

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

**КРАСЬКО ОЛЕНА ВОЛОДИМИРІВНА**



УДК 621.391

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

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**Автореферат**  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник - доктор технічних наук, професор  
**Климаш Михайло Миколайович**, Національний університет «Львівська політехніка», завідувач кафедри телекомунікацій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
**Толюпа Сергій Васильович**, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, професор кафедри кібербезпеки та захисту інформації;

кандидат технічних наук, доцент  
**Єременко Олександра Сергіївна**, Харківський національний університет радіоелектроніки, докторант кафедри інфокомунікаційної інженерії.

Захист дисертації відбудеться "20" квітня 2018 р. о 12<sup>30</sup> год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті "Львівська політехніка" (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 218 XI навчального корпусу).

З дисертацією можна ознайомитись у науковій бібліотеці Національного університету "Львівська політехніка" (79013, м. Львів, вул. Професорська, 1).

Автореферат розісланий "16" березня 2018 р.

*Вчений секретар спеціалізованої  
вченої ради*



І.В. Демидов

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток сучасних інформаційних технологій стимулює появу нових мультимедійних послуг, зростання якості контенту, розвиток концепції хмарних обчислень, а також стрімке розширення систем Інтернету речей, які з кожним днем генерують все більше інформаційного трафіку. Тому, створення інфраструктури широкосмугового доступу до Інтернету на всій території України 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 5G очікувано будуть мати у 1000 разів вищу сумарну пропускну здатність у порівнянні з існуючими мережами 4G, що приведе до суттєвого зростання трафіку в оптичних мережах доступу. Тому, багато сучасних досліджень спрямовані на розроблення нових конвергентних архітектур та методів передавання даних для оптичних мереж доступу, які б дали змогу забезпечувати необхідну пропускну здатність в залежності від поточних вимог користувацького 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 передбачають появу 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 мобільному та фіксованому сегментах 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 пропускну 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 пропускну 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 мережах з інтеграцію сегментів мобільного та фіксованого доступу із забезпеченням

ефективного використання пропускної здатності оптичних каналів зв'язку в умовах нестаціонарної 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 нестаціонарної 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 оптичних мережах доступу.

**Предметом дослідження** є показники ефективності процесу передавання інформаційних потоків у конвергентних 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 пропускної 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 пропускної 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-Славсьько, 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-Славсьько, 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 сторінок друкарського тексту, в тому числі 7 сторінок вступу, 101 сторінку основного тексту, 63 рисунки, 5 таблиць, список використаних джерел зі 158 найменувань, 2 додатки.

## **ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

**У вступі** наведено базові концепції дисертаційної роботи. Розкрито суть і стан наукового завдання, обґрунтовано актуальність теми роботи, сформульовано мету

та окремі завдання дослідження, наукову новизну, практичну цінність. Наведено дані про результати роботи, їх практичне значення, апробацію цих результатів на наукових конференціях.

**В першому розділі дисертації – «Аналіз тенденцій розвитку оптичних мереж доступу з пакетною комутацією»** – проведено 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 би враховували нестаціонарність інтенсивності навантаження при конвергенції оптичного та мобільного сегментів мережі. В рамках проблематики, що розглядається у даній дисертаційній роботі виділено 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 – «Методи та моделі управління ресурсами в конвергентних оптичних мережах доступу»** – присвячено детальному дослідженню процесів передавання та розподілу інформаційних потоків у конвергентних оптичних мережах доступу. Перехід оптичних технологій до парадигми IP over 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 привів до їх повної конвергенції із мережами доступу, 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 навантаження 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...). Проте, 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.

Існуючі методи розподілу ресурсів у пасивних оптичних мережах доступу зі спектральним ущільненням каналів використовують принцип часового розділення, в якому кожен користувач отримує доступ до каналу на певний період часу. 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. 1,а). У зворотному напрямку, кожен ONU заздалегідь отримує часове вікно для передавання даних до OLT таким чином, щоб дані усіх вузлів ONU не зазнавали колізій при мультиплексуванні у вузлі OLT (рис. 1,б). 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.

Для підвищення ефективності використання пропускної здатності в пасивних оптичних мережах доступу зі спектральним ущільненням каналів запропоновано удосконалений метод розподілу каналних ресурсів. На відміну від вищерозглянутих методів, запропонований метод полягає у формуванні спектрально-часових ресурсних блоків для обох напрямків передавання (рис. 1,в). Розподіл пропускної здатності між користувачами здійснюється шляхом виділення визначених 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. Це забезпечує гнучкість в керуванні пропускною здатністю каналу та покращує масштабованість мережі доступу за рахунок одночасного розподілу усіх каналних ресурсів оптичної мережі. Запропонований метод не ускладнює фізичний процес передавання даних, оскільки характеристики системи, що його реалізує на фізичному рівні, аналогічні до характеристик звичайних систем зі спектральним ущільненням каналів.

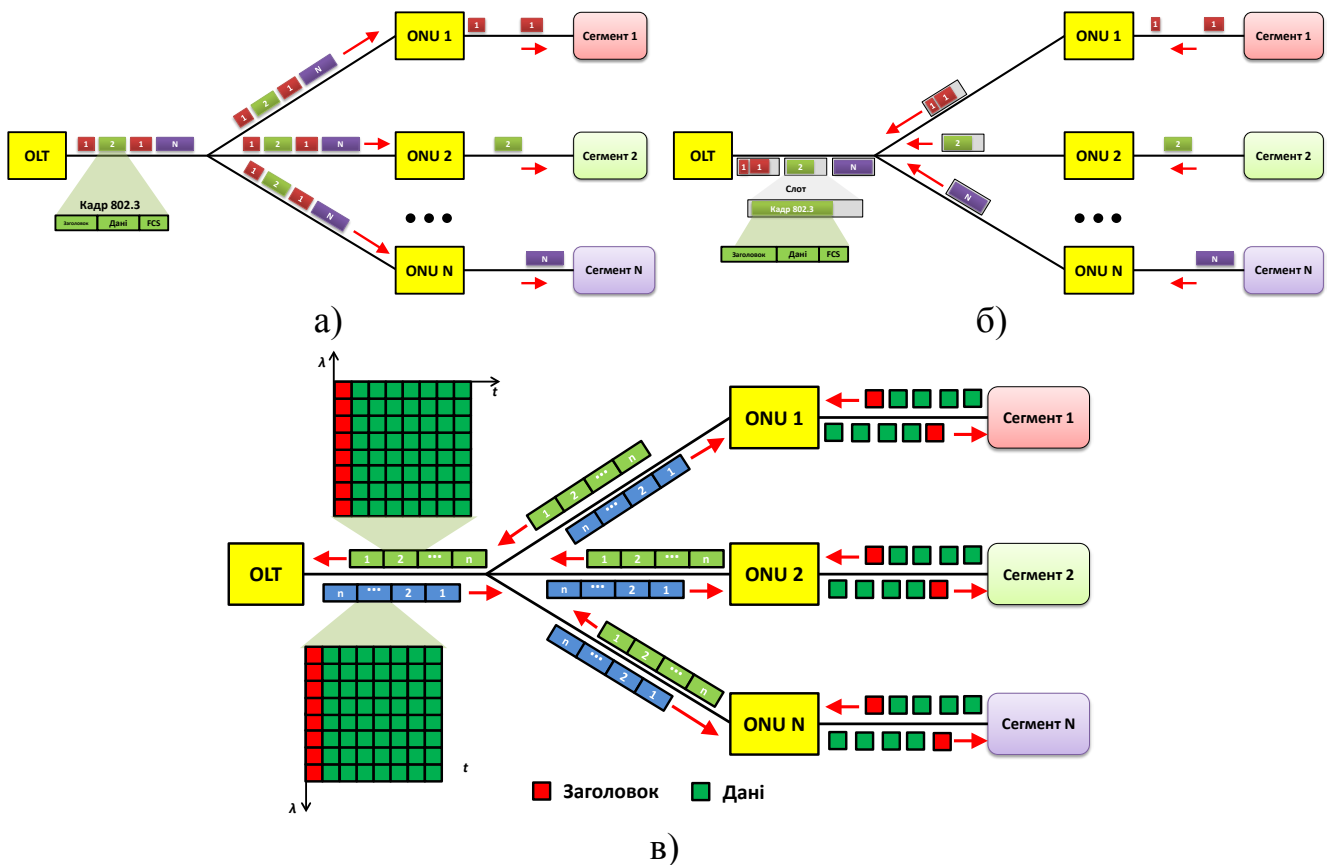


Рис. 1. Порівняння запропонованого методу розподілу каналних ресурсів – в), із існуючими методами розподілу в низхідному – а) та висхідному – б) напрямках передавання



Розмір ресурсного блоку дорівнює  $n \times m$ , де  $n$  відповідає кількості часових інтервалів, а  $m$  – кількості довжин хвиль, що використовуються.

Відповідно, сумарна пропускна здатність одного ресурсного блоку становить:

$$C_{RB} = \frac{8S_{RE} \cdot n \cdot m}{T_{GPON}}, [\text{Гбіт/с}] \quad (1)$$

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

Мінімальна пропускна здатність, яка може бути виділена для одного вузла ONU, становить:

$$C_{ONU \min} = \frac{8S_{RE}}{T_{GPON}}, [\text{Гбіт/с}] \quad (2)$$

Кожен ресурсний елемент займає часовий інтервал у 15 мкс, і частотну смугу у оптичному волокні 200 ГГц. Максимальна кількість корисного навантаження, яке може передаватись одним ресурсним елементом дорівнює 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, який триває 125 мкс. Отже, цей метод мультиплексування забезпечує пропускну здатність до 80 Гбіт/с на ресурсний блок, при можливості гнучкого резервування ресурсів із кроком 1.24416 Гбіт/с.

У розділі запропоновано нову модель конвергенції опорної транспортної мережі гетерогенних систем мобільного зв'язку з існуючою пасивною оптичною мережею фіксованої інфраструктури доступу. Запропонована модель враховує динаміку зміни 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 до кількості абонентів. Приймаючи до уваги те, що в LTE абонент може використовувати усю доступну пропускну здатність комірки, очевидно, що необхідна пропускна здатність каналів 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%.

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

$$C_{ком} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} \cdot W \cdot Seff_i, \quad (3)$$

де  $N$  – кількість абонентів у комірці,  $W$  – сумарна частотна смуга доступна для комірки,  $Seff_i$  – спектральна ефективність  $i$ -го абонента. Для спрощення також

прийmemo, що пропускна здатність комірки у низхідному та висхідному каналах є однаковою. Тоді мінімальне необхідне значення пропускної здатності для опорної мережі комірки у низхідному каналі розраховується у відповідності до виразів (2) та (3) наступним чином:

$$C_{onDL} = \left[ \frac{k_{X2} \cdot k_t \cdot C_{ком}}{C_{ONU\ min}} \right] \cdot C_{ONU\ min}, \quad (4)$$

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 необхідна пропускна здатність опорної транспортної мережі становить:

$$C_{onUL} = \left[ \frac{k_{X2} \cdot C_{ком}}{C_{ONU\ min}} \right] \cdot C_{ONU\ min}. \quad (5)$$

Запропонована реалізація моделі 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 трафіку, використовуючи конвергентну оптичну інфраструктуру.

На рис. 2 представлено принцип мультиплексування інформаційних потоків у запропонованій моделі конвергенції опорної транспортної мережі гетерогенних мереж мобільного зв'язку з існуючою пасивною оптичною мережею фіксованої інфраструктури доступу.

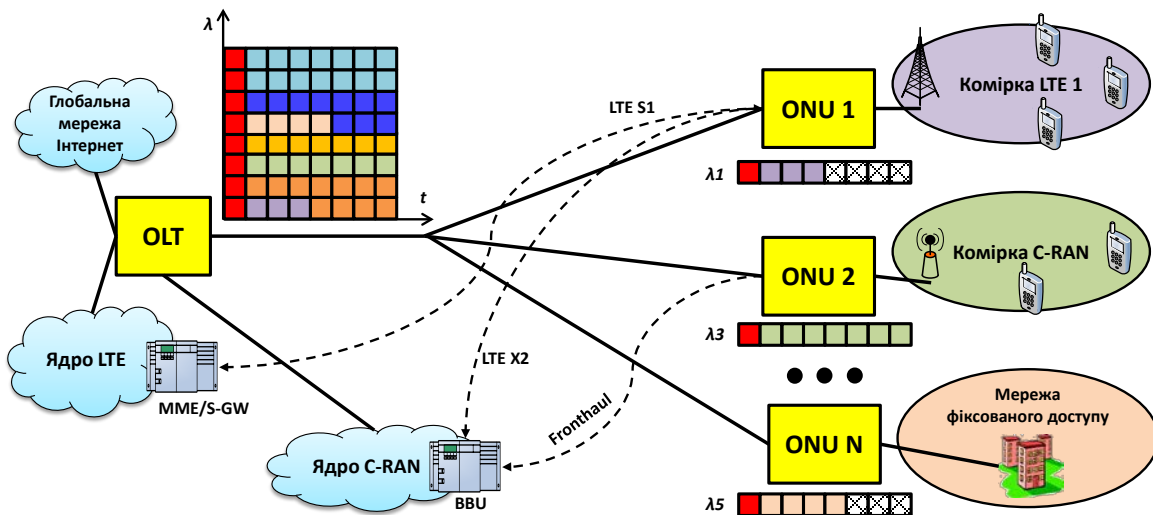


Рис. 2. Принцип мультиплексування інформаційних потоків у запропонованій моделі конвергенції оптичної мережі доступу

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 заданих поточної та цільової комірок. Таким чином, при здійсненні процедури хендоверу, зникає необхідність передавання даних абонента між комірками, оскільки ці дані вже

заздалегідь відомі для цільової комірки на момент здійснення хендоверу (рис. 3). Це дає змогу використовувати надлишкові ресурси оптичних каналів зв'язку для підвищення корисної пропускної здатності конвергентної мережі доступу.

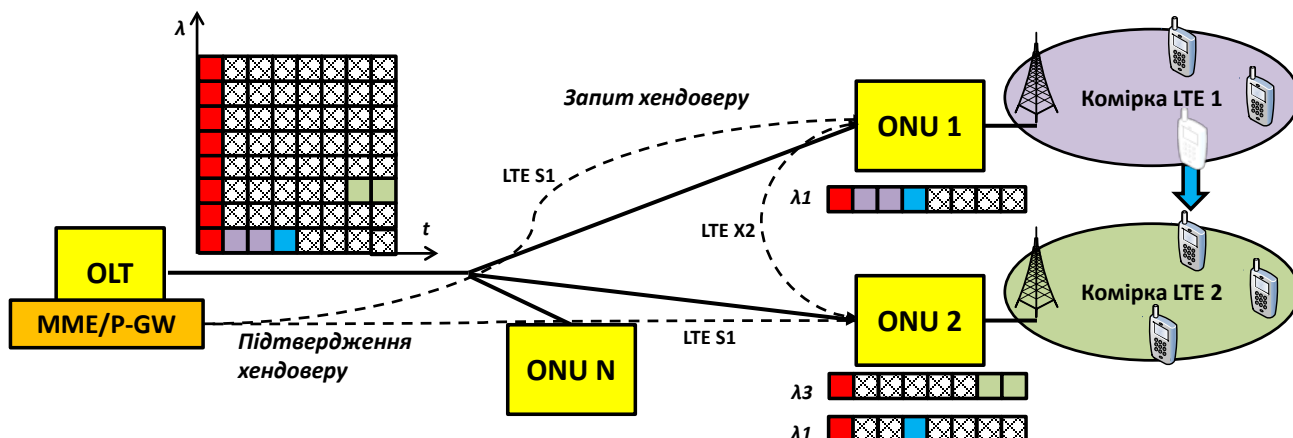


Рис. 3. Функціональна схема процесу мультиплексування даних при виконанні процедури хендоверу в мережі мобільного зв'язку

У розділі запропоновано метод балансування трафіку між окремими сегментами мережі доступу, який враховує ступінь зв'язності вимог до пропускної здатності окремих сегментів мережі. Врахування цієї зв'язності дає змогу оцінити, яким чином зміна інтенсивності трафіку в одному сегменті впливає на інтенсивність трафіку в інших пов'язаних сегментах. Метод балансування трафіку перерозподіляє інформаційні потоки від малозавантажених ONU до перевантажених ONU між взаємопов'язаними сегментами конвергентної мережі доступу, в тому числі - між різнотипними сегментами (макрокомірки, мікрокомірки, мережі фіксованого доступу) (рис.4). Таким чином, досягається підвищення сумарної ефективності використання пропускної здатності у конвергентній оптичній мережі доступу.

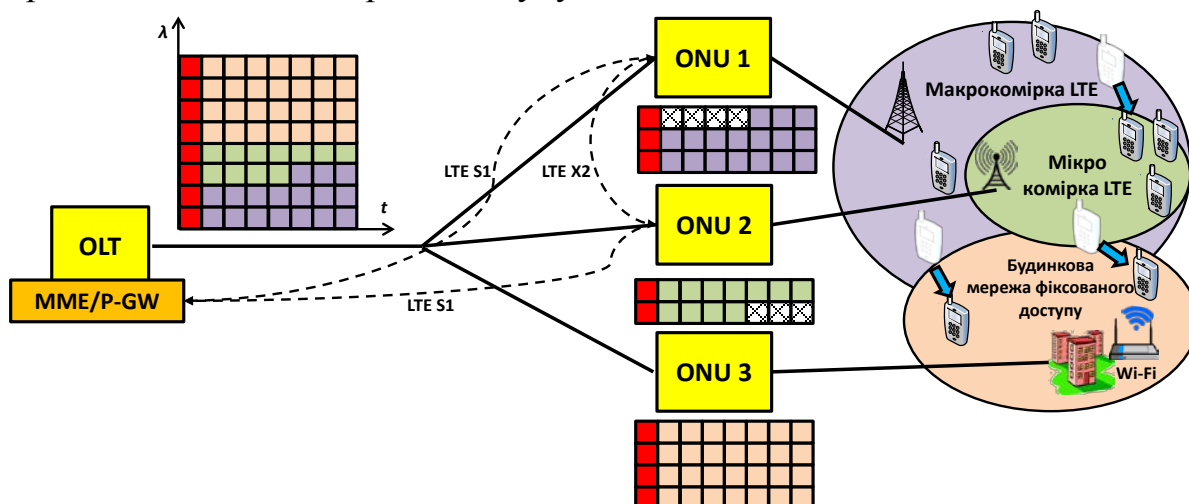


Рис. 4. Функціональна схема методу балансування трафіку між взаємопов'язаними сегментами конвергентної мережі доступу

У третьому розділі дисертації – «**Моделювання та дослідження процесу передавання пакетного трафіку в конвергентних оптичних мережах доступу**» – проведено моделювання ефективності функціонування запропонованих методів

та алгоритмів. Для визначення впливу мережних сервісів на характеристики трафіку, були проведені дослідження за допомогою мережних аналізаторів CommView та WireShark, які дають змогу перехоплювати Ethernet-кадри, що проходять через мережний інтерфейс. Проаналізовано статистичні закономірності пакетів за розміром, а також за протоколами мережного, транспортного та прикладного рівнів. 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. Для кожного з типів сервісів визначено статистичні співвідношення для пакетів за розмірами та протоколами, і побудовано діаграми для різних рівнів моделі ISO/OSI. На рис. 5 представлено статистичні залежності обсягів трафіку за призначенням для трьох типів сервісу.

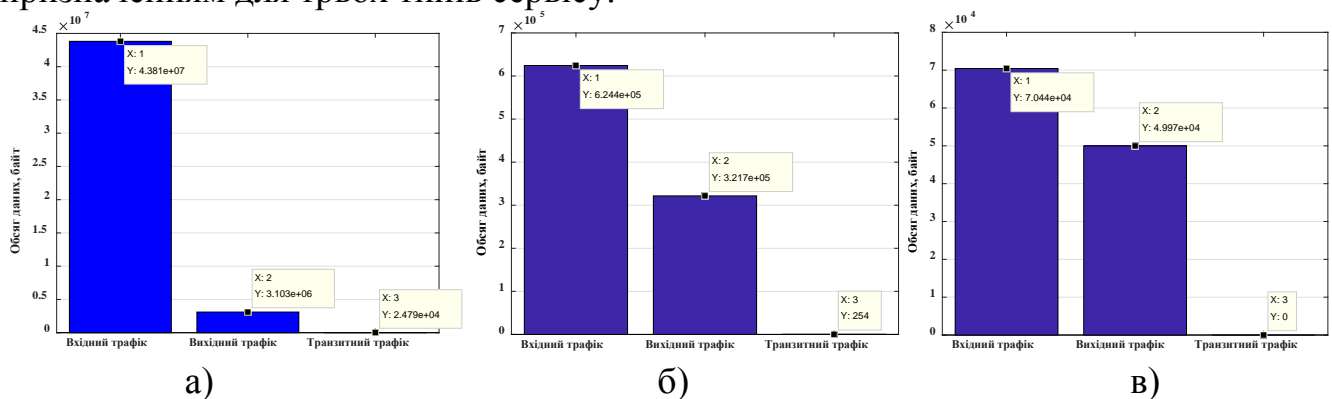


Рис. 5. Співвідношення трафіку за призначенням для веб-сервісів – а), потокового відео – б) та IP телефонії – в)

На основі отриманих статистичних залежностей здійснюється наближене оцінювання співвідношення між необхідною пропускною здатністю конвергентних оптичних мереж доступу в низхідному та висхідному 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. Таким чином, 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 каналів зв'язку.

У розділі проведено моделювання характеристик трафіку в гетерогенних мережах 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 одної. Крім того, даний сегмент доповнюється макро рівнем, щоб забезпечити рівномірне покриття території. Макрокомірки розташовані приблизно на відстані 500 метрів одна від одної. 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). Для кожного випадку визначено залежність необхідної пропускної здатності сегменту опорної транспортної мережі від кількості мікрокомірок (рис. 6.).

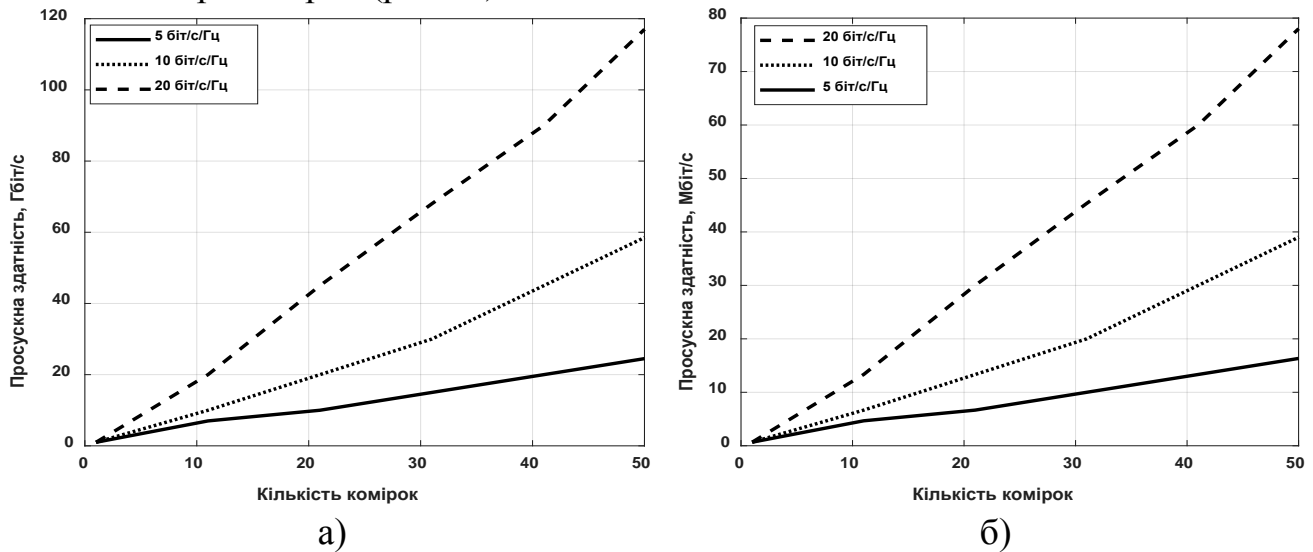


Рис. 6. Залежність пропускної здатності опорної транспортної мережі від кількості мікрокомірок у низхідному – а) та висхідному – б) напрямках передавання

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 (1). Тому, для підвищення масштабованості мережі, запропоновано алгоритм агрегації ресурсних блоків у конвергентній оптичній мережі доступу. Даний алгоритм перегруповує корисне та службове навантаження ресурсних блоків, формуючи, таким чином, агреговані ресурсні блоки розміром  $16 \times 8$  (WDM 16),  $24 \times 8$  (WDM 24) та  $32 \times 8$  (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.

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 GEPON (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. 7.

Як видно з результатів на рис. 7, 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.

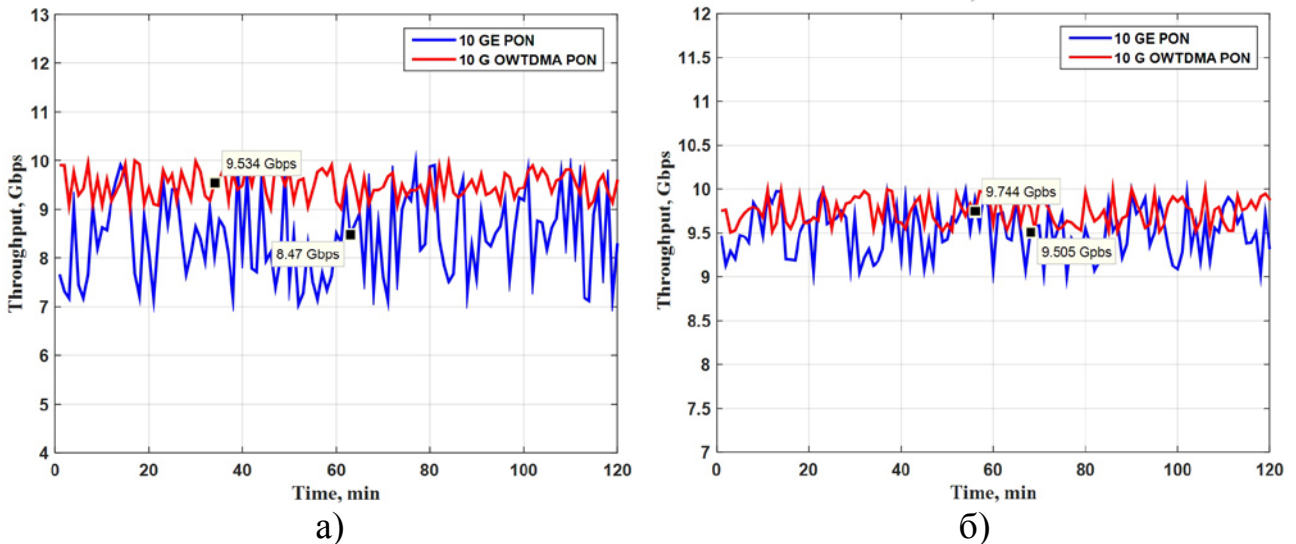


Рис. 7. Порівняння пропускної здатності запропонованої конвергентної оптичної мережі з існуючими мережами 10 GE PON для висхідного каналу – а) та низхідного каналу – б)

У розділі також проведено моделювання для дослідження ефективності запропонованого алгоритму реалізації хендоверу в мережах мобільного зв'язку з використанням групування інформаційних потоків (рис.8).

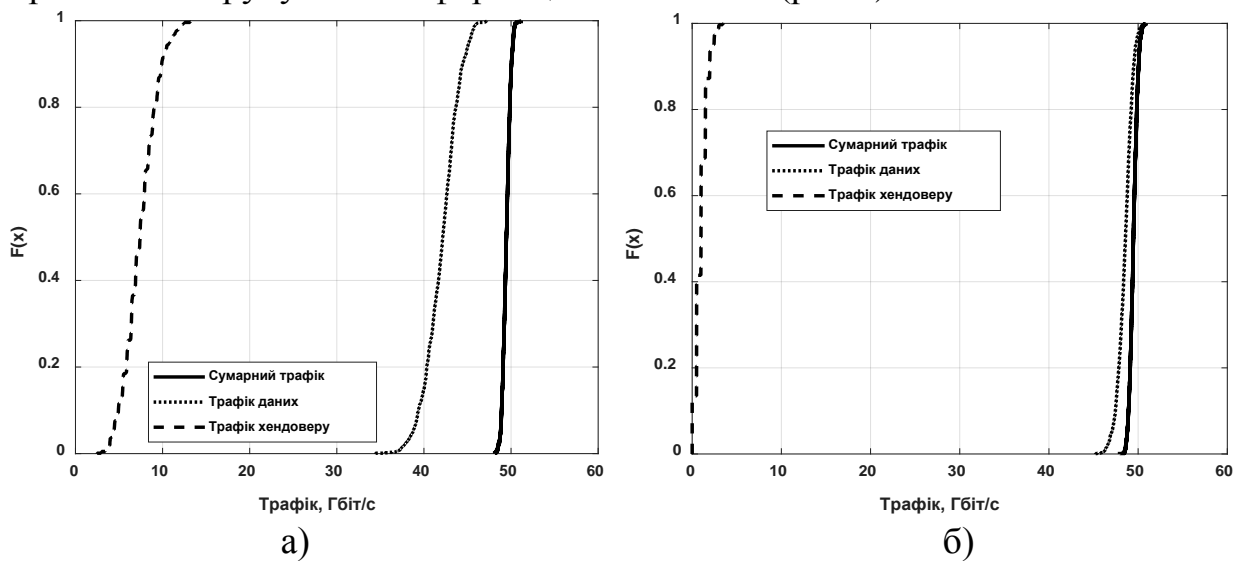


Рис. 8. Порівняння співвідношення обсягу трафіку хендоверу до загального обсягу трафіку для звичайного випадку – а) та для випадку з використанням алгоритму групування – б)

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.

**Четвертий розділ роботи – «Практична реалізація програмно-керованої конвергентної оптичної мережі доступу з інтеграцією гетерогенних систем безпроводного зв'язку»** – присвячений 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 цієї 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 транспортної 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 множину різноманітних послуг, які очікуються в рамках концепцій 5G та Інтернету речей (рис. 9).

Віртуалізація ресурсів у запропонованій конвергентній мережі доступу здійснюється на основі високопродуктивних обчислювальних кластерів, які будуються в межах 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.

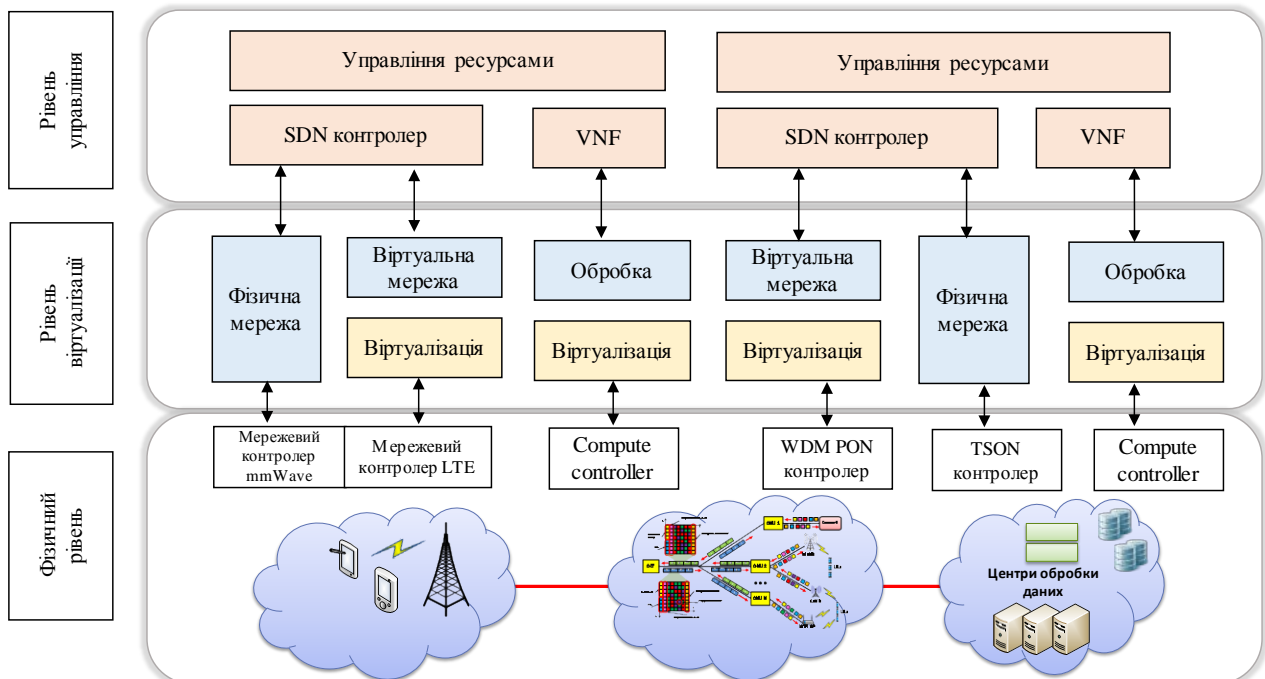


Рис. 9. Функціональна модель віртуалізації мережних функцій для конвергентної мережі з інтеграцією сегментів фіксованого та безпроводного доступу

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове 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.

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 комітках 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 розгорнути 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 хендверу, 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 ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ**

### **Статті у виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних:**

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» Радіoeлектроніка 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» Радіoeлектроніка та телекомунікації - №766 – Львів. – 2013. - С. 102-108
5. T. Maksymyuk. 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.

### **Стаття у науковому фаховому виданні України:**

6. Красько О.В. Розрахунок параметрів якості транспортних мереж / О.В. Красько, О.В. Корецький // Вісник Національного університету «Львівська політехніка» Радіoeлектроніка та телекомунікації - №705.- Львів -2011. – С.184-189.

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

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 радіoeлектроніки, 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. – 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. – P. 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. – 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. – 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.

#### **Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:**

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.

## 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 зі спеціальності 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, м. Львів, 2018.

Дисертація присвячена розв’язанню 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. Проведено аналіз стану та тенденцій розвитку конвергентних оптичних мереж доступу і визначено основні обмеження щодо їх ефективності. Удосконалено модель розподілу каналних ресурсів у пасивних оптичних мережах доступу зі спектральним ущільненням каналів, що дає змогу підвищити ефективність використання пропускну здатності

мережі за рахунок адаптації передавання службового трафіку. Розроблено модель конвергенції фіксованих та мобільних мереж доступу, яка дає змогу передавати радіосигнали останніх через оптичні канали зв'язку. Запропоновано метод балансування трафіку між окремими сегментами мережі доступу, який дає змогу підвищити сумарну ефективність використання пропускної здатності у конвергентній оптичній мережі доступу. Запропоновано модель віртуалізації мережних функцій для спрощення процесу управління ресурсами в конвергентних мережах зі складною топологічною структурою на основі технології програмно-конфігурованих мереж. Проведено моделювання процесу функціонування конвергентної оптичної мережі з інтеграцією сегментів фіксованого та мобільного доступу.

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

## АННОТАЦИЯ

**Красько Е.В. Методы и алгоритмы повышения эффективности функционирования конвергентных оптических сетей доступа.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет «Львівська політехніка» Министерства образования и науки Украины, г. Львов, 2018.

Диссертация посвящена решению актуальной научной задачи разработки моделей, методов и алгоритмов передачи информационных потоков в конвергентных оптических сетях с интеграцией сегментов мобильного и фиксированного доступа в условиях нестационарной интенсивности трафика и меняющихся требований к параметрам качества передачи данных. Проанализированы состояние и тенденции развития конвергентных оптических сетей доступа и определены основные ограничения относительно их эффективности. Усовершенствована модель распределения канальных ресурсов в пассивных оптических сетях доступа со спектральным уплотнением каналов. Разработана модель конвергенции фиксированных и мобильных сетей доступа, позволяющая мультиплексировать радиосигналы через оптические каналы. Предложен метод балансировки трафика между отдельными сегментами сети доступа, который позволяет повысить суммарную эффективность использования пропускной способности в конвергентной оптической сети доступа. Предложена модель виртуализации сетевых функций для упрощения процесса управления ресурсами в конвергентных сетях со сложной топологической структурой на основе технологии программно-определяемых сетей. Проведено моделирование процесса функционирования конвергентной оптической сети с интеграцией сегментов фиксированного и мобильного доступа.

**Ключевые слова:** пассивные оптические сети, конвергентные сети доступа, адаптивное управление ресурсами, программно-определяемые сети.

## 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 Ph.D. degree in technical sciences on specialty 05.12.02 – telecommunication systems and networks. – Lviv Polytechnic National University of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2018.

The thesis is devoted to solving an actual scientific task of developing models, methods and algorithms for data flows transmission in converged optical networks, which integrate the fixed and mobile access segments in conditions of dynamic traffic intensity and variable requirements of data transmission quality. The main restrictions for network performance were assessed such as low efficiency of bandwidth utilization, high signaling overhead, complexity of adaptive resource management in conditions of dynamic traffic intensity and various traffic classes. The model of resource distribution in convergent optical access network has been proposed to improve the efficiency of bandwidth utilization. Proposed resource allocation method, called wavelength-time division multiple access separates the entire wavelength-time resource grid into resource blocks. Each resource block has of 8 symbols in time domain and 8 carriers in frequency domain. Carriers separation is 200 GHz that is equal to 1.6 nm interval between wavelengths in a single optical fiber. Time symbol has duration of 15  $\mu$ s that allows fitting resource block into the 125  $\mu$ s PHY time frame 10 GEAPON. The advantage of this model is the high granularity of dynamic bandwidth allocation, when different amount of resource elements can be allocated to small cell. In this case, the minimal provided capacity is 1.25 Gbit/s per cell. Then the capacity can be gradually increased with 1.25 Gbit/s step until the maximum possible value of 80 Gbit/s per cell. For very large cells, it is also possible to aggregate four resource blocks in frequency domain, providing the total capacity of 320 Gbit/s. The model for convergence of fixed optical and mobile networks has been introduced to improve the efficiency of integrated access network. The novelty of this model is that it allows tunneling of radio signals between baseband processing unit and remote radio head over the optical network. This provides more flexibility of integration the Cloud-RAN and LTE mobile networks into converged infrastructure. The new method of load balancing between closely related segments of optical access network has been developed based on the wavelength-time resource grid. This model can estimate the load flows between different optical network units based on the previously known statistic about their relation among the nodes. Based on the proposed method, we have derived a new approach for handover in LTE networks. This approach takes into account the S1 and X2 traffic percentage in the backhaul. Proposed approach uses joint assignment of the resource elements for multiple optical network units during handover that allows to decrease the amount of backhaul traffic over X2 interface by 20%. New model of network function virtualization has been proposed to simplify the management of the convergent network infrastructure. The main novelty of this model is that it divides networks into four different elements. First, the high performance data centers provide the abstraction of the other network segments and are directly involved in the network functions virtualization according to the software-defined network paradigm. Second, the convergent optical access network is responsible

for the transportation of the user data traffic. Finally, the two last mile segments are also considered as the important part of the overall access network infrastructure. Combination of the four above mentioned network segments into single convergent network architecture under software defined management provides a significant gain in terms of the energy and spectral efficiency and overall network performance.

**Key words:** passive optical networks, converged access networks, adaptive resources management, software-defined networks.