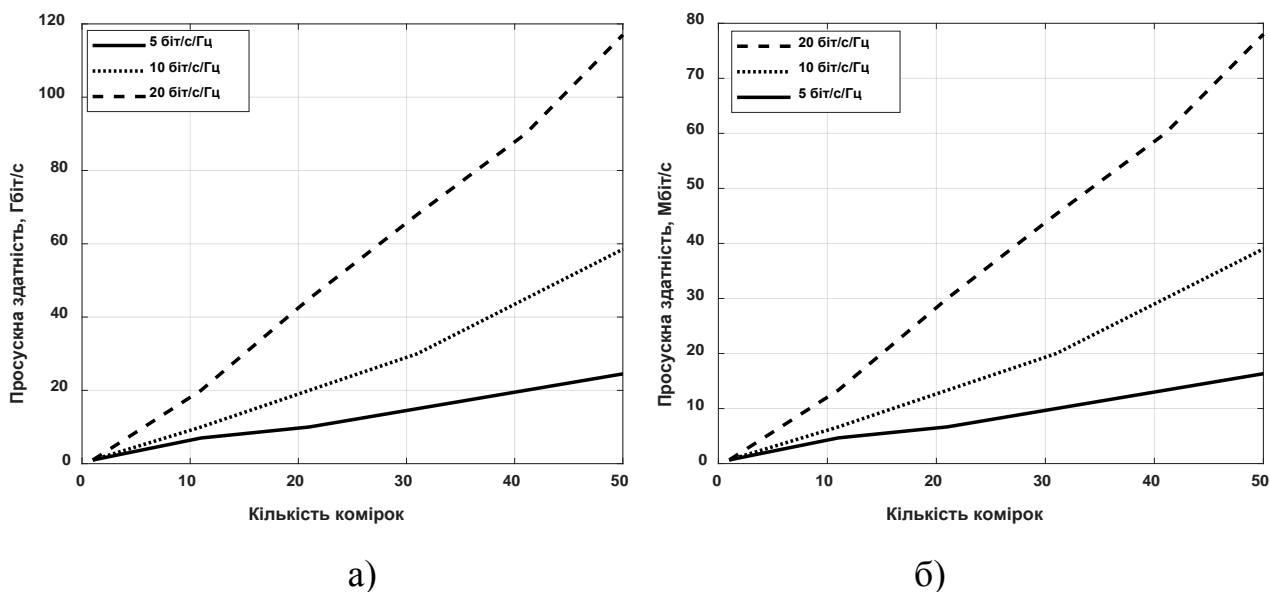


Рис. 3.29. Залежність пропускної здатності опорної транспортної мережі від кількості мікрокомірок у низхідному – а) та висхідному – б) напрямках передавання.

Згідно з проведеними розрахунками, розподіл пропускної спроможності опорної транспортної мережі становить 60% – для низхідного напрямку передавання, та 40% – для висхідного напрямку передавання, що суттєво відрізняється від співвідношення: 80% до 20%, яке традиційно приймається при розрахунках існуючих пасивних оптичних мереж фіксованого доступу.

Результати моделювання показують, що при високих значеннях спектральної ефективності радіоканалів мережі мобільного зв'язку, вимоги до пропускної здатності опорної транспортної мережі перевищують максимально можливе значення пропускної здатності одного ресурсного блоку конвергентної оптичної мережі доступу (79,62624 Гбіт/с), розраховане за виразом (2.2).

Тому, для підвищення масштабованості мережі, запропоновано алгоритм агрегації ресурсних блоків у конвергентній оптичній мережі доступу. Даний алгоритм перегрупує корисне та службове навантаження ресурсних блоків,

формуючи, таким чином, агреговані ресурсні блоки розміром 16×8 (WDM 16), 24×8 (WDM 24) та 32×8 (WDM 32). Це дає можливість у періоди пікового навантаження підвищувати пропускну здатність для сегменту або комірки до 160, 240 або 320 Гбіт/с при агрегації 2, 3 або 4 ресурсних блоків, відповідно.

$$C_{RB} = \frac{4 \cdot 19440 \cdot 8 \cdot 8 \cdot 8}{125 \cdot 10^{-6}} = 318.50496 \text{ Гбіт/с} \quad (3.1)$$

Функціональна модель методу агрегації ресурсних блоків представлена на рис. 3.30.

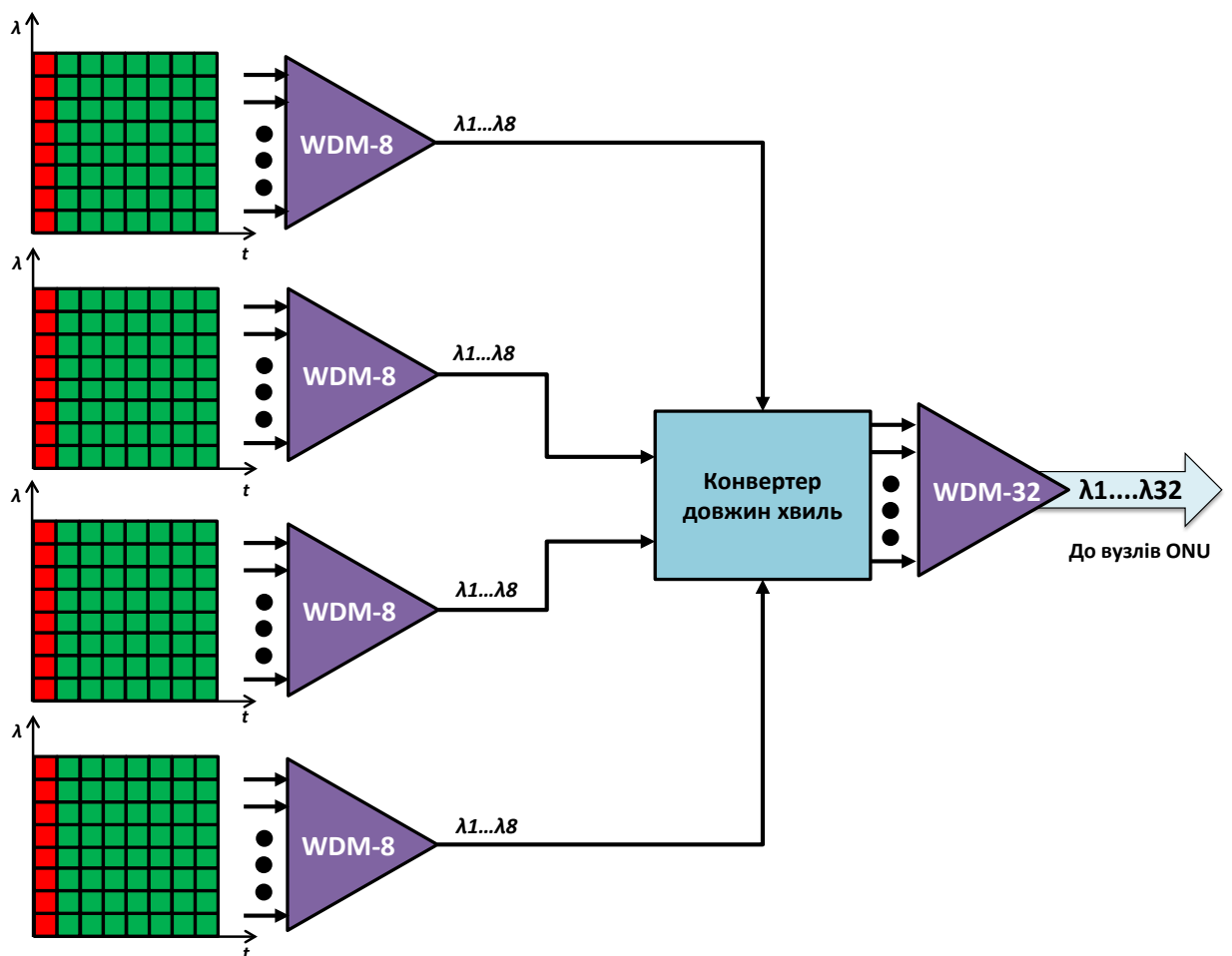


Рис. 3.30. Функціональна модель процесу агрегації ресурсних блоків для підвищення пікової пропускну здатності в конвергентних оптичних мережах доступу



Врахування статистичних даних, у запропонованій моделі конвергенції фіксованих оптичних мереж доступу з опорною транспортною інфраструктурою мереж мобільного зв'язку, дає змогу підвищити ефективність використання пропускної здатності оптичних каналів зв'язку у транспортних мережах [143].

### 3.3. Моделювання запропонованого алгоритму мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки

В роботі проведено моделювання ефективності розробленого алгоритму мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки. Для порівняння ефективності запропонованої моделі розподілу каналних ресурсів з існуючими моделями в мережах 10 GE PON (10 Gigabit Ethernet PON) моделювання проводилось для наступних вхідних умов: середній розмір пакету – 1 кБ, кількість вхідних потоків – 24, інтенсивність вхідних потоків – 10 Гбіт/с, тривалість моделювання – 50 год. Результати моделювання для обох напрямків передавання представлені на рис. 3.31.

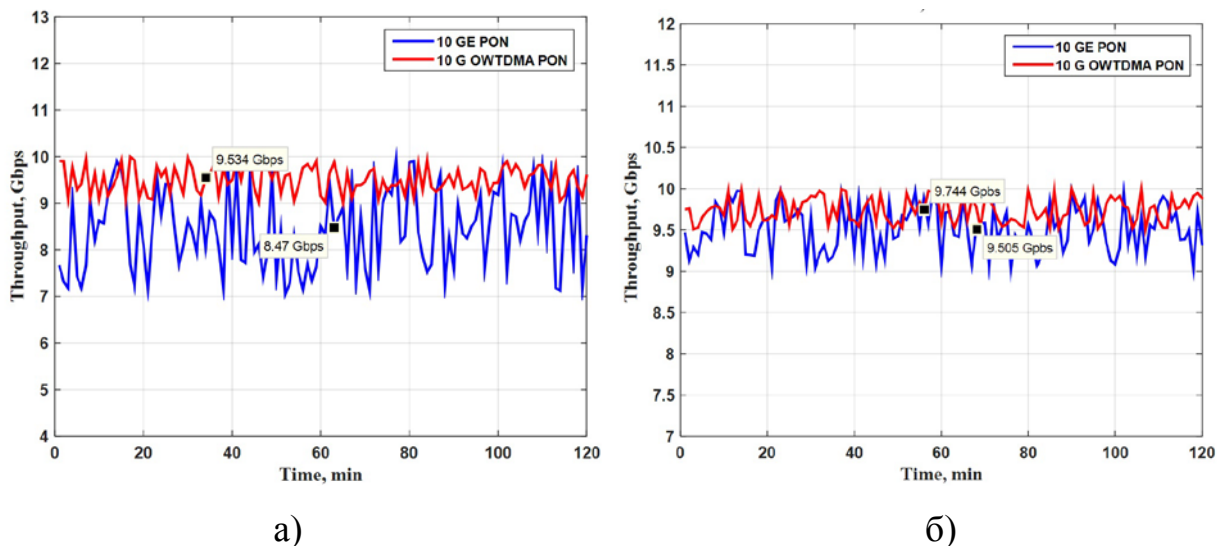


Рис. 3.31. Порівняння пропускної здатності запропонованої конвергентної оптичної мережі з існуючими мережами 10 GE PON для висхідного каналу – а) та низхідного каналу – б).

Як видно з результатів на рис. 3.31, розроблений алгоритм мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки, який дає змогу підвищити коефіцієнт використання пропускної здатності пасивної оптичної мережі до 5% у низхідному каналі та до 15% у висхідному каналі в залежності від поточної інтенсивності трафіку.

### **3.4. Моделювання трафіку в ультращільних гетерогенних мережах мобільного зв'язку 5G**

Максимальна щільність розміщення БС в ультра-щільних мережах стільникового зв'язку є ключовим питанням для майбутніх проектів мережі 5G. За умови використання MIMO антен і міліметрових хвиль, мікрокомірки забезпечують пропускні здатності для кінцевих користувачів 5G понад 1 Гбіт/с [144]. Але, чим більша кількість малих комірок, тим більше інформації передається в транспортних мережах. Таким чином, пропускна здатність транспортної мережі може бути вузьким місцем для обмеження щільності розміщення БС в ультра-щільних мережах стільникового зв'язку [145].

Схема транспортної мережі надщільних мереж описується наступним чином:

1) Вибирається найближчий шлюз мікрокомірки для прийому транзитного трафіку.

2) Для вибраної мікрокомірки повинні виконуватись дві умови:

- відстань між приймачем і передавачем повинна бути меншою від радіусу комірки  $r$ ;

- відстань між сусідньою мікро-БС, на яку буде здійснено передача інформації, і шлюзом має бути меншою, ніж відстань між передавачем і шлюзом;

3) Коли відстань між мікро-БС і шлюзом менше  $r$ , дана БС безпосередньо передає трафік через транспортну мережу на шлюз без ретрансляції. Для того, щоб уникнути перешкод від сусідніх БС, відстань між мікро-БС для одночасної

передачі має бути більше, ніж  $(1 + \Delta) \times r$ , де  $\Delta \times r$  – це захисна інтерференційна відстань в надщільних мережах 5G [146].

Просте, співвідношення, яке оцінює транзитну ємність мережі ультращільних стільникових мереж виглядає як:

$$C = \frac{Y(n) \times W}{k(n)} \quad (3.2)$$

де  $n$  - число мікро-БС в макрокомірці;

$Y(n)$  - середнє число одночасних передач в макрокомірці;

$W$  - швидкість передачі мікро-БС;

$k(n)$  - середнє число «стрибків» транзитного трафіку в макрокомірці.

Макрокомірка вважається правильним шестикутником з радіусом 1 км. Вважається, що всі мікрокомірки не перекривають один одного. Крім того, три шлюзи вважаються симетрично розміщені у верхніх вершинах шестикутника макрокомірки. Захисна інтерференційна відстань налаштована, як  $0,5 \times r$  і швидкість передачі мікро-БС складає 1 Гбіт/с. Детальні параметри моделювання представлені в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5.

Параметри моделювання гетерогенної мережі

Параметри	Значення
Кількість транзитних з'єднань в макрокомірці	3
Радіус мікро-БС	100м, 150 м, 200м
Радіус макро-БС	1км
Параметр $a$	7.85
Параметр $b$	71.5 Вт
Нормована потужність передачі транспортної мережі $P_{norm}$	1 Вт
Пропускна здатність транспортної мережі $T_{h0}$	1 Гбіт/с
Термін експлуатації мікро-БС $T_L$	5 років
Споживана потужність $E_{EM}$	20% від загального споживання енергії

Моделювання проводились на основі методу Монте-Карло, результати моделювання пропускної здатності транспортної мережі наведені на рис. 3.32 і

рис. 3.33. Ємність транзитної мережі зростає зі збільшенням числа мікроосередків, після того, як ємність мережі досягає максимального значення, пропускна здатність транспортної мережі зменшується зі збільшенням числа мікро-БС [147]. Остаточню, пропускна здатність транспортної мережі досягає стаціонарного значення насичення, коли кількість мікро-БС наближається до нескінченності [148].

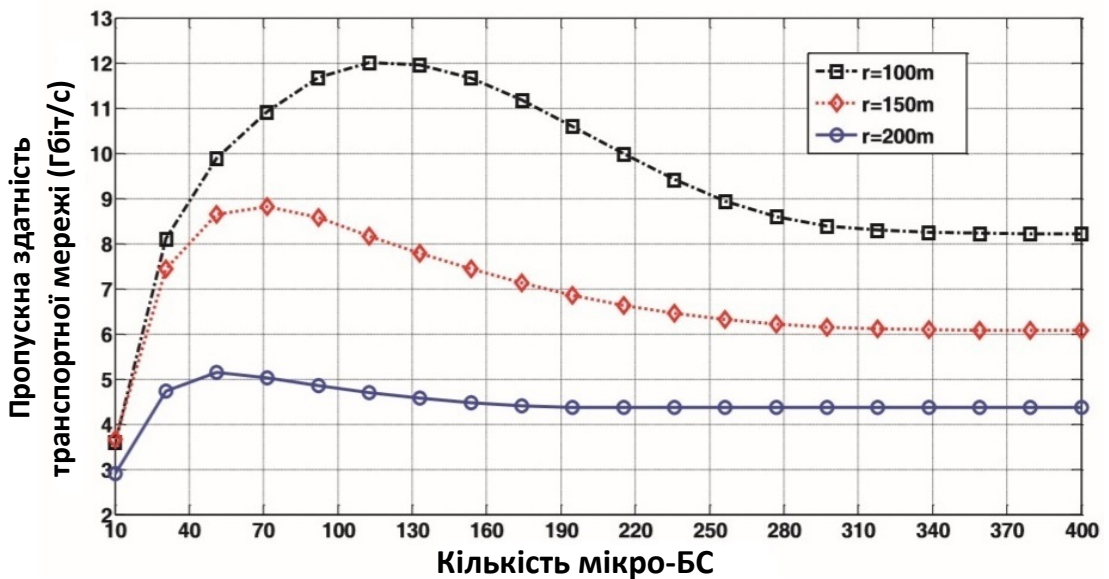


Рис.3.32. Залежність ємності опторної транспортної мережі надщільних мереж мобільного зв'язку від кількості мікро-БС

Коли радіус мікро-БС  $r$  фіксований, ємність транзитної мережі по відношенню до середнього числа одночасних передач описана на рис.3.33. З урахуванням захисної інтерференційної відстані  $\Delta \times r$ , максимальна середня кількість одночасних передач зменшується зі збільшенням радіуса мікро-БС, коли покриття макро-БС фіксоване. Наприклад, максимальна середня кількість одночасних передач становить 29, 25 і 19, коли радіус мікрокомірки становить 100 м, 150 м і 200 м відповідно.

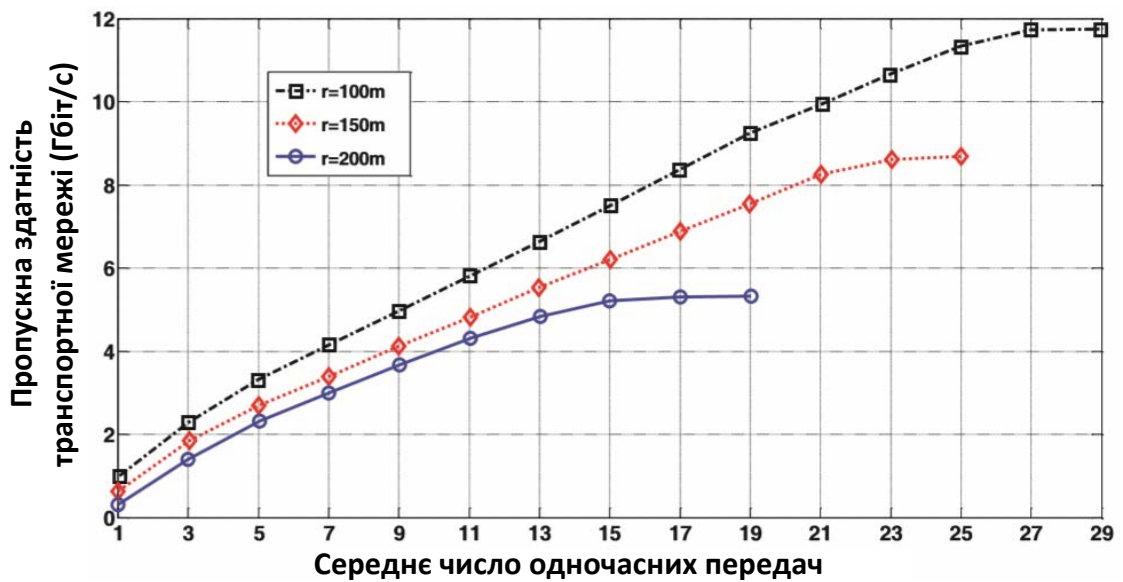


Рис. 3.33. Залежність ємності транспортної мережі від кількості одночасних передач

Пропускна здатність транспортної мережі зростає зі збільшенням середнього числа одночасних передач в макрокомірці. Крім того, ємність транспортних мереж наближається до граничної межі, коли середнє число одночасних передач більше, ніж 27, 23 і 15, які відповідають радіусу мікрокомірки 100 м, 150 м і 200 м відповідно. Коли кількість мікро-БС або середнього числа одночасних передач фіксоване, пропускна здатність транспортної мережі зменшується зі збільшенням радіуса мікрокомірок. Можна зробити висновок, що пропускна здатність транспортної мережі буде досягати стаціонарного значення насичення, коли середнє число одночасних передач або щільність розміщення мікро-БС (кількість мікро-БС в макрокомірці) буде більше заданого порогу. Цей результат забезпечує ефективне проектування надщільних мереж стільникового зв'язку 5G.

Крім того, проведено моделювання ефективності запропонованого алгоритму реалізації хендоверу в мережах мобільного зв'язку з використанням групування інформаційних потоків (рис.3.34).

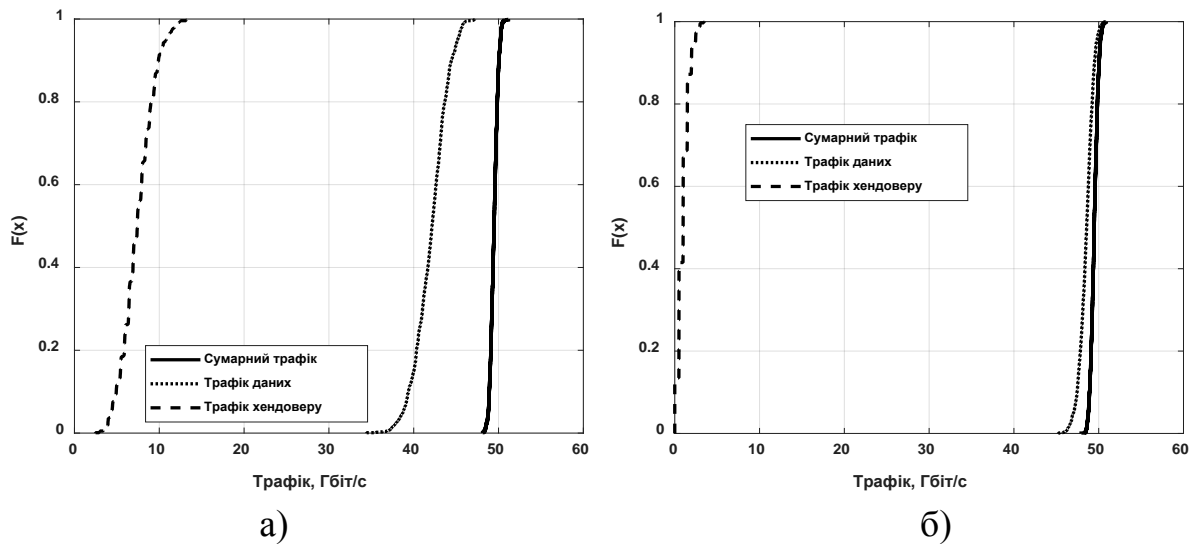


Рис. 3.34. Порівняння співвідношення обсягу трафіку хендоверу до загального обсягу трафіку для звичайного випадку – а) та для випадку з використанням алгоритму групування – б).

Результати моделювання показали, що при використанні звичайного алгоритму хендоверу, надлишковий трафік в конвергентній мережі доступу складає від 3 до 12 Гбіт/с. Використання запропонованого алгоритму дає змогу знизити обсяг надлишкового трафіку до 1-3 Гбіт/с, водночас збільшивши пропускну здатність для корисного трафіку на 5-10 Гбіт/с.

### 3.5. Моделювання запропонованого методу балансування трафіку між сегментами мережі доступу з урахуванням їх взаємозв'язності

Для порівняння ефективності запропонованого методу з існуючими було проведено порівняння коефіцієнту використання каналів при варіації інтенсивності навантаження для наступних вхідних умов:

- середній розмір пакету: 1 кб;
- кількість вхідних потоків: 24;
- інтенсивність вхідних потоків: 10 гбіт/с;
- тривалість моделювання: 50 год.

На рисунку 3.35 зображено профіль та густину розподілу ймовірності змодельованого вхідного трафіку.

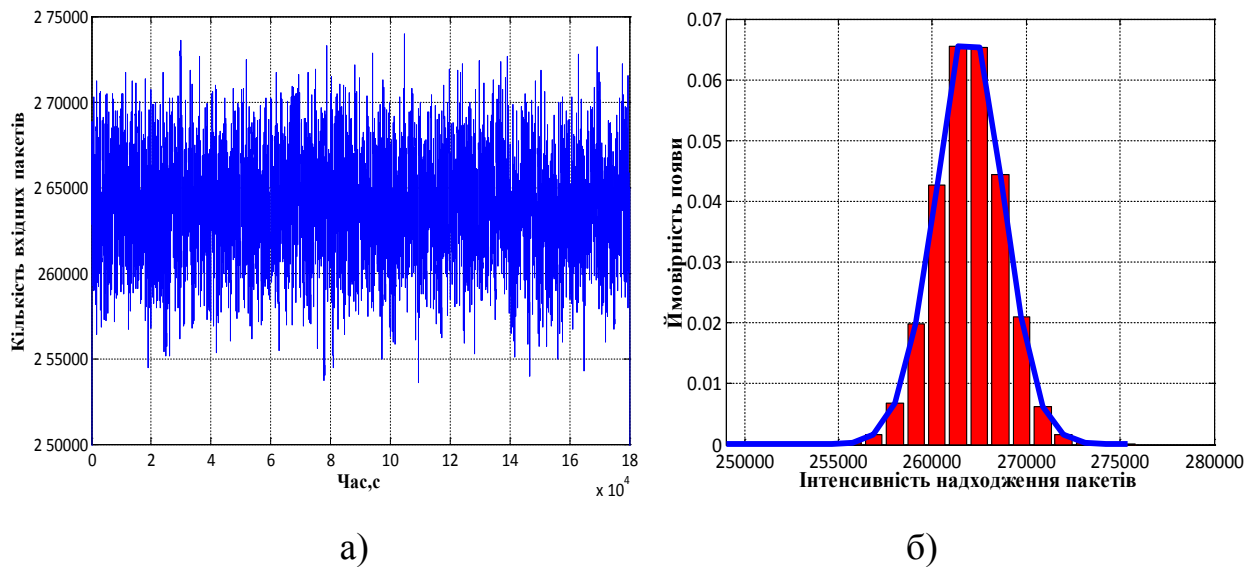


Рис. 3.35. Профіль - а) та густина розподілу ймовірності –б) для змодельованого трафіку.

Параметр Херста для змодельованого трафіку становить  $H=0.92$ . Інтенсивність надходження викликів розподілена за нормальним законом. Порівняльна залежність коефіцієнта використання пропускної здатності оптичних ліній зв'язку показана на рисунку 3.36.

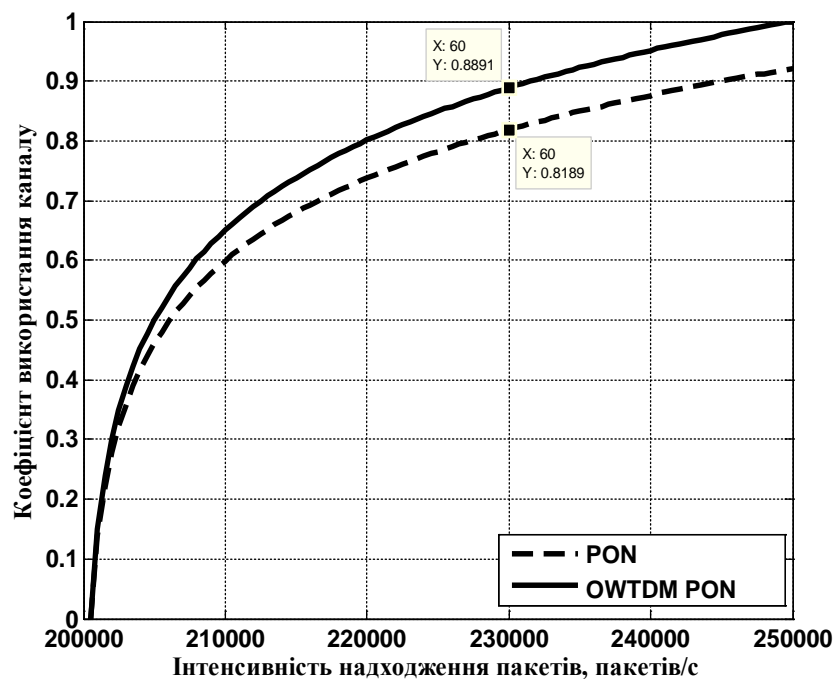


Рис.3.36. Порівняльні залежності ефективності використання ресурсів від інтенсивності трафіку

Результати моделювання підтверджують, що метод балансування трафіку з урахуванням зв'язності окремих сегментів мереж доступу, ефективніше використовує доступну пропускну здатність. За рахунок спектрально-часового мультиплексування покращується гнучкість використання ресурсів та усувається явище недовантаження каналу. Результати моделювання показують, що вигащ запропонованого методу становить приблизно 7%, з точки зору коефіцієнту використання каналу.

### **3.6. Висновки до 3-го розділу**

Проведено моделювання процесу функціонування конвергентної оптичної мережі з інтеграцією сегментів фіксованого та мобільного доступу. Для дослідження впливу різних сервісів було знято статистичні залежності трафіку при використанні трьох основних типів послуг, які переважають у мережах мобільного зв'язку четвертого покоління: веб-сервіси, потокове відео та IP телефонія, частки яких становлять 30%, 55% та 15%, відповідно. Згідно з проведеними дослідженнями, розподіл пропускну спроможності опорної транспортної мережі становить 60%/40% – на користь низхідного напрямку передавання, що суттєво відрізняється від співвідношення: 80%/20%, яке традиційно приймалось при розрахунках існуючих пасивних оптичних мереж. Проведено моделювання характеристик трафіку в гетерогенних мережах мобільного зв'язку з однією макрокоміркою та різною кількістю мікрокомірок, для визначення вимог до пропускну здатності опорної мережі.

Результати моделювання показують, що при високих значеннях спектральної ефективності радіоканалів мережі мобільного зв'язку, вимоги до пропускну здатності опорної транспортної мережі перевищують максимально можливе значення пропускну здатності одного ресурсного блоку конвергентної оптичної мережі доступу (79,62624 Гбіт/с). Тому, для підвищення масштабованості мережі, запропоновано алгоритм агрегації



ресурсних блоків, який дає можливість у періоди пікового навантаження підвищувати пропускну здатність для сегменту або комірки до 320 Гбіт/с. Проведено моделювання процесу передавання трафіку зі змінною інтенсивністю у конвергентних мережах доступу із взаємопов'язаними сегментами. Результати моделювання показали, що запропонований алгоритм балансування трафіку з урахуванням зв'язності окремих сегментів дає змогу підвищувати точність розподілу каналних ресурсів у конвергентних мережах доступу на 7%.

# РОЗДІЛ 4. ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНО-КЕРОВАНОЇ КОНВЕРГЕНТНОЇ ОПТИЧНОЇ МЕРЕЖІ ДОСТУПУ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ГЕТЕРОГЕННИХ СИСТЕМ БЕЗПРОВІДНОГО ЗВ'ЯЗКУ

## 4.1. Інфраструктура конвергентної оптичної мережі доступу

Архітектура конвергентної оптичної мережі доступу базується на класичній архітектурі пасивних оптичних мереж з кількома рівнями мультиплексування інформаційних потоків. Інфраструктура складається з одного оптичного лінійного вузла (OLT), розташованого в центральному офісі (CO) і кількох оптичних абонентських блоків (ONU) (рис. 4.1). Віддалений вузол (RN), розташований в першій точці розгалуження ("рівень 1 RN"), може складатись або із пасивних сплітерів оптичного сигналу або із WDM мультиплексорів. У першому випадку, перевагою є те, що OLT можуть поширювати спектральні сегменти змінної ширини між різними службами або частинами мережі в динамічному режимі. Однак, це збільшує втрати при розгалуженні і означає, що кожен ONU в мережі повинен бути або електронним або застосовувати оптичний фільтр для виділення окремих спектральних складових.

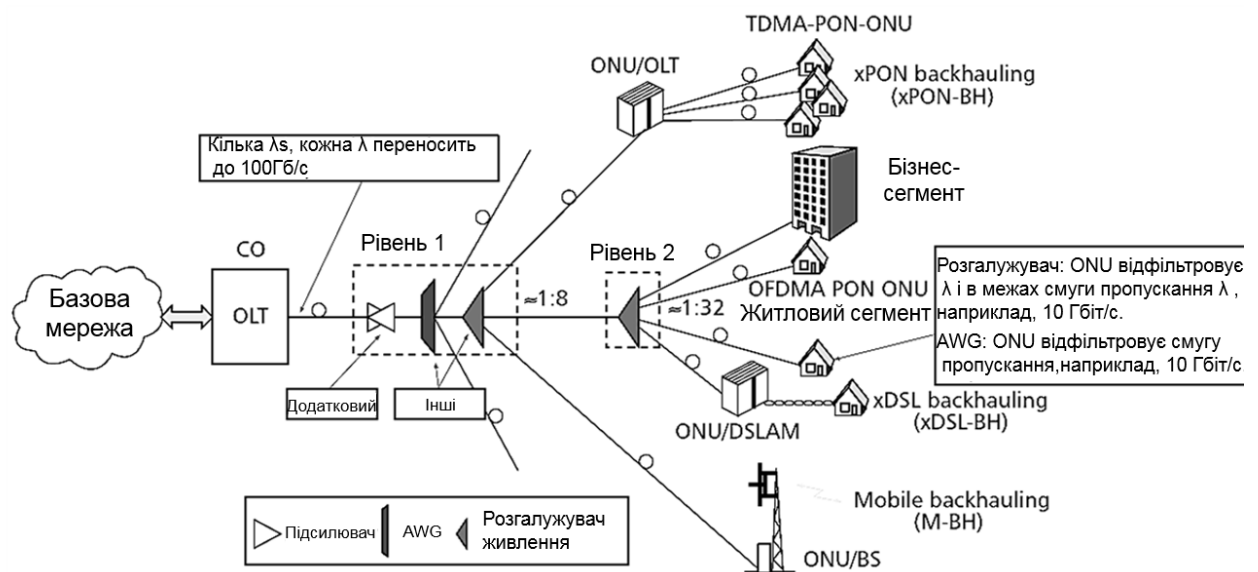


Рис. 4.1 Інфраструктура конвергентної оптичної мережі доступу.

Другий варіант полягає у використанні мультиплексора/демультиплексора довжин хвиль (AWG). Це забезпечує меншу гнучкість в плані призначення сегменту на цьому рівні, але гарантує, що кожен ONU приймає тільки частину загального спектра, тобто одну або кілька довжин хвиль. Крім того, використання підходу Radio-over-Fiber (RoF) може допомогти в розширенні пропускної здатності мережі, без ускладнення обладнання пасивної оптичної мережі доступу [149].

Однією з ключових переваг даної архітектури є можливість об'єднання вузлів. Це говорить про те, що оператори можуть уникнути використання декількох вторинних центральних офісів, таким чином, зменшуючи їх експлуатаційні витрати, а також підвищуючи надійність мережі. Зниження енергоспоживання мережевого обладнання досягається за рахунок зниження потреб охолодження зовнішнього обладнання та використання масштабованих розгалужувачів живлення [150].

#### **4.1.1. Методи розгортання окремих сегментів оптичної мережі доступу**

Виділяють три основні сценарії для розгортання сегментів доступу для різних сценаріїв використання.

Перший сценарій передбачає використання абсолютно пасивного мережевого доступу і характеризується довжиною прольоту до 20 км. Найефективніше використовувати для густонаселених районів.

Другий сценарій характеризується довжиною прольоту 40 км без будь-якого підсилення на проміжних вузлах. Основними цілями, в даному випадку, є мережеве об'єднання в приміських районах, а також широке охоплення сільських районів.

Третій сценарій орієнтований на сільські райони. Підсилення сигналу відбувається на 1-му рівні розгалуження, що забезпечує дальність зв'язку до

100 км.

Запропонована архітектура охоплює різних користувачів, які потребують рішень високошвидкісного доступу:

1. Домашні користувачі. Це головний користувацький сегмент, на якому зосереджене встановлення FTTH в даний час. Багатоканальне телебачення високої якості, сервіси відео на вимогу та інші IP-послуги. Переважно для таких користувачів гарантується швидкість передавання даних до 400 Мбіт/с в обох напрямках.

2. Корпоративні користувачі. Цей тип потребує вищої пропускної здатності. Характерний рядом додаткових вимог, зокрема надлишкове підключення та розширений механізм безпеки. Для багатьох підприємств малого та середнього бізнесу достатньо підключення домашнього типу, в той час, як для великих корпорацій можуть бути необхідні швидкості в кілька десятків гігабіт на секунду.

3. Оператори мобільного зв'язку. Включає в себе телекомунікаційні послуги, що надаються операторам мобільного зв'язку для підключення своїх базових станцій до глобальної мережі Інтернет. Зокрема, сучасні мережі на основі технології LTE Advanced потребують високошвидкісної оптоволоконної інфраструктури для передавання трафіку великої кількості абонентів мобільного зв'язку.

Відповідно до цільової групи користувачів мережі, вузол ONU підтримує два типи підключення кінцевих пристроїв. Перший тип, це звичайне підключення на основі Ethernet. Цей тип відноситься до всього мережного обладнання, яке потенційно може отримати подібні звернення та обслуговуватися одним типом ONU, так як використовує загальний формат корисного навантаження. Ця категорія включає житлових та корпоративних клієнтів FTTH, FTTB/FTTC, а також базові станції фемтокомірок LTE, які використовують транзитне з'єднання за технологією Ethernet.

Другим типом є прозоре підключення, яке передбачає, що трафік

проходить через ONU до кінцевих користувачів, без перетворення сигналу з оптичного представлення в електричне. Найчастіше цей тип використовується для підключення комірок мобільного зв'язку та великих корпоративних мереж, які мають високі вимоги до пропускну здатності транспортних каналів зв'язку. Проте, цей підхід обмежується енергетичними параметрами, оскільки співвідношення сигнал-шум (SNR) знижується при розгалуженні сигналу в пасивних оптичних мережах.

#### **4.1.2. Методи групування ресурсів у конвергентних оптичних мережах доступу**

В залежності від потреб конкретного територіального регіону співвідношення вищезгаданих сегментів доступу є різним. Тому, необхідно враховувати дане співвідношення при розподілі ресурсів. Для ефективного розподілу ресурсів, пропонується використання цільового групування, яке дає змогу віртуально обмежити пул доступних каналних ресурсів для конкретного сегменту. Це дасть змогу гарантувати усім користувачам гарантовану пропускну здатність, оскільки ресурси одного сегменту стають невидимими для інших сегментів доступу.

Відповідні групи створюються з сегментів домашніх користувачів, корпоративних користувачів та операторів мобільного зв'язку. Дане групування є можливим за рахунок використання спектрально-часової ресурсної сітки, що значно ефективніше у порівнянні із ретрансляцією окремих груп у TDMA-PON з точки зору ефективності використання ресурсів.

Вибір послуг залишається за PON терміналами, які підключають конкретні служби з міркувань економії. Як приклад, із запропонованими групуванням та обліком гарантованих швидкостей передавання, зображених на рис. 4.2, для відповідних типів з'єднань в кінцевій точці. Загальна пропускну здатність на групу в такому випадку знаходиться в діапазоні 40-70 Гбіт/с. Проте, дані групи

є змінними, з метою забезпечення гнучкого розподілу пропускної здатності мережі на каналному рівні.

Застосування	Тип користувачів	Кількість користувачів	Гарантована швидкість передачі даних ( Мбіт/с )
R	Житловий	30	400
xDSL-BH	DSLAM	4	1000
B	Бізнес	4	1000
M-BH	LTE-BS	16	750
xPON-BH	10G-EPON-OLT	1-4	10000

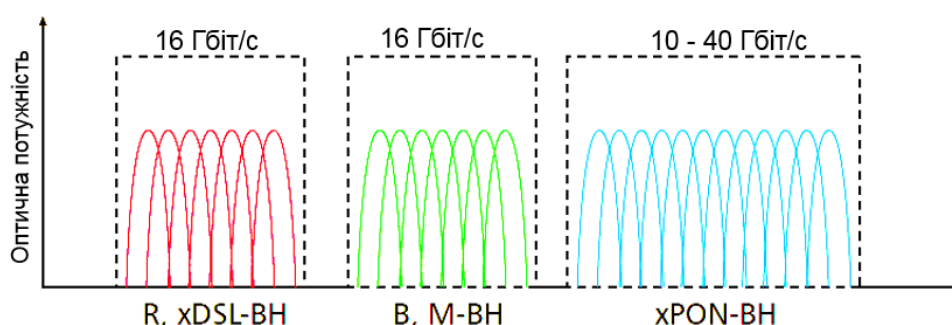


Рис.4.2. Групування ресурсів у конвергентних оптичних мережах доступу відповідно до географічного регіону

#### 4.2.Інтеграція оптичних та безпроводних мереж доступу в єдину конвергентну мережу

Найбільш важливим аспектом, який необхідно враховувати при інтеграції безпроводних мереж з оптичними мережами доступу є те, що контроль L2 і управління повинні бути розроблені таким чином, щоб організувати пакетну передачу з кінця в кінець, дотримуючись мінімальних вимог до пропускної здатності комірок LTE. Крім того, необхідно враховувати можливості централізації обробки сигналу, яка може бути досягнута за допомогою технології RoF, яка функціонує на основі радіо-інтерфейсу загального користування (CPRI). Обидва варіанти підтримують прозоре передавання сигналу та незалежність планування пропускної здатності.

При використанні RoF, LTE канали зміщені по частоті з використанням

заздалегідь заданого гетеродина (LO) і смугових фільтрів (BPF) в OLT. Перед з'єднанням сигнали модулюються оптичною несучою для передавання індивідуальним дистанційним базовим станціям. На стороні ONU/BS, RF-LO мають працювати на тій же частоті для конкретного ONU/BS, для вибору каналу передавання в ефір. Крім того, необхідно використовувати захисні смуги частот навколо піднесучих, які використовуються передавання RoF. З іншого боку, передавання даних через CPRI є оптимальним рішенням для підключення центрів дистанційного радіоуправління (RRHs) операторами мобільного зв'язку. Використання CPRI спрощує установку сайтів (прості RRHs), так як більша частина цифрової обробки сигналів здійснюється централізовано. Тим не менш, високі швидкості передавання даних при дуже низьких BER потрібні для транспортування закодованих LTE сигналів через CPRI. Крім того, в довгострокових сценаріях високі затримки можуть бути проблемою. Її можна вирішити шляхом введення проміжного вузла між CO та дистанційною BS, який відповідатиме за створення і передачу CPRI потоків на коротші відстані.

Централізація мережі дасть змогу розширити кілька безпроводних функцій, таких, як багатоточкове спільне управління (CoMP), само-організація мережі та контроль топології, а також знизити вартість обслуговування. На рис. 4.3 показано базову архітектуру LTE від ядра до безпроводного абонентського обладнання (UE). X2 представляє собою логічний інтерфейс, з допомогою якого БС контактують одна з одною. Механізми спільного передавання, такі як CoMP, використовують цей канал для обміну інформацією між базовими станціями, що дуже часто призводить до зростання обсягів трафіку через оптичні канали зв'язку. Крім того, надмірна затримка, яка виникає у зв'язку з цим, може знизити продуктивність мережі мобільного зв'язку. Тим не менш, слід брати до уваги, що затримка між генерацією хвиль та прийомом на UE, через додаткову затримку поширення по оптичному волокну. Тому конвергентна оптична мережа доступу повинна підтримувати гарантовану

якість каналів X2.

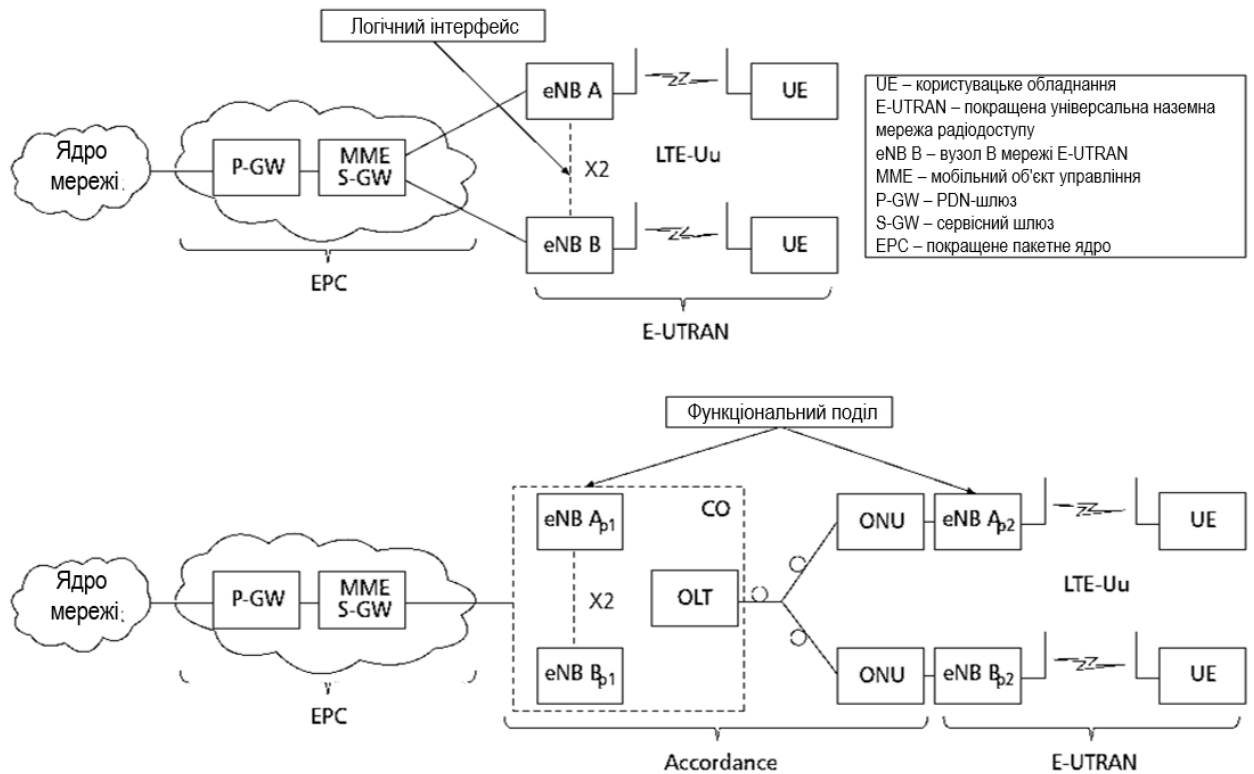


Рис. 4.3. Базова архітектура LTE та її трансформація в мережу з централізованим керуванням.

### 4.3. Інтеграція централізованих мереж C-RAN в конвергентну мережу доступу

Згідно з прогнозами до 2020 року глобальний трафік мобільних даних збільшиться до восьми разів. Це величезне зростання пояснюється тим, що швидко зростають: а) кількість кінцевих пристроїв, підключених до мережі, б) Інтернет-користувачі з важкими моделями використання, в) швидкість широкопasmового доступу, і г) популярність сервісів хмарних обчислень, відео, ігри тощо. Зрозуміло, що для задоволення зростаючих вимог мобільного трафіку традиційні макро-комірки на одному рівні повинні бути перетворені в архітектуру, що містить велику кількість менших комірок. Традиційні мережі



радіозв'язку RAN, де блоки обробки сигналу (Base Band Units - BBU) та радіомодулі розміщуються спільно, обмежені кількома факторами:

- збільшення капітальних видатків (CAPEX – Capital Expenditures) та операційних витрат (OPEX – Operational Expenditures) через брак розподілу ресурсів;
- обмежена масштабованість і гнучкість;
- відсутність модульності та обмежена щільність;
- підвищення витрат на управління;
- неефективне використання енергії.

Для вирішення цих обмежень були запропоновані хмарні централізовані мережі радіодоступу (Cloud Radio Access Network (C-RAN)). У C-RAN розподілені точки доступу (AP - Access Points), що називають віддаленими пристроями (RU - remote units), підключені до пулу BBU центральної частини (Central Unit - CU), через високошвидкісну транспортну лінію, яка називається Fronthaul (FH). Інтерфейс між RU та CU стандартизований за допомогою спільного публічного радіо інтерфейсу (Common Public Radio Interface - CPRI) [151].

Визнаючи переваги архітектури C-RAN та пов'язаних з ними проблем, постачальники обладнання розширюють свої мобільні рішення FH, застосовуючи більш ефективні безпроводні технології, тобто працюють в діапазонах частот від 6 ГГц і 60 ГГц, які вдосконалюються за допомогою додаткового відстеження променів і технології MIMO, нові універсальні платформи оптимізації мережевого мультиплексування (WDM), а також нові системи управління та керування, що дозволяють користуватися послугами, що підвищують деталізацію, оптимізацію кінцевої точки та гарантованої QoS.

Для того, щоб зменшити суворі вимоги FH до архітектури C-RAN, скориставшись перевагами його злиття та узгодження, були запропоновані рішення, що спираються на стисненні FH, а також на альтернативні архітектури, що приймає гнучкі функціональні розбивки. В останньому

випадку впровадження гнучких розбивок дозволяє розділити функції обробки між CU та RU. На основі цих рішень на RU виконується набір функцій обробки, а інші функції виконуються централізовано. У більшості можливих рішень ці функції реалізуються за допомогою замкнутого та спеціального обладнання, що значно впливає на встановлення, операційні та адміністративні витрати. Щоб вирішити ці проблеми, нещодавно було запропоновано концепцію мережевої програмної оборони, яка дає змогу перейти від традиційної моделі замкнутої мережі до відкритої довідкової платформи, яка здатна продемонструвати різноманітні мережеві функції. Типовий приклад включає OpenAirInterface (OAI), стек радіозв'язку з відкритим кодом 4G/5G, який може бути виконаний на серверах загального призначення, розміщених у центрах обробки даних (data centres – DC). Такі сховища з відкритим вихідним кодом все ще знаходяться на ранніх етапах розробки та не дозволяють виконувати складніші функції, такі як гнучкі розбивки RAN.

У даному дослідженні поняття гнучких функціональних розбивок розглядається через комбінацію невеликих серверів, вбудованих в бездротовий доступ і відповідно великомасштабні DC розміщені у домені мережевої мережі. Слід зазначити, що гнучкі розбивки накладають вимогу гранулярності тонкої пропускної здатності та розподілу еластичних ресурсів як в бездротових, так і у оптичних мережах транспортної мережі. З іншого боку, підтримка віддаленої обробки вимагає високої пропускної спроможності транспортного з'єднання між RU та ресурсами обчислення повторного споживання на CU. Відповідно до цих спостережень, запропоновано конвергентну оптичну мережеву інфраструктуру, яка з'єднує обчислювальні ресурси з фіксованими та мобільними користувачами, для підтримки як операційної мережі (C-RAN), так і кінцевих користувачів. У цьому контексті оперативні мережеві сервіси відносяться до послуг, необхідних для експлуатації 5G-інфраструктури, з наданням послуг FH, запропонованим операторам/постачальникам інфраструктури. З іншого боку, послуги кінцевого користувача – це послуги,

призначені для кінцевих користувачів (наприклад, доставка контенту, ігри та ін.), які в середовищах 5G вимагають підключення ВН, згадані в цій роботі як послуги ВН. Основні технічні нововведення запропонованого рішення включають в себе:

- загальну архітектурну схему, за стандартом ETSI віртуалізації мережевої функції (Network Function Virtualization - NFV) та відкритою довідковою архітектурою програмного забезпечення, визначеним мережею (Software Defined Networking - SDN), що підтримує спільні служби ВН та ФН і концепцію гнучких функціональних розбивок;
- впровадження нової архітектури площини даних, що поєднує гетерогенні безпроводні, а також пасивні та активні технології оптичної мережі для підтримки загальної архітектури та її вимог;
- розробку нової багатоцільової структури моделювання для оцінки ефективності запропонованого підходу.

Це включає в себе модель надання послуг, яка використовується для вивчення різних параметрів ФН та ВН. Загальна мета моделі є подвійною: а) мінімізувати операційні витрати, пов'язані з послугами ФН з точки зору споживання електроенергії, за суворих обмежень затримки та б) мінімізувати повну затримку обслуговування послуг ВН.

#### **4.4. Модель віртуалізації ресурсів конвергентної програмно-конфігурованої оптичної мережі доступу**

Як зазначалося раніше, запропонована інфраструктура, показана на рис. 4.1, демонструє значну різноманітність з точки зору технологій. Щоб вирішити проблему управління та експлуатації цього типу складної гетерогенної інфраструктури, пропонується інтеграція підходів SDN та NFV. У SDN лінія керування відокремлена від площини даних і управляється логічно

централізованим контролером, який має цілісну абстракцію мережі. В ранніх стандартах SDN, реалізація площини даних підтримувала лише функції, пов'язані з пересиланням пакетів. Однак поява нових високоефективних технологій, таких як 5G та Інтернет речей, вимагає виконання набагато складніших мережевих функцій, таких як планування, моніторинг та керування мережею, віртуалізація ресурсів, ізоляція тощо. У відповідь на це програмовані апаратні інфраструктури, керовані SDN, тепер можуть ефективно підтримувати реалізацію цих функцій за допомогою мов програмування високого рівня.

У той же час, NFV дозволяє виконувати мережеві функції на обчислення ресурсів, використовуючи технології віртуалізації програмного забезпечення. Спільне використання SDN та NFV має значні переваги, пов'язані з гнучким, динамічним та ефективним використанням інфраструктурних ресурсів, спрощенням інфраструктури та управлінням, підвищеною масштабованістю та стійкістю, а також забезпеченням орієнтованої кінцевої послуги [152].

Елементи мережі SDN можна розглядати як VNF, оскільки вони можуть бути реалізовані як програмне забезпечення, запущені на універсальних платформах у віртуалізованих середовищах. Моделі SDN та не SDN можуть підтримуватися мережевими елементами SDN. З іншого боку, мережеві додатки можуть включати функції контролера SDN або взаємодіяти з контролерами SDN і самі можуть забезпечувати VNF. Мережеві елементи, керовані контролерами SDN також можуть надавати фізичні мережеві функції (Physical Network Functions - PNF). Одною з можливих мережевих програм вважається послідовне обслуговування (Service Chaining - SC), що поєднує і організовує фізичні та віртуальні мережеві функції для підтримки кінцевого обслуговування послуг у гетерогенних середовищах.

Скориставшись концепцією SDN та перевагами міжгалузевої віртуалізації, запропоновано пропонує загальну багаторівневу архітектуру, здатну ефективно підтримувати сервіси в мережах 5G (рис. 4.4).

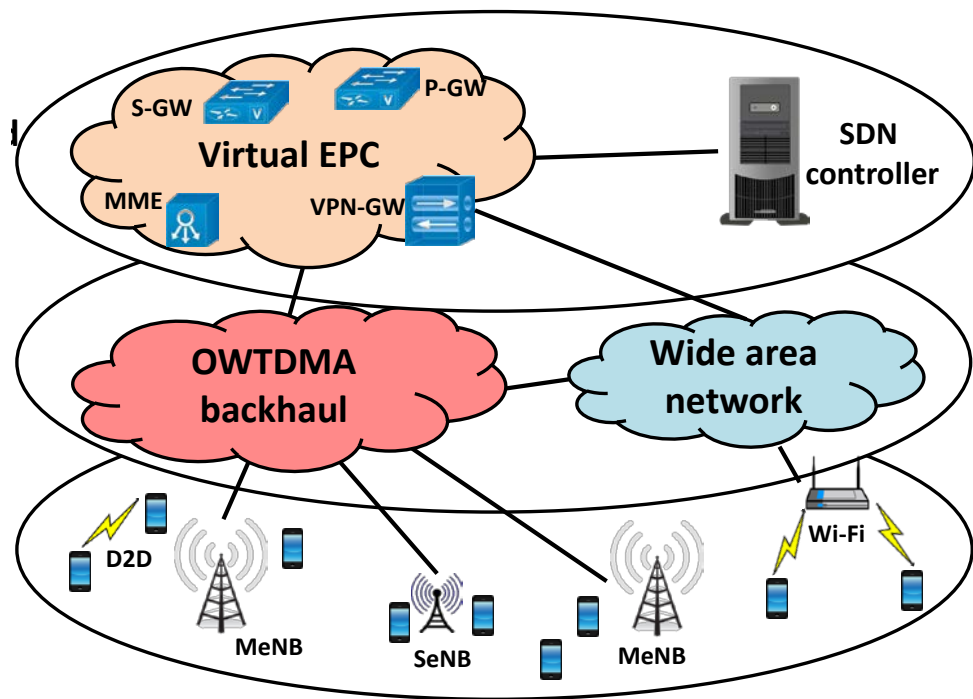


Рис. 4.4. Тривірнева архітектура програмно-конфігурованої конвергентної мережі доступу з інтеграцією мереж мобільного та фіксованого зв'язку.

Рівень управління інфраструктурою (Infrastructure Management Layer – IML) відповідає за управління різними технологічними доменами та створенням фрагментів віртуальної інфраструктури (virtual infrastructure – VI), що включає неоднорідні ресурси. Ці VI фрагменти дозволяють використовувати багатогранні моделі операцій, що забезпечують послуги FN та VN. Цей шар підтримує зв'язок з різними мережевими та обчислювальними контролерами, відповідальними за вилучення інформації та комунікації з окремими доменами. Після того як інформація буде зібрана, ресурси будуть абстраговані та віртуалізовані. З архітектурно-функціональної точки зору, IML вирішує всі функції керування віртуалізацією та віртуальними ресурсами повторного джерела.

Перехресно-доменне орієнтування віртуальної та фізичної інфраструктури, створене та виставлене на вищі шари, здійснюється рівнем контролю. Цей рівень містить абстракцію усіх мережових сегментів та технологічних доменів, а також реалізує конвергентні процедури управління для динамічного та

автоматичного надання послуг кінцевого зв'язку відповідно до конкретних вимог QoS. Конфігурація віртуалізованих (або невіртуалізованих) безпроводних та оптичних мережевих ресурсів, а також застарілих пристроїв здійснюється набором розподілених контролерів SDN. Окрім можливостей конфігурації мережі, що пропонуються контролерами SDN, подальші покращені VNF, що працюють на вершині віртуальної інфраструктури, можуть бути розроблені для безперебійної роботи всієї конвергентної мережі доступу.

Рівень керування та обслуговування інструментування відповідає за конвертоване інструментування обчислень та мережевих послуг. Він також використовується для складання багаторівневих ланцюгів віртуалізованих мережевих функцій і повинен підтримувати взаємосумісність із застарілими програмними та апаратними технологіями та архітектурами.

Для спрощення процесу управління ресурсами в конвергентних мережах зі складною топологічною структурою запропоновано конвергентну платформу на основі програмно-конфігурованих мереж. Дана платформа використовує еластичну архітектуру оптичних телекомунікаційних мереж з гнучкими налаштуваннями для комутації, мультиплексування та адаптивного розподілу інформаційних потоків в залежності від програмної конфігурації на стороні контролера. Окрім того, дана платформа дає змогу здійснювати віртуалізацію ядра мережі мобільного зв'язку, за рахунок чого забезпечується наскрізне керування процесом передавання інформаційних потоків від кінцевих мобільних користувачів до віддалених дата-центрів та глобальної мережі Інтернет. Запропонована архітектура для побудови конвергентних мереж доступу наступного покоління має на меті ефективно підтримувати велику різноманітність послуг, які очікуються в рамках концепцій 5G та Інтернету речей (рис. 4.5).

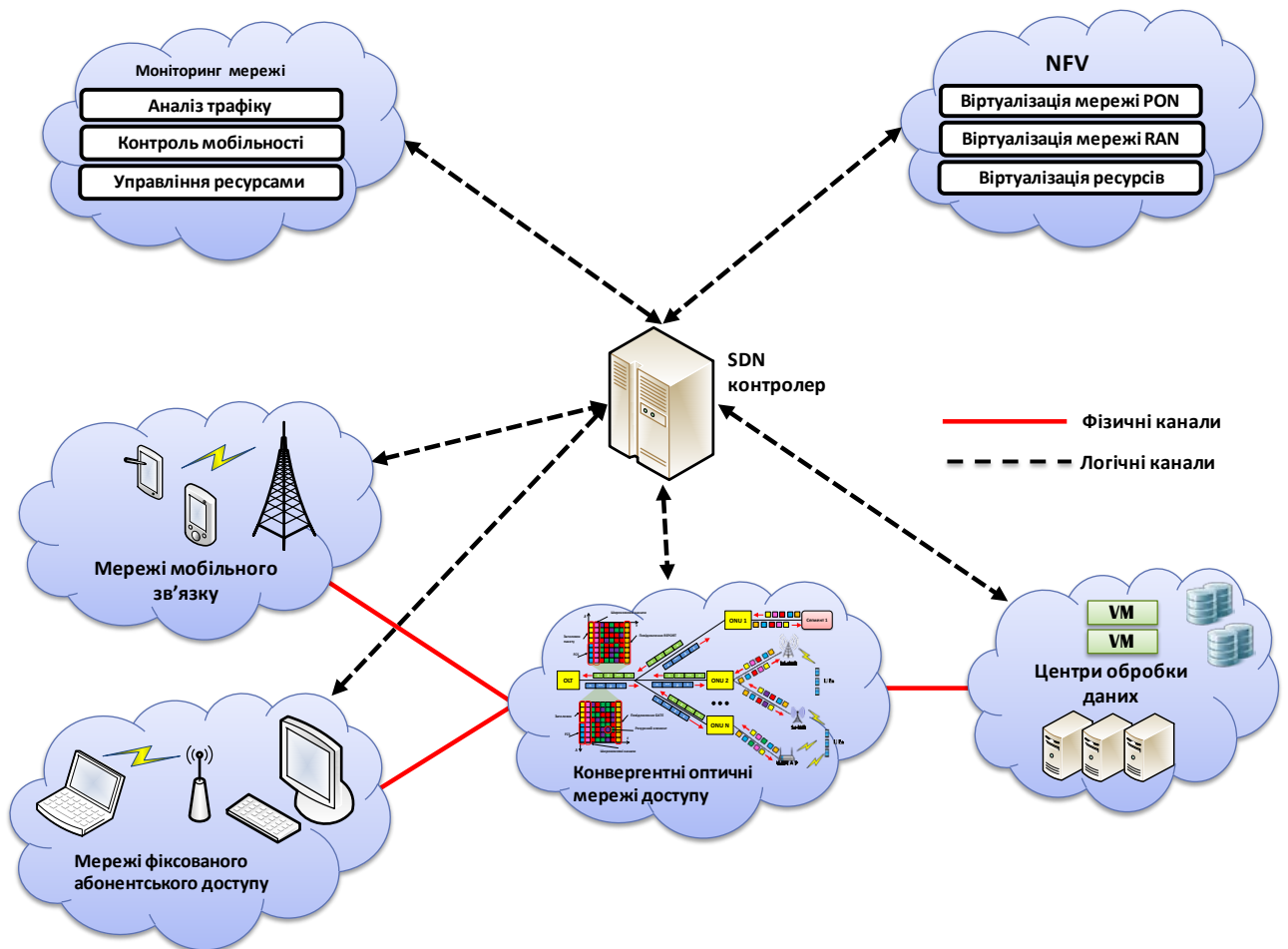


Рис. 4.5. Концептуальна архітектура запропонованої конвергентної мережі доступу.

Віртуалізація ресурсів у запропонованій конвергентній мережі доступу здійснюється на основі високопродуктивних обчислювальних кластерів, які будуються на основі розподілених центрів оброблення даних. Для наскрізного контролю за процесом передавання та розподілу інформаційних потоків запропоновано алгоритми програмного управління ресурсами на основі технології SDN (Software Defined Networks) [10]. Концепція запропонованого рішення базується на чотирьох окремих компонентах гетерогенної інформаційно-комунікаційної інфраструктури, які поєднуються у глобальну систему: центри обробки даних, конвергентні оптичні мережі доступу та сегменти «останньої милі» на основі фіксованих або мобільних мереж зв'язку.

Функціональна модель віртуалізації мережних функцій для конвергентної мережі з інтеграцією сегментів фіксованого та безпроводного доступу представлена на рис. 4.6 [15].

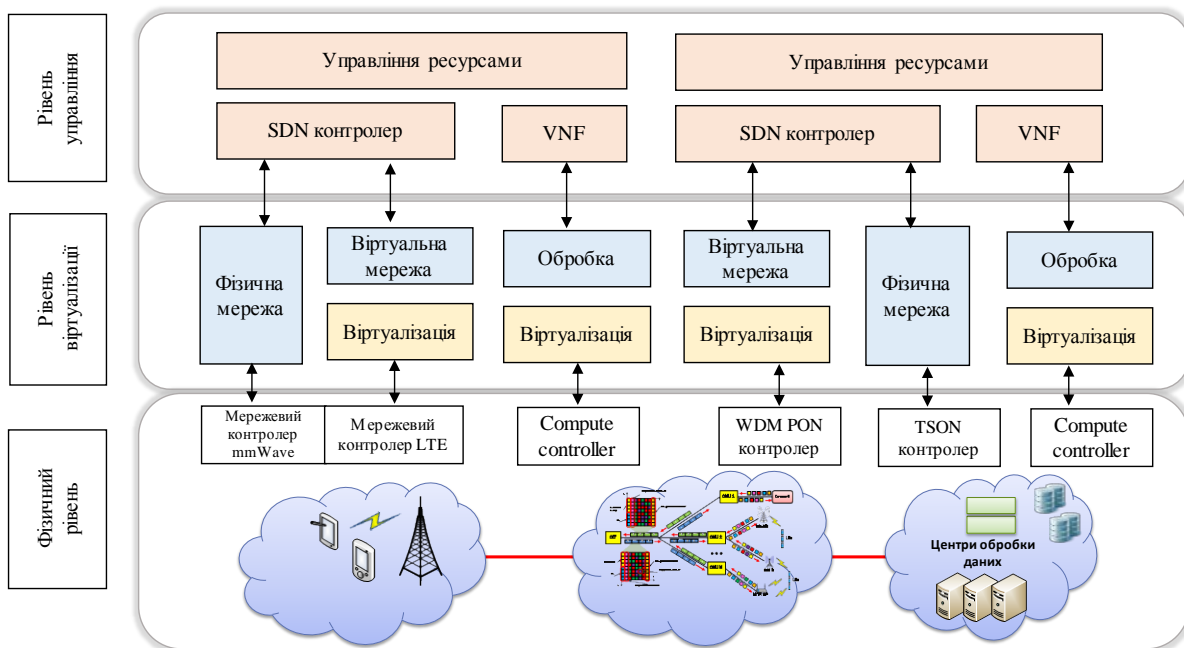


Рис. 4.6. Функціональна модель віртуалізації мережних функцій для конвергентної мережі з інтеграцією сегментів фіксованого та безпроводного доступу.

#### 4.5. Практична реалізація конвергентної оптичної мережі доступу з віртуалізацією мережних функцій

Пропонована мережева інфраструктура використовує набір оптичних та бездротових технологій для взаємодії різних кінцевих пристроїв та ІТ-ресурсів. Домен безпроводного доступу включає коміркову мережу LTE, яка працює в діапазоні частот 2 ГГц, технології безпроводного доступу Wi-Fi та високочастотні гігабітні безпроводні мережі 5G. Поєднання даних технологій призводить до значної неоднорідності системи, оскільки вони відрізняються як з точки зору експлуатації, так і з точки зору експлуатаційних параметрів, таких як: використання спектру, характеристики антен, кодування фізичного рівня,



розподілу каналних ресурсів між кількома користувачами, а також швидкість передавання даних та дальність зв'язку.

LTE є одною з основних стільникових технологій бездротового доступу в мережах 4G, яка забезпечує пропускну здатність до 100 Мбіт/с на макрокомірку у низхідній лінії зв'язку та 50 Мбіт/с на макрокомірку у висхідній лінії, в частотній смузі 20 МГц. Дані швидкості передавання даних можуть бути додатково збільшені за допомогою технології Multiple Input Multiple Output (MIMO). У той же час, LTE може забезпечити покращені характеристики QoS, такі як затримки з передачею низьких пакетів, швидке та безперешкодне перенесення, що підтримує сценарії швидкісного автотранспортного зв'язку та роботу з різними розподілами пропускну здатності. LTE також може підтримувати широкий спектр послуг і показників ефективності у широкому діапазоні середовищ, таких як місто, відкрита місцевість та приміщення. Як вже було сказано, функціональні можливості обробки сигналів у системах LTE можуть виконуватися у вузлах BBU, які можуть бути розміщені разом з антенами або дистанційно (використовуючи концепцію C-RAN). В даній роботі розглядається поєднання усіх цих технологій в рамках єдиної конвергентної інфраструктури, з врахуванням таких показників як затримка, мобільність абонентів та щільність коміркової мережі [153-154].

#### **4.5.1. Розподіл ресурсів оптичної інфраструктури у конвергентній мережі доступу**

Запропонована конвергентна мережа доступу використовує рішення систем зі спектральним ущільненням каналів WDM, для взаємозв'язку віддалених абонентських вузлів із крайовими вузлами транспортної мережі та централізованими вузлами обробки сигналів BBU [155]. На відміну від систем 10G-EPON, які використовують часове мультиплексування окремо для кожної довжини хвилі, запропонована система WDM-PON забезпечує (рис. 4.7):

- можливість призначити одну або декілька спеціальних довжин хвиль для одного вузла, для підтримки з'єднання з високими вимогами до пропускної здатності (наприклад, CPRI FH з'єднання);
- захист довжини хвилі для відокремлення її із загального пулу ресурсів для тунелювання сигналів CPRI;
- спрощене керування потоками між ONU та OLT за принципом «точка-точка» на каналному рівні.

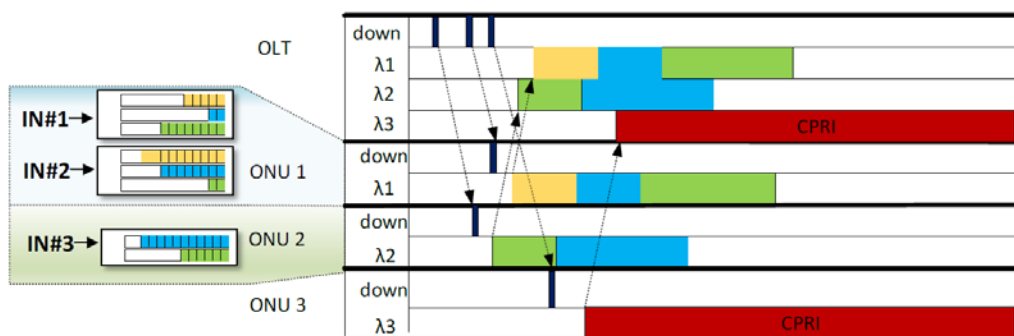


Рис. 4.7. Управління ресурсами оптичних систем зі спектральним ущільненням каналів в конвергентній мережі доступу.

У висхідній лінії трафік, створений з точок доступу, мультиплексується через відповідні інтерфейси. Ці інтерфейси необхідні для усунення невідповідності ресурсних елементів мереж PON та LTE, і обладнані буферами, які дозволяють створювати віртуальні черги VOQ. Вихід цих інтерфейсів використовується як вхідний сигнал на ONU. Кожен ONU здатний адаптивно вибрати довжину хвилі передавання, щоб відповідати підключеному порту фільтра, використовуючи канал зв'язку поза межами діапазону. Трафік висхідної лінії передається через фільтри L/C та віддалені вузли (RN), перш ніж він досягне OLT. Віддалені вузли оснащені циклічними AWG, з підтримкою мультиплексування та демультиплексування каналів WDM. Щоб одночасно підтримувати двонаправлений трафік, AWG є налаштований на роботу в L та C діапазонах, що забезпечує до 40 каналів на кожен смугу. Через таку конфігурацію у висхідній лінії канали, що належать до певного діапазону

хвиль, мультиплекуються і пересилаються до фільтрів смуги пропускання OLC L/C, тоді як в низхідній лінії здійснюється зворотня операція. Кожен OLT також оснащений крос-з'єднувачем, який дозволяє великій кількості зовнішніх портів бути гнучкими, з'єднаними з матрицями OLT приймача та передавача.

Для подальшого поліпшення результатів мультиплексування та виявлення невідповідності гранулярності між TSON та мережевими доменами PON, система також оснащена другим набором інтерфейсів, що також дозволяє створювати VOQ. VOQ дозволяють зберігати та мультиплексувати трафік вниз, перш ніж переадресовуватись на відповідний передавач. Для простоти, передбачається, що кількість приймачів на OLT дорівнює кількості довжин хвиль, призначених на ONU. Проте, аналіз можна легко розширити, щоб покрити випадки, коли довжини хвиль розподіляються між різними ONU.

#### **4.5.2. Управління ресурсами для забезпечення гарантованих показників ефективності конвергентної мережі доступу**

Для забезпечення вимог, які передбачаються для майбутніх сервісів у мережах доступу, необхідний оптимальний розподіл ресурсів з огляду на характеристики програми та пристрою. Для досягнення цієї мети ключову роль може відіграти розробка інтелектуальних алгоритмів оптимізації, враховуючи різні ключові показники ефективності (Key Performance Indicators - KPI) (тобто потужність, затримка, споживання енергії) для всіх постачальників фізичної та віртуальної мережі. У архітектурі SDN/NFV цей процес реалізується в рівнях керування та контролю інфраструктури, пропонуючи постачальникам послуг мережі відповідні інструменти, які можуть допомогти у виконанні широкого кола завдань, зокрема:

- діяльність, пов'язана з управлінням мережі, здатна створювати/видаляти/оновлювати мережеві сервіси та набір інших відповідних мережевих функцій;

- управління з урахуванням віртуальних або фізичних ресурсів та визначення правил трафіку, щоб визначити вибір оптимальної конфігурації мережі;
- функції масштабування, такі як, можливість під'єднання/від'єднання окремих сегментів мережі;
- оркестрація сервісів із підтримкою функцій OSS (Operation Support System).

Окрім обмежень у мережі та потужності, затримка від кінця до кінця є важливим KPI, який також слід розглянути під час аналізу. У сильно завантажених гетерогенних мережах повна затримка може суттєво впливати на затримки у черзі, пов'язані з інтерфейсами. Тому дуже важливим є застосування специфічних правил розміщення в черзі та стратегій планування в цих сегментах. Значні переваги затримки можуть бути досягнуті шляхом створення необхідних мережевих функцій та резервування необхідних віртуальних/фізичних ресурсів [156]. Кінцеві затримки можуть бути математично модельовані за допомогою моделей чергування та прийняття апроксимації замкнутої форми, створеної шляхом моделювання різних мережевих доменів як відкритих, замкнутих та/або змішаних почергових мереж. Проте, ці моделі не можуть бути поширені на технологічні домени, де загальні буфери поділяються між кількома віртуальними потоками. Типовий приклад цього виключення стосується крайових вузлів оптичного домену, де загальні черги FIFO можуть бути пройдені кількома віртуальними потоками. Рішенням цієї проблеми є прийняття концепції віртуальних черг VOQ, яка може забезпечити ізоляцію трафіку між потоками, створюючи одночасно забезпечення пропускної здатності потоку з гарантіями низької затримки.

### **4.5.3. Забезпечення гарантованих показників ефективності при мобільності кінцевих користувачів**

Додатковим важливим фактором, який слід враховувати під час експлуатації запропонованої інфраструктури, є мобільність кінцевих користувачів. Щоб забезпечити мобільність, фізичні ресурси повинні бути зарезервовані для підтримки безперервного обслуговування. Кількість резервних ресурсів збільшується при зростанні швидкості переміщення кінцевого користувача, зменшенні розміру комірок (користувачі мікрокомірок характеризуються вищою частотою хендверів), а також прийнята модель трафіку.

Різні технології радіодоступу характеризуються різними обмеженнями мобільності кінцевих користувачів, при забезпеченні ефективного обслуговування. Наприклад, технологія WiGig, забезпечує високу пропускну здатність для фіксованих користувачів, у той час як WiFi та LTE можуть підтримувати менші швидкості передавання даних, але з більшим рівнем мобільності кінцевих користувачів. Щоб максимізувати переваги, надані наявними технологіями, користувачі з низькою мобільністю підключаються до домену WiGig, звільняючи, таким чином, ресурси мереж WiFi та LTE для мобільних користувачів. Для забезпечення безрозривного з'єднання для мобільного користувача при хендвері, щоб усі сусідні комірки мали достатній обсяг зарезервованих ресурсів як у мобільній так і опорній мережі [157].

Для обмеження кількості перерозподілів ресурсу більш практичний підхід полягає у тому, щоб пов'язати зарезервовані ресурси в сусідніх комірках з імовірністю передавання через WiGig та LTE та резервувати певні ресурси для цілей передавання трафіку. З урахуванням вищезгаданих міркувань, проблема може бути сформульована таким чином, щоб оптимізувати продуктивність конвертованої мережі та обчислювальної інфраструктури, враховуючи також тривалість роботи акумулятора мобільних пристроїв з затримкою та

обмеженням мобільності [158]. Вихід цієї задачі оптимізації може призвести до вибору оптимального SC з набору декількох ланцюгів. Крім того, він може визначити можливі місця розташування VNF або PNF, а також оптимальну технологію бездротового доступу, яка повинна бути використана.

#### **4.6. Висновки до 4-го розділу**

Запропоновано модель віртуалізації мережних функцій для конвергентної мережі з інтеграцією сегментів фіксованого та безпроводного доступу. Особливістю даної моделі є те, що вона дає змогу контролювати процес розподілу інформаційних потоків одночасно у сегментах фіксованого доступу, опорних транспортних мережах та мережах радіодоступу. Для спрощення процесу управління ресурсами в конвергентних мережах зі складною топологічною структурою запропоновано конвергентну платформу на основі програмно-конфігурованих мереж. Дана платформа використовує еластичну архітектуру оптичних телекомунікаційних мереж з гнучкими налаштуваннями для комутації, мультиплексування та адаптивного розподілу інформаційних потоків в залежності від програмної конфігурації на стороні контролера. Окрім того, дана платформа дає змогу здійснювати віртуалізацію ядра мережі мобільного зв'язку, за рахунок чого забезпечується наскрізне керування процесом передавання інформаційних потоків від кінцевих мобільних користувачів до віддалених дата-центрів та мережі Інтернет.

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розроблення моделей, методів та алгоритмів передавання інформаційних потоків у конвергентних оптичних мережах з інтеграцією сегментів мобільного та фіксованого доступу в умовах нестаціонарної інтенсивності трафіку та змінних вимог до параметрів якості передавання даних.

1. Проведено аналіз стану та тенденцій розвитку конвергентних оптичних мереж доступу і визначено основні обмеження, зумовлені неефективним розподілом ресурсів, значним обсягом службового трафіку, складністю процесу адаптивного управління ресурсами мережі з одночасним забезпеченням належних параметрів пропускної здатності оптичних каналів, відсутністю єдиної площини керування процесом розподілу інформаційних потоків у конвергентній оптичній мережі з поєднанням сегментів фіксованого та мобільного доступу, а також непристосованістю існуючих оптичних мереж доступу до розгортання опорних транспортних каналів для гетерогенних мереж мобільного зв'язку четвертого та п'ятого поколінь із забезпеченням високої ефективності використання пропускної здатності каналів, а також гнучкості та масштабованості оптичної інфраструктури.

2. Удосконалено метод розподілу каналних ресурсів у пасивних оптичних мережах доступу зі спектральним ущільненням каналів шляхом групування спектрально-часових ресурсних блоків для користувацької та службової інформації, що дало змогу підвищити ефективність використання пропускної здатності мережі за рахунок адаптації передавання службового трафіку. На основі удосконаленого методу ресурсного розподілу, розроблено алгоритм мультиплексування корисного та службового трафіку у спектрально-часові ресурсні блоки, який дає змогу підвищити коефіцієнт використання пропускної здатності пасивної оптичної мережі до 5% у низхідному каналі та до 15% у висхідному каналі в залежності від поточної інтенсивності трафіку.

3. Розроблено модель конвергенції фіксованих та мобільних мереж доступу, яка, на відміну від існуючих, враховує нестаціонарність абонентського трафіку в комірках мереж мобільного зв'язку та його періодичні статистичні

характеристики, що дало змогу підвищити ефективність розподілу каналних ресурсів в оптичній мережі доступу. Запропоновано модифіковану архітектуру конвергентної мережі доступу, яка дає змогу мультиплексувати радіосигнали через оптичні канали зв'язку в структурі спектрально-часових ресурсних блоків, що дає змогу розгортати мережі LTE та Cloud-RAN на основі спільної опорної транспортної інфраструктури.

4. Запропоновано метод балансування трафіку між окремими сегментами мережі доступу, який, на відміну від існуючих, враховує ступінь зв'язності вимог до пропускної здатності окремих сегментів мережі, що дає змогу підвищити сумарну ефективність використання пропускної здатності у конвергентній оптичній мережі доступу. На основі запропонованого методу розроблено алгоритм групування інформаційних потоків комірок мобільного зв'язку при здійсненні хендоверу, який дає змогу знизити обсяг надлишкового трафіку в конвергентній мережі доступу до 20 %, в залежності від поточної мобільності абонентів.

5. Запропоновано модель віртуалізації мережних функцій для конвергентної мережі з інтеграцією сегментів фіксованого та безпроводного доступу. Особливістю даної моделі є те, що вона дає змогу контролювати процес розподілу інформаційних потоків одночасно у сегментах фіксованого доступу, опорних транспортних мережах та мережах радіодоступу. Для спрощення процесу управління ресурсами в конвергентних мережах зі складною топологічною структурою запропоновано конвергентну платформу на основі програмно-конфігурованих мереж. Дана платформа використовує еластичну архітектуру оптичних телекомунікаційних мереж з гнучкими налаштуваннями для комутації, мультиплексування та адаптивного розподілу інформаційних потоків в залежності від програмної конфігурації на стороні контролера. Окрім того, ця платформа дає змогу здійснювати віртуалізацію ядра мережі мобільного зв'язку, за рахунок чого забезпечується наскрізне керування процесом передавання інформаційних потоків від кінцевих мобільних користувачів до віддалених дата-центрів та глобальної мережі Інтернет. Запропонована архітектура забезпечує підтримку великої кількості



різноманітних послуг, надання яких очікується в рамках концепцій 5G та Інтернету речей.

6. Проведено моделювання процесу функціонування конвергентної оптичної мережі з інтеграцією сегментів фіксованого та мобільного доступу. Для дослідження впливу різних сервісів було знято статистичні залежності трафіку при використанні трьох основних типів послуг, які переважають у мережах мобільного зв'язку четвертого покоління: веб-сервіси, потокове відео та IP-телефонія, частки яких становлять 30%, 55% та 15%, відповідно. Згідно з проведеними дослідженнями, розподіл пропускної спроможності опорної транспортної мережі становить 60%/40% – на користь низхідного напрямку передавання, що суттєво відрізняється від співвідношення 80%/20%, яке традиційно приймалось при розрахунках існуючих пасивних оптичних мереж.

7. Проведено моделювання та дослідження характеристик трафіку в гетерогенних мережах мобільного зв'язку з однією макрокоміркою та різною кількістю мікрокомірок, для визначення вимог до пропускної здатності опорної мережі. Результати моделювання показують, що при високих значеннях спектральної ефективності радіоканалів мережі мобільного зв'язку, вимоги до пропускної здатності опорної транспортної мережі перевищують максимально можливе значення пропускної здатності одного ресурсного блоку конвергентної оптичної мережі доступу (79.62624 Гбіт/с). Тому, для підвищення масштабованості мережі, запропоновано алгоритм агрегації ресурсних блоків, який дає можливість у періоди пікового навантаження підвищувати пропускну здатність для сегменту або комірки до 320 Гбіт/с. Проведено моделювання процесу передавання трафіку зі змінною інтенсивністю у конвергентних мережах доступу із взаємопов'язаними мережними сегментами. Результати моделювання показали, що запропонований алгоритм балансування трафіку з урахуванням зв'язності окремих сегментів мережі дає змогу підвищувати точність розподілу каналних ресурсів у конвергентних мережах доступу на 7%.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Maksymyuk T. Study and Development of Next-Generation Optical Networks / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk // Smart Computing Review. - 2014. – Vol. 4. - №6. - pp. 470-480.
2. Климаш М.М. Метод спектрально-часового мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу / М.М. Климаш, О.В. Красько, Т.А. Максимюк // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 2(27). - Донецьк: ДонНТУ, 2014. - С. 71-79. (<http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/27329>)
3. Красько О.В. Аналіз параметрів оптичного сигналу в повністю оптичній мережі з комутацією за довжинами хвиль / О.В. Красько, І.В. Демидов, М.В. Брич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації - № 796 – Львів. – 2014. - С. 140-146.
4. Красько О.В. Оцінка параметрів мережі на етапі проектування оптичної транспортної системи / О.В. Красько // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації - №766 – Львів. – 2013. - С. 102-108.
5. Maksymyuk T..Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure /T. Maksymyuk, O.Krasko, M.Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy // Acta Electrotechnica et Informatica,- 2017 - Vol. 17 - no. 4 -pp. 9-13.
6. Красько О.В. Розрахунок параметрів якості транспортних мереж / О.В. Красько, О.В. Корецький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації- №705.-Львів-2011.– С.184-189.
7. Romanchuk V. Development the Methods of Conversion to Photonic Transport Networks / V.Romanchuk, O.Krasko, O.Koretsky//Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Proceedings of the XIth International Conference TCSET'2012, Lviv – Slavske, Ukraine February 21–24, 2012, - p. 258-25.

8. Dumych S. The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network / S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko, P. Guskov // Досвід, розробка і застосування САПР в мікроелектроніці: матеріали XII міжнародної конференції CADSM 2013, 19-23 лютого 2013, Поляна, Україна / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – Р. 88.
9. Krasko O. Advanced Multi-Wavelength Data Transmission Method for Optical Access Networks / O. Krasko, P. Guskov, T. Maksymyuk // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії TCSET'2016: матеріали XIII Міжнародної конференції, 2014, Львів, Славське, Україна / Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. с. 518-520.
10. Maksymyuk T. Software Defined Optical Switching for Cloud Computing Transport Systems / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Jo // ACM IMCOM 2015: Proceedings (January 8–10, 2015, Bali, Indonesia). – 2015. – Р. 42.
11. Krasko O. Data flows transmission models in converged optical access networks. / O. Krasko, M. Klymash, O. Lavriv // Problems of Infocommunications. Science and Technology – 2015 IEEE Second International Scientific-Practical Conference (Kharkiv, October 13-15, 2015). – 2015. – Р. 65–68.
12. Krasko O. Wavelength rearrangement and load balancing algorithm for OWTDMA-PON network / O. Krasko // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії TCSET'2016: матеріали XIII Міжнародної конференції, 23-26 лютого 2016, Львів, Славське, Україна / Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016.-с.950-952.
13. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk, M. Klymash // Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології: Матеріали 3-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 4-6 жовтня 2016 р.). – 2016. – Р. 33–35.

14. Krasko O. Enhanced MAC design for convergence of 5G backhaul network/ O. Krasko, H. Al-Zayadi, A. Masyuk, M. Klymash // 2nd IEEE International Conference on Advanced Information and Communication Technologies-2017 (AICT-2017): Conference Proceedings. – Lviv, 2017. – P. 213-216.
15. Krasko O. Network Functions Virtualization for Flexible Deployment of Converged Optical-Wireless Access Infrastructure / O. Krasko, H. Al-Zayadi, V. Pashkevych, H. Kopets, B. Humeniuk // IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET'2018, Lviv – Slavske, Ukraine February 20–23, 2018. - paper #425.
16. Романчук В.І. Перехід до фотонних мереж. / В.І. Романчук, О.В. Красько // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011» СПТЕЛ – 2011, Львів 27-30 жовтня 2011. – Львів – 2011. С. 37 – 39.
17. Романчук В.І. Дослідження ефективності динамічних методів маршрутизації на транспортній мережі / В.І. Романчук, О.В. Корецький, О.В. Красько, О.І. Сиротинський // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2010» СПТЕЛ – 2010, Львів 28-31 жовтня 2010. – Львів – 2010 – С. 22 – 25.
18. Красько О.В. Дослідження часових параметрів якості у фотонних транспортних системах. / О.В. Красько, О.В. Корецький // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій» , Київ, 16-19 квітня 2013 р. –Київ, 2013. – С. 113–115.
19. Krasko O. Effectiveness of Virtual Concatenation Algorithms for Next Generation SDH/SONET Networks / O. Krasko // Computer Science and Engineering 2013: Proceedings of the 6th International Academic Conference of Young Scientists (CSE-2013), Lviv, 21–23 November. – 2013. – P. 38–39.
20. Красько О.В. Аналіз ефективності побудови фотонних транспортних мереж. / О.В. Красько // Матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2011. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 236-237.

- 21.Красько О. В. Визначення ефективності використання механізмів конкатенації для мереж NG SDH блоків / О. В. Красько // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013» СПТЕЛ – 2013, Львів 30 жовтня – 2 листопада 2013. – Львів –2013. – С. 227–232.
- 22.Красько О.В. Адаптація смуги пропускання в мережах NG-SDH/WDM / О.В. Красько, О.А. Лаврів, О.І. Сиротинський // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014”. Львів 30 жовтня – 2 листопада 2014. – Львів – 2014. – С. 201 – 205.
- 23.Красько О.В. Методика розрахунку затримки в оптичних мережах з комутацією блоків. / О.В. Красько // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2010» СПТЕЛ – 2010, Львів 28-31 жовтня 2010. – Львів – 2010 – С. 31– 33.
- 24.Krasko O.V. Dynamic Bandwidth Allocation for 5G Optical Backhaul Networks with Wavelength Division Multiplexing / O.V. Krasko, M.V. Brych, A. Al-Ansari, N. Qasim // International Scientific-Practical Conference (I International Symposium) "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication," November 9-11, 2017, Chernivtsi, Ukraine. – P. 110-111.
- 25.Cisco Visual Networking Index (2016) Forecast and Methodology, 2015-2020. <http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/complete-white-paper-c11-481360.html>.
- 26.Maksymyuk T. Deployment strategies and standardization perspectives for 5G mobile networks/ T. Maksymyuk, M. Klymash and M. Jo // Proceedings of 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (TCSET), February 23-26, 2016, Lviv, Ukraine - pp. 953-956. doi: 10.1109/TCSET.2016.7452235
- 27.Bhushan N. Network densification: the dominant theme for wireless evolution into 5G / N. Bhushan, Li Junyi, D. Malladi et al. // IEEE Communications

- Magazine.– USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014 – vol. 52, no. 2 – P.82-89.
28. Insoo N. A Holistic View on Hyper-Dense Heterogeneous and Small Cell Networks / H. Insoo, S. Bongyong, S.S. Soliman // IEEE Communications Magazine USA: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2013 – vol. 51 – no. 6 – P.20-27
29. Максимюк Т.А. Оптимізація параметрів гетерогенних мереж мобільного зв'язку на основі фрактальної геометричної моделі /Т.А. Максимюк, М.В. Брич, М.М. Климаш // Наукові записки УНДІЗ, Київ, 2015. – № 4 (38), С. 5-16.
30. Klymash M. State of the art and further development of information and communication systems / M. Klymash, O. Lavriv, T. Maksymyuk and M. Beshley // Proceedings of 2016 International Conference Radio Electronics & Info Communications (UkrMiCo), September 11-16, 2016, Kiev - pp.1-6. doi: 10.1109/UkrMiCo.2016.7739637
31. Fekade B. Probabilistic Recovery of Incomplete Sensed Data in IoT/B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Kyryk, M. Jo//IEEE Internet of Things Journal, vol. 4, 2017.
32. Fekade B. A Virtual Server QoS Enhancement Method in Cloud Computing / B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Jo // ACM 10th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ACM IMCOM'2016), Jan. 4-6, 2016, Danang, Vietnam, Article #81.
33. Guskov P. Methods and techniques of spectrum refarming for LTE network deployment/P. Guskov, R. Kozlovskiy, T. Maksymyuk, M. Klymash// IEEE Int. Conf. on Microwave and Telecommunication Technology, Ukraine, pp. 474-475, Sep. 2013.
34. Maksymyuk T. Increasing of energy efficiency of a cognitive radio network/ T. Maksymyuk, M. Klymash, M. Jo// IEEE Int. Conf. on Microwave and Telecommunication Technology, Ukraine, pp. 277-278, Sep. 2013.
35. Klymash M. Improving architecture of LTE mobile network for IoT services provisioning/ M. Klymash, H. Beshley, M. Seliuchenko, T. Maksymyuk// IEEE

- Int. Conf. on Advanced Information and Communication Technologies, Ukraine, pp. 209-212, July, 2017.
36. Stryhalyuk B. Performance increasing method of wireless system based on determining time-frequency localization properties of OFDM signal / B. Stryhalyuk, O. Yaremko, T. Maksymyuk, O. Melnyk // ECONTECHMOD: an international quarterly journal on economics of technology and modelling processes, Krakow, 2012. – vol. 1, №3, P. 49-54.
  37. Yaremko O. The optimal power control method in multiuser cellular networks / O. Yaremko, B. Stryhalyuk, T. Maksymyuk, O. Lavriv, D. Kozhurov // An International Quarterly Journal on Economics in Technology, New Technologies and Modelling Processes. Vol. 2, No 1. Lublin – Cracow – 2013. P. 63-67.
  38. Максимюк Т.А. Моделі стохастичної геометрії для гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління / Т.А. Максимюк, Р.А. Бурачок, І.Б. Чайковський, М.В. Брич // Комп'ютерні технології друкарства, Львів, 2015. – № 33, С. 112-119.
  39. Maksymyuk T. The LTE channel transmission rate increasing // T. Maksymyuk, V. Pelishok // IEEE International Conference on “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” TCSET'2012, (Lviv, Ukraine, 21-24 February, 2012) – pp. 251-252.
  40. Maksymyuk T. Cooperative channels allocation in unlicensed spectrum for D2D assisted 5G cellular network / T. Maksymyuk, M. Brych, M. Klymash, M. Jo // IEEE Int. Conf. on Advanced Information and Communication Technologies (AICT'2017), Lviv, Ukraine, pp. 197-200, July, 2017.
  41. Jo M. Cognitive radio approach for LTE deployment // M. Jo, T. Maksymyuk, M. Kyryk, L. Han // Proceedings of IEEE International Conference on “Perspective Technologies and Methods in MEMS Design” MEMSTECH'2013, (Polyana-Svalyava, Ukraine, April 16–20, 2013) – pp. 63-64.
  42. Maksymyuk T. Comprehensive Spectrum Management for Heterogeneous Networks in LTE-U / T. Maksymyuk, M. Kyryk and M. Jo // IEEE Wireless Communications, vol. 23, no. 6, pp. 8-15, December 2016. doi: 10.1109/MWC.2016.1600042WC.

43. Jo M. Massive MIMO: Survey and Future Research Topics/ M. Jo, D. Araújo, T. Maksymyuk, A.L.F. de Almeida, T. F. Maciel, J. Mota // IET Communications, vol. 10, no.5, 2016, pp. 1938-1946.
44. Huiban G. Traffic grooming in WDM networks with multi-layer switches / G. Huiban, S. Perennes, M. Syska // Proceedings, IEEE International Conference on Communications (ICC), vol. 5, pp. 2896- 2901, Anchorage, AK, May 2002.
45. Думич С.С. Дослідження процесу агрегації трафіку в оптичних транспортних мережах з комутацією блоків / С.С. Думич, Д.С. Жуковська, Т.А. Максимюк // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації, Львів, 2015. – № 818. - С. 130-136.
46. All-Optical Networking Consortium: WDM Description, 1996, <http://www.ll.mit.edu/aon/aonwdm.html>.
47. Krause T. Migration to All-Optical Networks/ T. Krause / Alcatel Network Systems, 1998, <http://www.usa.alcatel.com/telecom/transpt/optical/techpaps/>
48. Cortez S. Enabling the all-optical network / S. Cortez, M. Dickerson // America's Networks, 1998, <http://www.americasnetwork.com/issues/98issues/980201/>
49. Brackett C. Dense Wavelength Division Multiplexing Networks: Principles and Applications /C. Brackett // IEEE Journal on Selected Areas in Communications, №6, vol.8, 1990, P.948-964.
50. Maksymyuk T. Quasi-quadrature Modulation Method for Power Efficient Video Transmission over LTE Networks / T. Maksymyuk, L. Han, X. Ge, H. Chen, M. Jo // IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2014. – vol. 63, №5, P. 2083-2092.
51. Гуськов П. О. Метод динамічного формування структури рівня радіодоступу / П. О. Гуськов, Т. А. Максимюк, М. М. Климаш// Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіoeлектроніка та телекомунікації, Львів, 2015. – № 818, С. 220-230.
52. Климаш М.М.. Покращення параметрів радіоінтерфейсу LTE/HSOPA / М.М. Климаш, О.А. Лаврів, І.О. Кагало, Б.В. Коваль, Т.А. Максимюк // Комп'ютерні технології друкарства, Львів, 2011. – № 26, С. 130-137.



53. Jo M. Device-to-Device (D2D) Based Heterogeneous Radio Access Network Architecture for Mobile Cloud Computing / M. Jo, T. Maksymyuk, B. Strykhalyuk, C. Cho // IEEE Wireless Communications, 2015. – vol. 12, №3.
54. Максимюк Т. А. Моделі конвергенції гетерогенних мереж мобільного зв'язку 5-го покоління на основі технології D2D /Т. А. Максимюк, О. М. Яремко, М. В. Піцик // Телекомунікаційні та інформаційні технології, Київ, ДУТ, 2015. – № 3, С. 91-102.
55. Jo M. A Survey of Converging Solutions for Heterogeneous Mobile Networks/ M. Jo, T. Maksymyuk, R.L. Batista, T.F. Maciel, A.L.F. de Almeida, M. Klymash // IEEE Wireless Communications, 2014. – vol. 21, №8, P. 54-62.
56. Parkvall S. Evolution of LTE toward IMT-advanced / S. Parkvall, A. Furuskär, E. Dahlman // Communications Magazine, IEEE, 2011 – 49(2) – P. 84-91.
57. Maksymyuk T. An IoT based monitoring framework for software defined 5G mobile networks/ T. Maksymyuk, S. Dumych, M. Brych, D. Satria, M. Jo // ACM 11th International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (ACM IMCOM'2017), Jan. 5-7, 2017, Beppu, Japan, #105.
58. Bonenfant P. Framing techniques for IP over fiber / P. Bonenfant, A. Rodriguez-Moral //IEEE Network. No.15, vol.4, 2001, P.12-18.
59. G.984.1. ITU-T. Gigabit-Capable Passive Optical Networks (GPON): General Characteristics. 2008.
60. Seetharaman, S. IP over DWDM / Seetharaman, S. //Washington University, Washington, 1999.
61. Vantorini D. Demonstration and evaluation of IP-over-DWDM networking as “alien-wavelength” over existing carrier DWDM infrastructure. / Vantorini D., Moura E., Paraschis L., Gerstel O., Silva M., Wollenweber K., Silva L. // National Fiber Optic Engineers Conference (p. NME3). Optical Society of America, 2008.
62. Jana N. Performance analysis of Dynamic Bandwidth Allocation algorithms for long-reach PONs. / N. Jana, G.C. Sankaran, K.M. Sivalingam, and G. Parr // In IEEE 4th International Symposium on Advanced Networks and Telecommunication Systems (ANTS), pages 28–30, 2010.

63. Kani J. Power Saving Techniques and Mechanisms for Optical Access Networks Systems. / J. Kani // *Journal of Lightwave Technology*, 31(4):563–570, 2013.
64. Kani J. Enabling Technologies for Future Scalable and Flexible WDM-PON and WDM/TDM-PON Systems. / J. Kani // *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 16, no. 5:1290–1297, 2010.
65. Kanonakis K. Improving the efficiency of on-line upstream scheduling and wavelength assignment in hybrid WDM/TDMA EPON networks. / K. Kanonakis and I. Tomkos // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 28(6):838–848, 2010.
66. Turna O.C. Traffic Characterization Study on EPON Upstream Channel / O.C. Turna, M.A. Aydin, T. Atmaca, A.H. Zaim, and Tuan-Dung Nguyen // *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC)*, 2011 7th International, pp.1601-1606, 4-8 JULY 2011, Istanbul, Turkey.
67. Nguyen T. D. An Enhanced QoS-enabled Dynamic Bandwidth Allocation Mechanism for Ethernet PON / T.D. Nguyen, T. Atmaca, T. Eido // *Fifth European Conference on Universal Multiservice Networks, ECUMN'2009*, October 11-16, 2009, Sliema, Malta
68. Prado A.A. Performance analysis of Ethernet Passive Optical Networks with high load through a hybrid analytical/simulated model. / A.A. Prado and A.J. Abelem // *EUROCON - International Conference on Computer as a Tool (EUROCON)*, pages 1–4, April 2011.
69. Kryvinska N. Managing an increased service heterogeneity in a converged enterprise infrastructure with SOA / Kryvinska // *International Journal of Web and Grid Services*, vol. 4, no.4, 2008, pp. 440-460.
70. Blumenthal D.J. First demonstration of multihop all-optical packet switching. / D.J. Blumenthal, R. J. Feuerstein, J. R. Sauer // *IEEE Photonics Technology Letters*, vol.6, no.3, pp.457-460, 1994.
71. Blumenthal D.J. Photonic Packet Switches: Architecture and Experimental Implementations / D.J. Blumenthal, P.R. Prucnal, J.R. Sauer // *Proceedings of the IEEE*, vol.82, November, 1994, P.1650-1665.

72. Lee C. H. Fiber to the Home Using aPON Infrastructure / C. H. Lee, W. V. Sorin, and B. Y. Kim // *Journal of Lightwave Technology*, 24(12):4568–4583, 2006.
73. Barry R. A.. All-optical network consortium-ultrafast TDM networks / R. A. Barry, V. W. S. Chan, // *IEEE Selected Areas in Communications*, , No. 14, vol. 5, P. 999-1013.
74. Кайдан М.В. Дослідження принципів побудови транспортних мереж на основі технології OLS / М.В. Кайдан, В.С. Андрущак, С.С. Думич // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*, Львів, 2016. – № 849. - С. 203-209.
75. Kaidan M. Wavelength Routed Optical Neural Networks // M. Kaidan, S. Dumych, B. Strykhalyk, O. Yaremko, O. Melnyk / *IEEE International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science TCSET'2012 (Lviv, Ukraine, February 21-24, 2012)* – pp. 246-247.
76. Корецький О.В. Моделі та алгоритми підвищення ефективності комутації інформаційних потоків у повністю оптичних телекомунікаційних системах / О.В. Корецький, С.С. Думич // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*, Львів, 2013. – № 766. - С. 96–103.
77. Кайдан М.В. Розрахунок параметрів якості обслуговування у фотонних транспортних мережах / М.В. Кайдан, С.С. Думич, Т.А. Максимюк, Р.А. Бурачок, Л.М. Готра // *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації*, Львів, 2014. – № 796. - С. 147–156.
78. Kazovsky L. G. Next-Generation Optical Access Networks. / L. G. Kazovsky, Wei-Tao Shaw, D. Gutierrez, Ning Cheng, Shing-Wa Wong // *Journal of Lightwave Technology*, 25(11):3428–3442, 2007.
79. Mitsenkov A. Geography-and infrastructure-aware topology design methodology for broadband access networks (FTTx)/ A. Mitsenkov, G. Paksy, T. Cinkler // *Photonic Network Comm.*, vol. 21, no. 3, pp. 253-266, 2011.

80. Kramer G. Supporting Differentiated classes of service in Ethernet Passive Optical Networks. / G. Kramer, B. Mukherjee, S. Dixit, Y. Ye, and R. Hirth // Journal of Optical Networking, 1(8):280–298, 2002.
81. Recommendation ITU-T (2005), ONT management and control interface specification for B-PON.
82. Recommendation ITU-T G.984.3 (2014), Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): Transmission convergence layer specification.
83. Recommendation ITU-T G.984.4 (2008), Gigabit-capable passive optical networks (G-PON): ONT management and control interface specification.
84. Recommendation ITU-T G.989.2 (2014), 40-Gigabit-capable passive optical networks 2 (NG PON2): Physical media dependent (PMD) layer specification.
85. Recommendation ITU-T G.933.x-series (in force), Very high speed digital subscriber line foundation.
86. Recommendation ITU-T G.8264 (2014), Distribution of timing information through packet networks.
87. Recommendation ITU-T G.9802 (2015), Multiple-wavelength passive optical networks (MW-PONs).
88. Recommendation ITU-T G.Sup45 (2009), GPON power conservation.
89. Recommendation ITU-T G.Sup48 (2010), 10-Gigabit-capable passive optical networks: Interface between media access control with serializer/deserializer and physical medium dependent sublayers.
90. Recommendation ITU-T G.Sup49 (2011), Rogue optical network unit (ONU) considerations.
91. Harle D. Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm for Differentiated services over WDM EPONs. / D. Harle K. Kwong and I. Andonovic // The Ninth International Conference on Communications Systems, pp 116–120, 2004.
92. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев // Эко-Трендз, Москва, 2001 – 331 с.
93. Агравал Г.П. Волоконно-оптические системы передачи/ Г.П. Агравал// Часть 1: Пер. с англ, Новосибирск: Веди, 2005 – 252 с.

94. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман // Перевод с англ. / Под ред. Н. Н. Слепова. - М.: Техносфера, 2003. - 590 с.
95. Стрихалюк Б.М. Модель акустооптического коммутатора для повністю оптичних телекомунікаційних систем / Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк, В.З. Пашкевич // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів, 2013. – № 766, С. 90–95.
96. Banerjee A. Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review / A. Banerjee, Y. Park, F. Clarke, H. Song, S. Yang, G. Kramer, K. Kim, B. Mukherjee // Journal of Optical Networking, vol. 4, pp. 737-758, 2005.
97. Maier M. WDM Passive Optical Networks and Beyond: the Road Ahead [Invited]. / M. Maier // IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 1(4):C1–C16, 2009.
98. Nakamura H. NG-PON2 Technology. / H. Nakamura // Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), page NTh4F.5. OSA, 2013.
99. Luo Y. Time and Wavelength-Division Multiplexed Passive Optical Network (TWDM-PON) for Next-Generation PON Stage 2 (NG-PON2) / Y. Luo, X. Zhou, F. Effenberger, X. Yan, G. Peng, Y. Qian, Y. Ma // Journal of Lightwave Technology, 31(4):587–593, 2013.
100. McGarry M.P. WDM Ethernet Passive Optical Networks / M.P. McGarry, M. Reisslein, M. Maier. // IEEE Communications Magazine, 44(2):15–22, 2006.
101. Kaminow I.P. Optical Fiber Telecommunications III/ I.P. Kaminow, T.L. Koch // San Diego, California: Academic Press, 1997, 515p.
102. McGarry M.P. Just-in-Time Scheduling for Multichannel EPONs / M. P. McGarry, M. Reisslein, C. J. Colbourn, M. Maier, F. Aurzada, and M. Scheutzow. // Journal of Lightwave Technology, 26(10):1204–1216, 2008.
103. Inkret R. A heuristic approach to wavelength assignment in all-optical networks/ R. Inkret, B. Mikac, I. Podnar // MELECON Proceedings of the 1998 9th Mediterranean Electrotechnical Conference, vol.2, 1998, P.759-763.

104. Pankaj R.K. Wavelength Requirements of all Optical Networks/ R.K. Pankaj, R.G. Gallager// IEEE/ACM Transactions on Networking, №3, vol.3, 1995, P.269-280.
105. Baroni S. Analysis and Design of Resilient Multifiber Wavelength-Routed Optical Transport Networks/ S. Baroni, P. Bayvel, R.J. Gibbens, S.K. Korotky//IEEE Journal of Lightwave Technology, №5, vol.17, 1999, P.743-758
106. Shi L. Energy-Efficient Long-Reach Passive Optical Network: A Dynamic Wavelength Allocation Scheme / L. Shi, S. S. Lee, and B. Mukherjee // OSA Technical Digest (CD) (Optical Society of America, 2010), paper PTuB1. <https://doi.org/10.1364/PS.2010.PTuB1>
107. Saleh A. M. Architectural principles of optical regional and metropolitan access networks/A. M. Saleh, J. M. Simmons //J. Lightwave Technology, Vol. 17, 1999, P. 2431–2448.
108. Kramer G. What is Next for Ethernet PON.The Joint / G. Kramer. // International Conference on Optical Internet and Next Generation Network. COIN-NGNCON, pages 49–54,2006.
109. Kramer G. Interleaved Pollingwith Adaptive Cycle Time (IPACT): A Dynamic Bandwidth Dis-tribution Scheme in an Optical Access Network / G. Kramer, B. Mukherjee, and G. Pesavento // Photonic Net-work Communications,4(1) pp - 89–107, 2002.
110. Nakamura M. Proposal of networking by PON Technologies for full land Ethernet services in FTTx / M. Nakamura, H. Ueda, S. Makino, T. Yokotani, K. Oshima // Journal of Lightwave Technology, Vol. 22, Issue 11, pp. 2631–2640, 2004.
111. McGarry M. P. Ethernet PONs: a sur-vey of Dynamic Bandwidth Allocation (DBA) / M. P. McGarry, M. Maier, and M. Reisslein // Algorithms.IEEECommunications Magazine,42(8):S8–15,2004.
112. Kramer G. Ethernet passive optical networks. / Glen Kramer // McGraw-Hill, NewYork,2005. ISBN0071445625.
113. Özgür Can. What is the Traffic Characterization on EPON's Upstream Channel? / Özgür Can TURNA, M.Ali AYDIN, Tülin ATMACA, A.Halim

- ZAIM // The First International Conference on Networking and Future Internet(ICNFI 2011), Nisan 5-8 2011,Paris Franse.
114. Luo Y. Bandwidth Allocation for Multiservice Access on EPONs. / Y. Luo and N. Ansari. // IEEE Communications Magazine,43(2):S16–S21,2005.
115. Ma M. A bandwidth guaranteed pollingMAC protocol for Ethernet passive optical networks./ M. Ma, Y. Zhu, and Cheng T. // Twenty-Second Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communi-cations INFOCOM, volume 1, pages 22–31,2003.
116. Kantarci B. Periodic GATE Optimization(PGO): A New Service Scheme for Long-Reach Passive OpticalNetworks. / B. Kantarci and H.T. Mouftah. // IEEE Systems Journal,4(4):440–448,2010.
117. Turna O.C. A Novel OLT Based Energy Efficiency Algorithm in TDM Passive Optical Networks / O.C.Turna, M.A. Aydin, T. Atmaca // Performance and Security Modelling & Evaluation of Cooperative Heterogeneous Networks (HET-NETs),11-13 Nov. 2013, West Yorkshire, England, UK.
118. Park C.G. Packet delay analysis of symmetric gated polling system for DBA scheme in an EPON. / C.G. Park, D.H. Han, and K.W. Rim. // Telecommunication Systems,30(1):13–34,2005.
119. Kramer G. Fair queueing with service envelopes(FQSE): a cousin-fair hierarchical scheduler for subscriber accessnetworks" / G. Kramer, A. Banerjee, N. K. Singhal, B. Mukherjee, SudhirDixit, and Yinghua Ye. // IEEE Journal on Selected Areas in Communications,22(8):1497–1513,2004.
120. Mcgarry M. Ethernet Passive Optical Network Architectures and Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms / M. Mcgarry, M. Reisslein, and M. Maier. // IEEE Communications Surveys Tutorials,10(3):46–60, 2008.
121. Nowak D. Bandwidth allocation for service level agreement aware Ethernet passive optical networks. / D. Nowak, P. Perry, and J. Murphy. // IEEE Global Telecommunications Conference GLOBECOM, vol. 3, P. 1953–1957,2004.
122. Xia Y. On the large deviation of resequencing queue size: 2-M/M/1 case / Y. Xia, D. Tse // IEEE INFOCOM 2004, vol.4, pp. 2374-2382, March 2004.

123. Zheng J. Mouftah H.T. A survey of dynamic bandwidth allocation algorithms for Ethernet Passive Optical Networks. *Optical Switching and Networking* 6, , 2009p.151–162.
124. Mcgarry M.P., Reisslein M., Maier M. Ethernet Passive Optical Network Architectures and Dynamic Bandwidth Allocation Algorithms. *IEEE Communications Surveys & Tutorials* #3rdQuarter,10(3) 2008, pp.46-60.
125. Kramer G. IPACT: a dynamic protocol for an Ethernet PON (EPON) / Kramer G., Mukherjee B. Pesavento G. // *IEEE Commun. Mag.*,40 (2), 2002, p.74–80.
126. Lannoo B. Analytical model for the IPACT dynamic bandwidth allocation algorithm for EPONs / B. Lannoo, L. Verslegers, D. Colle, M. Pickavet, M. Gagnaire, and P. Demeester // *Journal of Optical Net-working*,6(6):677–688, 2007.
127. Assi C.M. Dynamic Bandwidth Allocation for Quality of Service Over Ethernet PONs. / Assi C.M., Ye,Y., Dixit S., Ali M.A. // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Nov,21(9), 2003, pp.1467-1476.
128. Ozgur Can Turna. Half cycling dynamic bandwidth allocation with prediction on EPON / Ozgur Can Turna, M. Ali Aydin, A. Halim Zaim, Tulin Atmaca // *IEEE Symposium on Computers and Communications (ISCC)*, 2002, pp. 898-902, 2012, Istanbul, Turkey.
129. Ozgur Can Turna. A Prediction Extension for Half Cycling Dynamic Bandwidth Allocation on EPON / Özgür Can TURNA, M.Ali AYDIN, Tülin ATMACA, A.Halim ZADM // *Euro-NF International Workshop on Traffic and Congestion Control for the Future Internet (Euro-NF TCCFI 2011)*, March 31 – April 1 2011, Volos, Yunanistan.
130. Turna O.C. A Novel Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm Based on Half Cycling for EPON / O.C. Turna, M.A. Aydin, T. Atmaca, H. Zaim // *EMERGING 2010*, Florence, Italy.
131. Kantarci B. Bandwidth Distribution Solutions for Performance Enhancement in Long-Reach Passive Optical Networks. / B. Kantarci and H.T. Mouftah. // *IEEE Communications Surveys Tutorials*,14(3):714–733, 2012.



132. Lannoo B. Thorough analysis of the IPACT dynamic band-width allocation algorithm for EPONs / B. Lannoo, L. Verslegers, D. Colle, M. Pickavet // Int. Conf. on Broadband Communications, Networks and Systems, 486–494, 2007.
133. Zheng, J. Media Access Control for Ethernet Passive Optical Networks: An Overview. / Zheng, J., Mouftah H.T. // IEEE Commun. Mag., Feb, 43(2), 2005, p.145–50.
134. Zheng, J. Efficient bandwidth allocation algorithm for Ethernet Passive Optical Networks./ Zheng, J. // IEEE Proceedings - Communications, 153(3), 2006. pp. 464-468.
135. Byun H. J. Dynamic Bandwidth Allocation Algorithm in Ethernet Passive Optical Networks. / Byun H. J., Nho J. M., Lim J. T. // Electronics Letters, 39(13), p. 1001–1002.
136. Luo Y. Limited Sharing with Traffic Prediction for Dynamic Bandwidth Allocation and QoS Provisioning over Ethernet Passive Optical Networks. / Luo Y., Ansari N. // OSA J. Opt. Net., 4(9), 2005b., p. 561–72.
137. Dumych S. Simulation of characteristics of optical burst switched networks // S. Dumych, P. Guskov, T. Maksymyuk, M. Klymash / Proceedings of IEEE International conference on “Microwave and Telecommunication Technology” CriMiCo’2013, (Sevastopol, Ukraine, September 8-14, 2013). – pp. 492-493.
138. Dumych S. Simulation of burst aggregation and signalling schemes for optical burst switched networks // S. Dumych, T. Maksymyuk, P. Guskov / Proceedings of International conference on “Computer Science & Engineering 2013”, (Lviv, November, 2013). – pp. 40-41.
139. Dumych S. Study on traffic aggregation algorithms for edge nodes of optical burst switching network // S. Dumych / Proceedings of the IEEE International conference on “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science” TCSET’2016 (Lviv, Feb. 22- 26, 2016) – pp. 947-949.
140. Klymash M. Spectral Efficiency Increasing of Cognitive Radio Networks // M. Klymash, M. Jo, T. Maksymyuk, I. Beliaiev / Proceedings of IEEE International Conference on “Experience of Designing and Application of CAD Systems in

- Microelectronics” CADSM’2013 (Polyana-Svalyava, February 19-23, 2013) – pp. 169-171.
141. Maksymyuk T. Fractal Modeling for Multi-Tier Heterogeneous Networks with Ultra-High Capacity Demands / T. Maksymyuk, M. Brych, I. Strykhalyuk, M. Jo. // *Smart Computing Review*, 2015. – vol. 5 – №4 – P. 346-355.
142. Максимюк Т.А. Дослідження способів підвищення швидкості передавання в нисхідному каналі мобільної мережі LTE / Т.А. Максимюк, М.О. Селюченко // *Комп'ютерні технології друкарства*, Львів, 2012. – № 27, С. 160-169.
143. Klymash M. Performance Analysis of Smart Optical Burst Switching Networks for Different Signaling Protocols/ M. Klymash, M. Kaidan, S. Dumych // *Smart Computing Review*. - 2015. – Vol. 5. - №5. - P. 378-387.
144. Pi Z. A millimeter-wave massive MIMO system for next generation mobile broadband / Pi Z., Khan F. // *Conference Record of the Forty Sixth Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, Nov. 2012 – P. 693-698.
145. Luo L. Evolving Small-Cell Communications towards Mobile-over-FTTx Networks/ Luo L. // *IEEE Communications Magazine*, p. 93, 2013.
146. Ge X. 5G Ultra-Dense Cellular Networks / X.Ge, S. Tu, G. Mao, C.Wang, T. Han //, *IEEE Wireless Communications*, Vol. 23, No. 1, pp. 72-79, Feb. 2016.
147. Maksymyuk T. Fractal Geometry Based Resource Allocation for 5G Heterogeneous Networks // T. Maksymyuk, M. Brych, A. Masyuk // *Proceedings of IEEE International Conference on Problems of Infocommunications, Science and Technology Kharkiv, Ukraine, October 13-15, 2015*) – pp. 69-72.
148. Maksymyuk T. Stochastic Geometry Models for 5G Heterogeneous Mobile Networks / T. Maksymyuk, M. Brych, V. Pelishok // *Smart Computing Review*, 2015. – vol. 5, №2, P. 89-101.
149. Lin C. Hybrid optical access network integrating fiber-to-the-home and radio-over-fiber systems / Lin C., Chen J., Peng P., Peng C., Peng W., Chiou B., Chi S. // *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 19, no. 8, P. 610-612, 2007.
150. Klymash M. Smart Backhauling Subsystem for 5G Heterogeneous Network // M. Klymash, P. Huskov, I. Kahalo T. Maksymyuk // *IEEE Int. Conf. on*

- “Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics”  
CADSM’2015, (Ukraine, 24-27 February, 2015) – pp. 481-483.
151. Checko A. Cloud RAN for mobile networks - A technology overview/ Checko A.// IEEE Comm. Surv. & Tut., vol. 17, no.1, P. 405-426, 2015.
152. Han B. Network function virtualization: Challenges and opportunities for innovations/ Han B.// IEEE Comm., vol. 53. no.2, pp. 90-97.
153. Chen K. C-RAN: The Road Towards Green RAN / K. Chen, R. Duan // China Mobile Research Institute, white paper, v. 2.5, Oct., 2011.
154. C-RAN: The Road Towards Green RAN – White Paper, ver. 3.0 — China: China Mobile Research Institute, Oct. 2011. — 91 p.
155. Sabella D. RAN as a Service: Challenges of designing a flexible RAN architecture in a cloud-based heterogeneous mobile network / D. Sabella et al.// In Proc. of IEEE Future Network and Mobile Summit, July 2013 – pp. 1-8.
156. Fekade B. Clustering hypervisors to minimize failures in mobile cloud computing / B. Fekade, T. Maksymyuk, M. Jo // Wireless Communications and Mobile Computing, vol. 16, no. 18, pp. 3455-3465, 2016.
157. Stocker V. The growing complexity of content delivery networks: Challenges and implications for the Internet ecosystem/ V. Stocker, G. Smaragdakis, W. Lehr, S. Bauer// Telecommunications Policy, 2017.
158. T. X. Tran et al., “Collaborative Mobile Edge Computing in 5G Networks: New Paradigms, Scenarios, and Challenges,” IEEE Communications Magazine, vol. 55, no. 4, pp. 54-61, 2017.

## ДОДАТОК 1. АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ



"ЗАТВЕРДЖУЮ"  
Директор  
ТзОВ ВТФ "Контех"  
Смольницький Є.С.  
11 \_\_\_\_\_ 2017 р.

### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Красько Олени Володимирівни  
на тему:

### " Методи та алгоритми підвищення ефективності функціонування конвергентних оптичних мереж доступу "

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВТФ "Контех" використані результати кандидатської дисертаційної роботи Красько О.В. "Методи та алгоритми підвищення ефективності функціонування конвергентних оптичних мереж доступу". А саме:

- розроблено та впроваджено алгоритм мультиплексування корисного та службового трафіку в низхідному каналі, який дає змогу підвищити коефіцієнт використання пропускної здатності каналів на 3-5%;
- розроблено та впроваджено алгоритм мультиплексування корисного та службового трафіку в висхідному каналі, який дає змогу підвищити коефіцієнт використання пропускної здатності каналів на 10-15%.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ ВТФ "Контех", відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 5%.

Директор



Є.С. Смольницький

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з науково-педагогічної роботи  
НУ "Львівська політехніка"



доц. Давидчак О. Р.  
"20" листопада 2017р.

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Красько Олени Володимирівни  
**" Методи та алгоритми підвищення ефективності функціонування  
конвергентних оптичних мереж доступу "**  
у навчальному процесі кафедри телекомунікацій

Даний акт складений комісією у складі:

- д.т.н., доц. Стрихалюк Б.М., голова методичної ради Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- к.т.н., доц. Озірковський Л.Д., декан базової вищої освіти Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки;
- д.т.н., проф. Климаш М.М., завідувач кафедри телекомунікацій

про те, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати кандидатської дисертаційної роботи "Методи та алгоритми підвищення ефективності функціонування конвергентних оптичних мереж доступу", а саме модернізовано курси лекцій з дисциплін:

- "Телекомунікаційні системи передавання ч. 2" для базового напрямку 6.050903 «Телекомунікації» у частині теоретичних основ побудови конвергентних оптичних мереж доступу;

- "Технології мереж мобільного зв'язку" для спеціальності 8.172 «Телекомунікації та радіотехніка» спеціалізації 8.172.01 «Інформаційні мережі зв'язку», у якому розглядається принцип мультиплексування інформаційних потоків в моделі конвергенції опорної транспортної мережі гетерогенних мереж мобільного зв'язку з існуючою пасивною оптичною мережею.

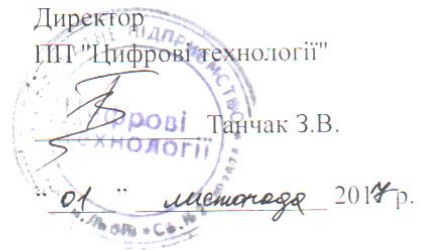
Члени комісії:

Стрихалюк Б.М.

Озірковський Л.Д.

Климаш М.М.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"



### АКТ

про використання результатів кандидатської дисертаційної роботи  
Красько Олени Володимирівни  
на тему:

### "Методи та алгоритми підвищення ефективності функціонування конвергентних оптичних мереж доступу"

Даний акт складений про те, що у ПП "Цифрові технології" для керування вузлом OLT у експериментальній конвергентній оптичній мережі використані результати дисертаційної роботи Красько О.В. "Методи та алгоритми підвищення ефективності функціонування конвергентних оптичних мереж доступу", представленої на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук, а саме:

- розроблено архітектуру конвергентної мережі доступу з інтеграцією сегментів фіксованого та мобільного зв'язку, яка дає змогу мультиплексувати сигнали мережі радіодоступу в межах спектрально-часових ресурсних блоків пасивних оптичних мереж доступу;
- впроваджено алгоритм агрегації ресурсних блоків в конвергентній оптичній мережі доступу, який дає можливість у періоди пікового навантаження підвищувати пропускну здатність для сегменту або комірки до 160, 240 або 320 Гбіт/с при агрегації 2, 3 або 4 ресурсних блоків, відповідно;
- впроваджено алгоритм групування інформаційних потоків комірок мобільного зв'язку при здійсненні хендоверу, який дає змогу знизити обсяг службового трафіку в конвергентній мережі доступу на 15-20 % в залежності від поточної мобільності абонентів.

Внаслідок перевірки розроблених алгоритмів на мережному обладнанні у ПП "Цифрові технології" встановлено, що результати знаходяться в межах п'ятивідсоткового середньоквадратичного відхилення від поданих у дисертаційній роботі.

Провідний інженер

Дрофяк А.М.

## ДОДАТОК 2. СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. Maksymyuk T. Study and Development of Next-Generation Optical Networks / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk // Smart Computing Review. - 2014. – Vol. 4. - №6. - pp. 470-480. (Google Scholar)
2. Климаш М.М. Метод спектрально-часового мультиплексування інформаційних потоків в оптичних мережах доступу / М.М.Климаш, О.В.Красько, Т.А. Максимюк//Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Обчислювальна техніка та автоматизація. Випуск 2 (27)-Донецьк:ДонНТУ,2014.-С.71-79. (<http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/27329>) (МНБ)
3. Красько О.В. Аналіз параметрів оптичного сигналу в повністю оптичній мережі з комутацією за довжинами хвиль / О.В. Красько, І.В. Демидов, М.В. Брич // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації - № 796 – Львів. – 2014. - С. 140-146. (МНБ)
4. Красько О.В. Оцінка параметрів мережі на етапі проектування оптичної транспортної системи / О.В. Красько // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації - №766 – Львів. – 2013. - С. 102-108 (МНБ)
5. Maksymyuk T. Designing the New Backhaul for 5G Heterogeneous Network Based on Converged Optical Infrastructure / T. Maksymyuk, O. Krasko, M. Kyryk, V. Romanchuk, R. Kolodiy // Acta Electrotechnica et Informatica,- 2017 - Vol. 17 - no. 4 -pp. 9-13. (МНБ)
6. Красько О.В. Розрахунок параметрів якості транспортних мереж / О.В. Красько, О.В. Корецький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіоелектроніка та телекомунікації - №705.- Львів -2011. – С.184-189.

### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації (форма участі):

7. Romanchuk V. Development the Methods of Conversion to Photonic Transport Networks. / V. Romanchuk, O. Krasko, O. Koretsky. // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science. Proceedings of the XIth International Conference TCSET'2012, Lviv – Slavske, Ukraine February 21–24, 2012, - p. 258-258. (заочна участь, доповідь співавтора)
8. Dumych S. The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network / S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko, P. Guskov // Досвід, розробка і застосування САПР в мікроелектроніці: матеріали XII міжнародної конференції CADSM 2013, 19-23 лютого 2013, Поляна, Україна / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів, 2013. – Р. 88. (заочна участь, доповідь співавтора)
9. Krasko O. Advanced Multi-Wavelength Data Transmission Method for Optical Access Networks /O. Krasko, P. Guskov, T. Maksymyuk // Сучасні проблеми радіоелектроніки,

телекомунікацій, комп'ютерної інженерії TCSET'2016: матеріали XIII Міжнародної конференції, 2014, Львів, Славське, Україна / Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2014. с. 518-520. (очна участь із доповіддю)

10. Maksymyuk T. Software Defined Optical Switching for Cloud Computing Transport Systems / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Jo // ACM IMCOM 2015: Proceedings (January 8–10, 2015, Bali, Indonesia). – 2015. – P. 42. (заочна участь, доповідь співавтора)

11. Krasko O. Data flows transmission models in converged optical access networks. / O. Krasko, M. Klymash, O. Lavriv // Problems of Infocommunications. Science and Technology – 2015 IEEE Second International Scientific-Practical Conference (Kharkiv, October 13-15, 2015). – 2015. – P. 65–68. (заочна участь, доповідь співавтора)

12. Krasko O. Wavelength rearrangement and load balancing algorithm for OWTDMA-PON network / O. Krasko // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомунікацій, комп'ютерної інженерії TCSET'2016: матеріали XIII Міжнародної конференції, 23-26 лютого 2016, Львів, Славське, Україна / Міністерство освіти і науки України, Національний університет «Львівська політехніка». - Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2016. - с. 950-952. (очна участь із доповіддю)

13. Krasko O. Flexible backhaul architecture for densely deployed 5G small cells based on OWTDMA network / O. Krasko, M. Brych, A. Masyuk, M. Klymash // Проблеми інфокомунікацій. Наука і технології: Матеріали 3-ої Міжнародної науково-практичної конференції (м. Харків, 4-6 жовтня 2016 р.). – 2016. – P. 33–35. (заочна участь, доповідь співавтора)

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

15. Krasko O. Network Functions Virtualization for Flexible Deployment of Converged Optical-Wireless Access Infrastructure / O. Krasko, H. Al-Zayadi, V. Pashkevych, H. Kopets, B. Humeniuk // IEEE International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET'2018, Lviv – Slavske, Ukraine February 20–23, 2018. - paper #425. (заочна участь, доповідь співавтора)

16. Романчук В.І. Перехід до фотонних мереж. / В.І. Романчук, О.В. Красько // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011» СПТЕЛ – 2011, Львів 27-30 жовтня 2011. – Львів – 2011. С. 37 – 39. (очна участь із доповіддю)

17. Романчук В.І. Дослідження ефективності динамічних методів маршрутизації на транспортній мережі / В.І. Романчук, О.В. Корецький, О.В. Красько, О.І.



- Сиротинський // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2010» СПТЕЛ – 2010, Львів 28-31 жовтня 2010. – Львів – 2010 – С. 22 – 25. (очна участь із доповіддю)
18. Красько О.В. Дослідження часових параметрів якості у фотонних транспортних системах. / О.В. Красько, О.В. Корецький // Матеріали міжнародної науково-технічної конференції «Проблеми телекомунікацій», Київ, 16-19 квітня 2013 р. –Київ, 2013. – С. 113–115. (заочна участь, доповідь співавтора)
19. Krasko O. Effectiveness of Virtual Concatenation Algorithms for Next Generation SDH/SONET Networks / O. Krasko // Computer Science and Engineering 2013: Proceedings of the 6th International Academic Conference of Young Scientists (CSE-2013), Lviv, 21–23 November. – 2013. – P. 38–39. (очна участь із доповіддю)
20. Красько О.В. Аналіз ефективності побудови фотонних транспортних мереж. / О.В. Красько // Матеріали V Міжнародної конференції молодих вчених CSE-2011. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. – С. 236-237. (очна участь із доповіддю)
21. Красько О. В. Визначення ефективності використання механізмів конкатенації для мереж NG SDH блоків / О. В. Красько // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013» СПТЕЛ – 2013, Львів 30 жовтня – 2 листопада 2013. – Львів –2013. – С. 227–232. (очна участь із доповіддю)
22. Красько О.В. Адаптація смуги пропускання в мережах NG-SDH/WDM / О.В. Красько, О.А. Лаврів, О.І. Сиротинський // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2014”. Львів 30 жовтня – 2 листопада 2014. – Львів – 2014. – С. 201 – 205. (очна участь із доповіддю)
23. Красько О.В. Методика розрахунку затримки в оптичних мережах з комутацією блоків. / О.В. Красько // Матеріали всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2010» СПТЕЛ – 2010, Львів 28-31 жовтня 2010. – Львів – 2010 – С. 31– 33. (очна участь із доповіддю)
24. Krasko O.V. Dynamic Bandwidth Allocation for 5G Optical Backhaul Networks with Wavelength Division Multiplexing / O.V. Krasko, M.V. Brych, A. Al-Ansari, N. Qasim // International Scientific-Practical Conference (I International Symposium) "Practical Application of Nonlinear Dynamic Systems for Infocommunication," November 9-11, 2017, Chernivtsi, Ukraine. – P. 110-111. (заочна участь, доповідь співавтора)