

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

ДУМИЧ СТЕПАН СТЕПАНОВИЧ



УДК 621.391

**МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ
КОМУТАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНИХ ПОТОКІВ У ОПТИЧНИХ
ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Львів – 2017

Дисертацією є рукопис.

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

Науковий керівник - доктор технічних наук, доцент
Пелішок Володимир Олексійович, Національний університет «Львівська політехніка», професор кафедри телекомунікацій.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Бондаренко Олег Володимирович, Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова, професор кафедри волоконно-оптичних ліній зв'язку;

кандидат технічних наук, доцент
Сторчак Каміла Павлівна, Державний університет телекомунікацій, професор кафедри проектування інтелектуальних систем.

Захист дисертації відбудеться "02" червня 2017 р. о 14:30 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 "28" квітня 2017 р.

*Учений секретар спеціалізованої
вченої ради, к.т.н., доцент*

І.В. Демидов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Стрімке зростання обсягів трафіку у сучасних телекомунікаційних мережах зумовлене розвитком нових видів послуг, підвищення вимог до якості існуючих послуг та невідпинне зростання кількості користувачів призвели до суттєвого збільшення обсягів трафіку. Як наслідок, суттєво зросли вимоги до продуктивності оптичної транспортної телекомунікаційної інфраструктури, яка повинна забезпечувати значно вищі пропускні здатності для передавання даних. Відомо, що підвищення пропускної здатності оптичних мереж зв'язку може досягатися шляхом використання технології спектрального ущільнення каналів. Проте, в умовах динамічно-змінної інтенсивності трафіку в сучасних мережах із пакетною комутацією виникає завдання розподілу каналів між різними інформаційними потоками з ефективним використанням пропускної здатності каналів. Відомі на сьогодні методи маршрутизації за довжинами хвиль не пристосовані до передавання та комутації інформаційних потоків з високою дискретністю розподілу пропускної здатності. Водночас, існуючі методи пакетної комутації інформаційних потоків не дають змогу ефективно використовувати пропускну здатність оптичних мереж зв'язку, оскільки передбачають окреме обслуговування кожного пакету, що спричиняє затримку, яка у десятки разів перевищує тривалість поширення сигналу по оптичних лініях зв'язку. Тому ефективним є використання технології оптичної комутації блоків, яка полягає у групуванні трафіку за класами та вузлами призначення при його агрегації, що дає змогу підвищити ефективність процесу оброблення службової інформації у комутаційних вузлах і, відповідно, підвищити продуктивність усієї оптичної мережної інфраструктури.

Проблематика підвищення ефективності оптичних транспортних мереж широко висвітлена у роботах провідних українських та зарубіжних учених, серед яких: Стеглов В.К., Убайдуллаєв Р.Р., Склярів О.К., Климаш М.М., Лісовий І.П., Агеев Д.В., Манько О.О., Семенов А.Б., Кайдан М.В., Ківшар Ю.С., Аггарвал А., Фріман Р., Беррі Р., Хамблет П. та багато інших.

Проте, досі нерозв'язаними залишаються завдання ефективної агрегації неоднорідного трафіку мереж доступу в крайових вузлах оптичної транспортної мережі, оптимізації процесу комутації інформаційних потоків з ефективним використанням пропускної здатності каналів та ефективного управління розподілом інформаційних потоків у складних структурах оптичних транспортних мереж з урахуванням параметрів якості передавання даних між крайовими вузлами.

Таким чином, передавання інформаційних потоків з різними вимогами до параметрів якості обслуговування в оптичних транспортних мережах з ефективним використанням пропускної здатності оптичних каналів зв'язку є невирішеним на сьогодні протиріччям у світовій та українській науці. Тому актуальним є наукове завдання розроблення моделей, методів та алгоритмів комутації інформаційних потоків у оптичних транспортних мережах зі складною структурою в умовах змінних вимог до параметрів якості передавання даних та різких флуктуацій інтенсивності трафіку.

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: «Дослідження і оптимізація структури і топологій інфокомунікаційних систем і мереж», (ДБ/Структура, (2006–2007 рр.), № держреєстрації 0113U003184, «Підвищення ефективності оптичних мереж доступу з використанням кодового мультиплексування каналів» (ДБ/Доступ), (2009 – 2010 рр.), № держреєстрації 0109U001147, «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 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 процесу комутації інформаційних потоків у оптичних транспортних мережах зі складною структурою в умовах динамічно-змінної інтенсивності трафіку та неоднорідних вимог до параметрів якості передавання даних.

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

1. Аналіз стану та тенденцій розвитку повністю оптичних транспортних мереж з пакетною комутацією для визначення основних обмежень з точки зору їх ефективності.

2. Удосконалення методу агрегації трафіку мереж доступу в крайових вузлах оптичної транспортної мережі для покращення показників якості передавання даних.

3. Розроблення моделі пріоритетної сегментації блоків для покращення адаптивності процесу передавання даних у оптичних транспортних мережах з урахуванням явища блокування у комутаційних вузлах.

4. Удосконалення методу комутації блоків у вузлах за рахунок зменшення тривалості обробки службових пакетів для зменшення затримки комутації та зниження кількості втрачених пакетів.

5. Розроблення модифікованої структурно-функціональної схеми контролера вузла з оптичною комутацією блоків на основі гібридної програмно-апаратної архітектури для використання в мережах SDN.

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

Об'єктом дослідження в дисертації є процес передавання інформаційних потоків у оптичних транспортних мережах з комутацією блоків.

Предметом дослідження є методи та алгоритми покращення параметрів та характеристик комутації інформаційних потоків у оптичних транспортних мережах.

Методи дослідження. В процесі досліджень використано основи теорії ймовірності та математичної статистики, методи аналітичного та імітаційного моделювання, закони алгебри логіки та теорію телетрафіку.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Вперше запропоновано математичну модель оптичного комутаційного вузла мережі на основі бінарних матриць переходу, що дало змогу адаптувати метод оптичної комутації блоків до програмно-апаратної реалізації підсистеми керування крос-комутатором та зменшити втрати блокування пакетів за рахунок зменшення затримки службових блоків у вузлі.

2. Вперше запропоновано метод диференційної сегментації блоків на основі пріоритетного сортування пакетів різних класів у межах одного блоку, що дає можливість покращити параметри якості передавання інформаційних потоків за рахунок зниження ймовірності втрат пріоритетних пакетів.

3. Вперше запропоновано структурно-функціональну модель програмно-апаратного блоку керування оптичним комутаційним вузлом на основі програмованих логічних інтегральних схем, яка, на відміну від існуючих, враховує незалежну динамічну реконфігурацію окремих функціональних компонентів вузла, відповідно до технології програмно-конфігурованих мереж.

4. Удосконалено метод агрегації трафіку мереж доступу в крайовому вузлі оптичної транспортної мережі з комутацією блоків шляхом використання адаптивного критерію формування блоку, що дає змогу підвищити ефективність використання пропускної здатності оптичних каналів зв'язку при одночасному забезпеченні належної якості передавання інформаційних потоків.

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

1. Розроблено адаптивний алгоритм агрегації трафіку у крайовому вузлі оптичної мережі з комутацією блоків, який дав змогу підвищити ефективність використання пропускної здатності оптичних каналів зв'язку на 10-25% при одночасному зменшенні кількості втрачених пакетів до 10 разів, в залежності від інтенсивності трафіку в мережах доступу.

2. Запропоновано алгоритм комутації інформаційних потоків у проміжному вузлі оптичної мережі, який дав змогу зменшити затримку в процесі обробки пакетних заголовків на 20% та 40% при використанні 40 та 80 довжин хвиль в оптичних каналах, відповідно.

3. Розроблено алгоритм диференційної сегментації блоків, який дав змогу знизити ймовірність втрати пріоритетних пакетів у 2 рази за рахунок сортування пакетів блоку в порядку спадання пріоритету.

4. Розроблено структурно-функціональну схему програмно-керованого оптичного комутатора, яка дала змогу знизити затримку в процесі комутації інформаційних потоків у оптичній мережі зі складною топологічною структурою.

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати, подані у дисертації одержані здобувачем особисто. У працях опублікованих у співавторстві авторові належать: у роботах [1, 3, 5, 9, 11] – постановка завдань досліджень та алгоритми агрегації трафіку у крайовому вузлі мережі OBS; [2, 4, 7, 8] – розрахунок параметрів якості передавання інформаційних потоків; [12, 17] – розроблення

імітаційних моделей для дослідження мережі; [6, 13, 14, 15, 16] – розроблення математичної моделі функціонування проміжного вузла мережі з комутацією блоків; [10] – реалізація програмного керування проміжними вузлами мережі OBS на основі технології SDN.

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» (Львів, 2011-2013), «Computer Science & Engineering» (м. Львів, 2013), «Нові технології в телекомунікація» (с. Вишків, 2013), «IEEE Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science» (м. Львів-Славсько, 2012, 2016), «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» (м. Лівадія, 24-27 квітня 2012 р.), «IEEE Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics» (сmt. Поляна-Свалява, 2013), «IEEE Microwave and Telecommunication Technology» (м. Севастополь, 8-14 вересня, 2013). Також результати роботи обговорені на засіданнях та семінарах кафедри телекомунікацій.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 17 наукових праць, серед них: статей у періодичних фахових виданнях – 6 [1-6], з них в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз – 6, у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 11 [7-17].

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатку. Загальний обсяг роботи становить 152 сторінки друкарського тексту, в тому числі 6 сторінок вступу, 115 сторінок основного тексту, 66 рисунків, список використаних джерел зі 150 найменувань, додаток на 3 сторінках.

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 технологічних рішень та вимог до оптичних транспортних систем**» – проведено аналітичний огляд літературних джерел за темою дисертації для визначення вимог до оптичних транспортних систем нового покоління. На підставі аналізу останніх релевантних робіт та існуючих концепцій розвитку оптичних транспортних мереж встановлено, що основним обмеженням з точки зору продуктивності оптичної мережної інфраструктури є процес агрегації трафіку на межі «доступ-транспорт», а також процес комутації та розподілу інформаційних потоків у проміжних вузлах оптичної транспортної мережі. Це, в свою чергу, потребує створення нових підходів до управління інформаційними потоками, керування комутаційними вузлами та пріоритетизації потоків з урахуванням вимог до параметрів якості передавання даних. В рамках проблематики, що розглядається у даній дисертаційній роботі, необхідно виділити сукупність першочергових взаємопов'язаних завдань, розв'язання яких у комплексі дасть змогу підвищити ефективність оптичних транспортних мереж для забезпечення зростаючих вимог до пропускну здатності та якості передавання даних.

Другий розділ роботи – «Методи комутації та розподілу інформаційних потоків у вузлах оптичної транспортної мережі» – присвячено моделям комутації та розподілу інформаційних потоків у крайових та проміжних вузлах оптичної транспортної мережі з комутацією блоків OBS (Optical Burst Switching). У мережах з комутацією блоків вхідний трафік від терміналів мережі доступу агрегується на вхідному вузлі, сортується та групується у блоки змінної довжини. Перед передаванням блоку контрольний пакет ВНР (Burst Header Packet) передається до вузла призначення для попереднього резервування оптичного шляху з підтвердженням або без нього, в залежності від протоколів транспортного рівня. Розділення контрольної та інформаційної частин дає змогу уникнути необхідності в оптичних буферах пам'яті та оптичній логіці. На вихідному вузлі блоки розбираються на пакети та спрямовуються по відповідних напрямках у мережі доступу. Запропоновано удосконалений метод агрегації трафіку у крайових вузлах оптичної транспортної мережі з комутацією блоків. Крайовий вузол відповідає за формування блоків даних із пакетів, які надходять від мереж доступу. IP-трафік агрегується з різних мереж доступу, таких як пасивні оптичні мережі, корпоративні мережі, мережі стільникового зв'язку, мережі зберігання та оброблення даних тощо. Як результат, вхідний трафік крайового вузла є неоднорідним, тому що кожна мережа доступу визначає різні параметри якості обслуговування, такі як пропускна здатність, тривалість затримки та ймовірність втрати пакетів. Проблеми сумісності, що виникають при агрегації трафіку від мереж з різним типом адресації, також повинні бути враховані в процесі функціонування мережі. Функціональна модель процесу агрегації трафіку у крайовому вузлі мережі з оптичною комутацією блоків представлена на рис. 1.

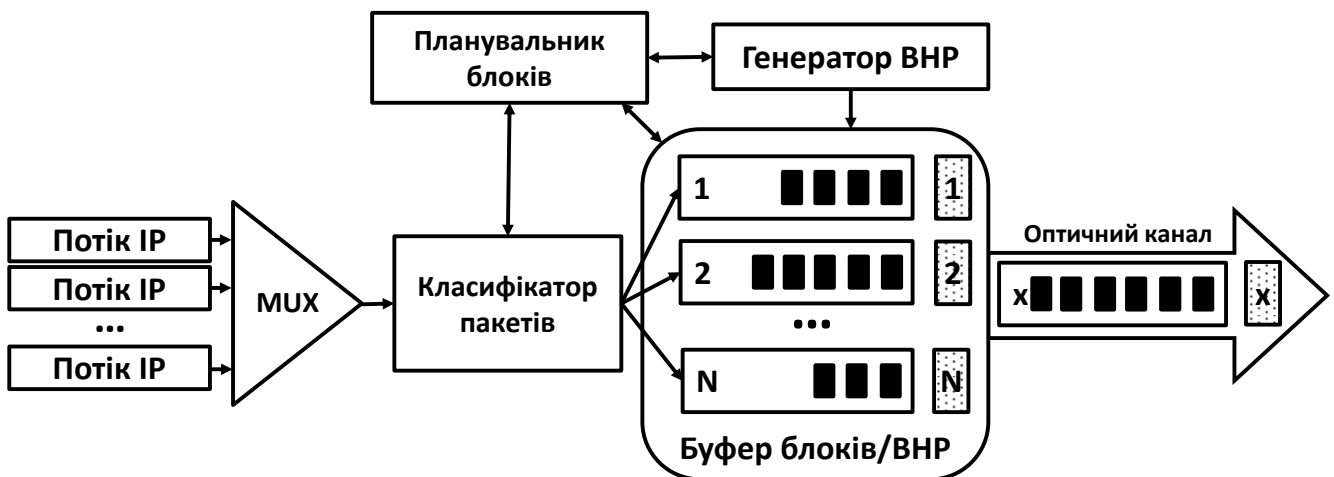


Рис. 1. Структурно-функціональна модель процесу агрегації трафіку у крайовому вузлі мережі з комутацією блоків

Спочатку вхідні потоки IP-пакетів від різних сегментів мереж доступу мультиплексуються в один потік в залежності від моменту прибуття. По-друге, класифікатор пакетів розподіляє пакети відповідних блоків і повідомляє планувальнику про стан цих блоків. Одночасно планувальник визначає необхідне волокно і відповідну довжину хвилі для кожного блоку і записує ці значення у належне поле пакету заголовку. По-третє, генератор пакетів заголовків створює контрольні пакети відповідно до даних, отриманих від планувальника. У кінцевому випадку, планувальник спочатку надсилає заголовок, а потім – відповідний блок

інформації після заданої затримки, яка розраховується окремо для кожного маршруту, щоб переконатися в тому, що пакет-заголовок буде успішно оброблений у вузлі призначення до того, як відповідний блок досягне цього вузла (див. рис. 2).

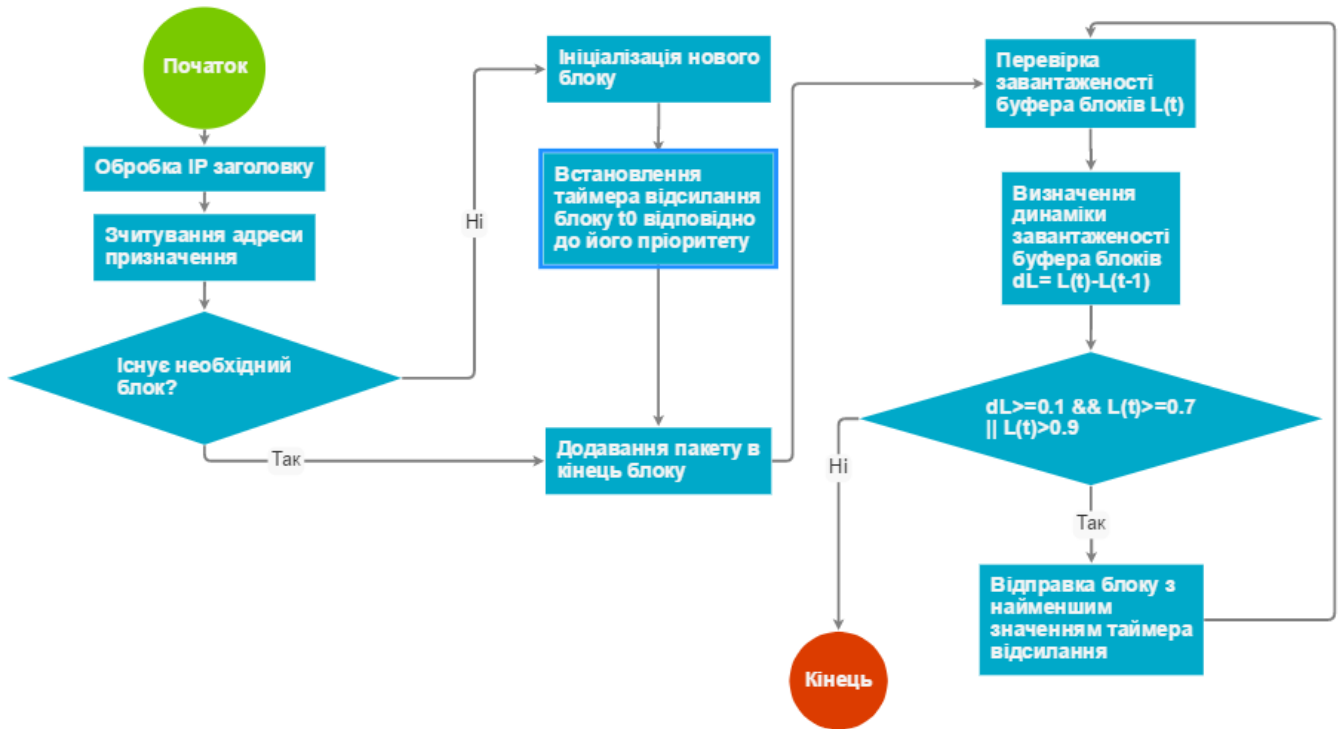


Рис. 2. Блок-схема процесу агрегації трафіку у крайовому вузлі

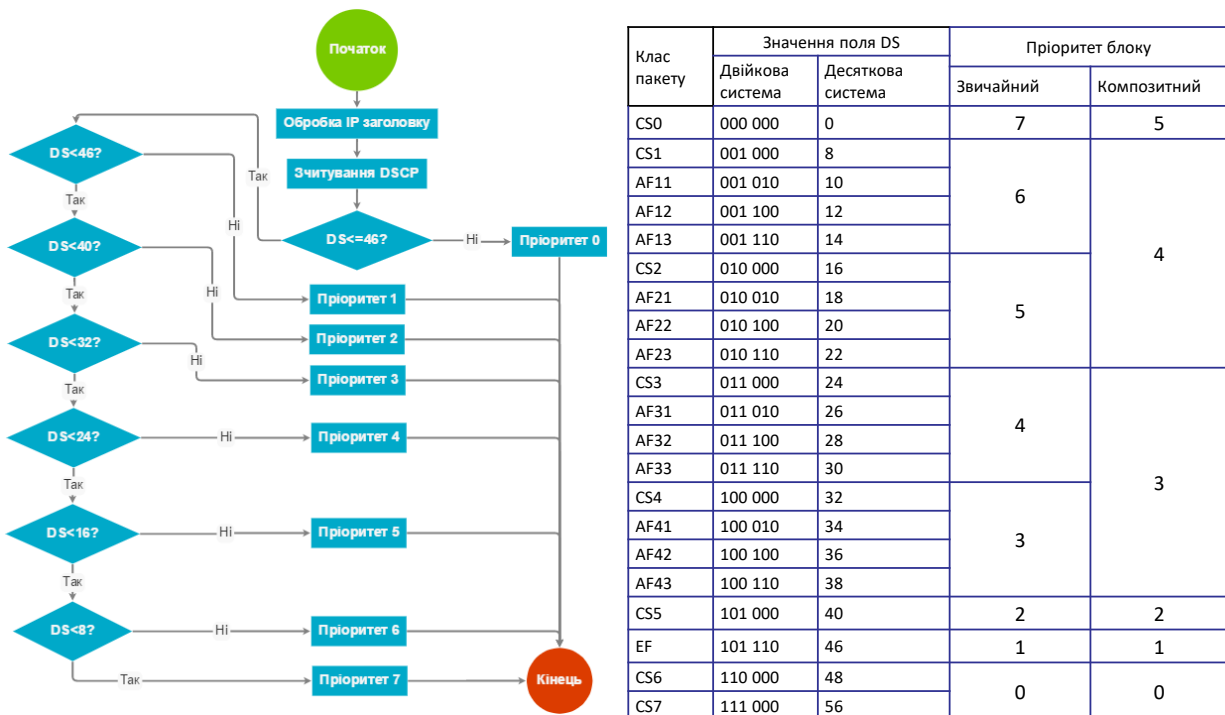


Рис. 3. Блок-схема процесу пріоритизації трафіку у крайовому вузлі

Для кращої адаптації процесу передавання інформаційних потоків та уникнення непослідовної доставки пакетів запропоновано модель диференційної сегментації блоків на основі пріоритетного сортування пакетів різних класів у межах одного блоку. Запропонована модель використовує сортування пакетів у

блоці в порядку спадання пріоритету, забезпечуючи таким чином їх послідовну доставку (див. рис. 3).

Використання диференційної сегментації блоків (рис. 4) дає змогу підвищити якість передавання інформаційних потоків шляхом зменшення втрат пріоритетного трафіку. Зменшення втрат пріоритетного трафіку досягається за рахунок того, що ймовірність колізії на початку блоку є значно нижчою, ніж ймовірність колізії на його кінці. Тому пріоритетне сортування пакетів у блоках використовується для блоків з різними пріоритетами.

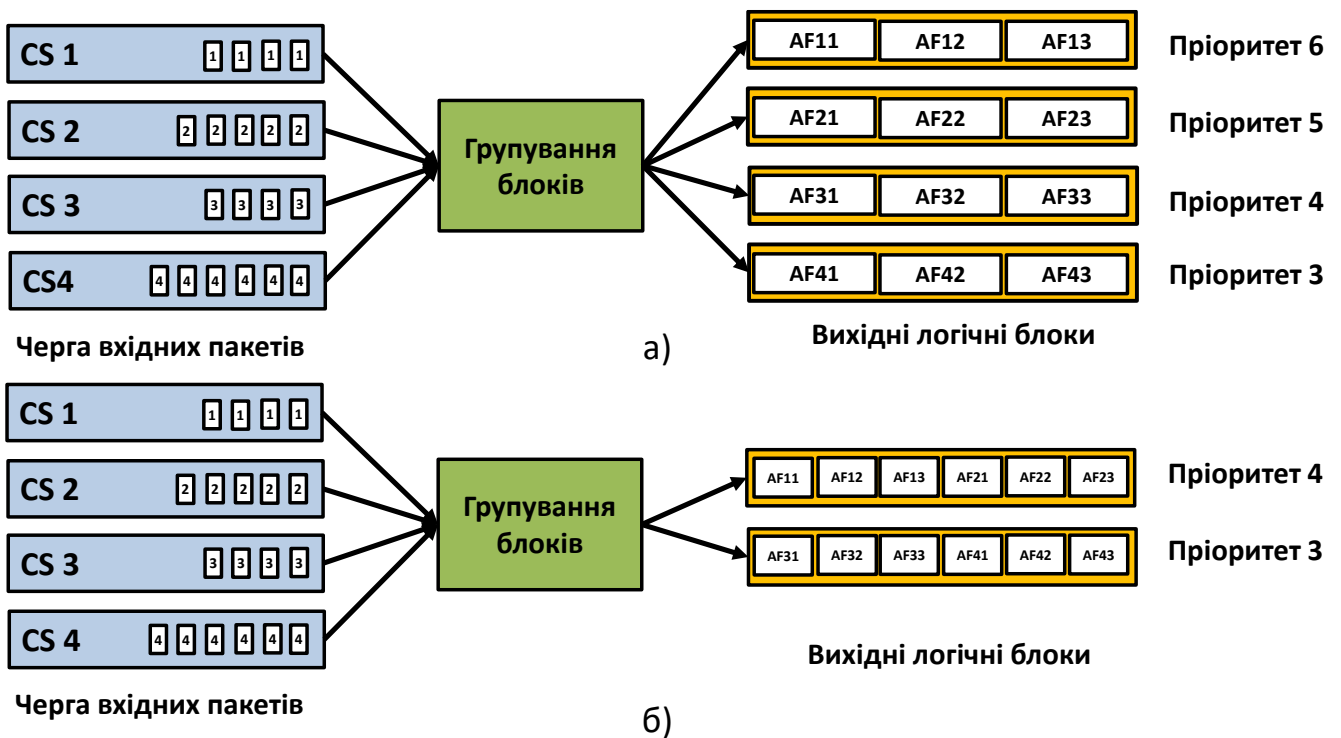


Рис. 4. Комбінована схема формування блоку з диференційною сегментацією для чотирьох класів пакетів при а) чотирьох та б) двох пріоритетах блоків

Крім того, запропоновано метод оптичної комутації блоків у вузлі з крос-комутацією, функціональна схема якого представлена на рис. 5.

Процес комутації у вузлі з використанням запропонованого методу описаний нижче.

Крок 1. Вхідні контрольні пакети перетворюються з оптичного представлення в електричне для подальшого оброблення процесором контрольних пакетів, який реалізований на програмованих логічних інтегральних схемах (далі ПЛІС). За рахунок паралельності ПЛІС всі блоки передаються на оброблення одночасно без формування черг.

Крок 2. В ПЛІС зчитуються поля пакетів ВНР і дані, отримані з цих полів передаються для подальшого оброблення. Дані групуються у вигляді матриць, рядки яких відповідають вхідним оптичним лініям, а стовпці – вхідним довжинам хвиль. Таким чином, у вузлі генеруються наступні матриці:

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & \cdots & A_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ A_{n1} & \cdots & A_{nm} \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} C_{11} & \cdots & C_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & \cdots & C_{nm} \end{bmatrix}, \quad OT = \begin{bmatrix} OT_{11} & \cdots & OT_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ OT_{n1} & \cdots & OT_{nm} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де A – матриця адрес призначення вхідних блоків, C – матриця пріоритетів вхідних блоків, OT – матриця тривалостей затримки вхідних блоків перед їх надходженням. Таким чином на вхід оптичного комутатора по i -й вхідній лінії на j -й довжині хвилі через час OT_{ij} прийде оптичний блок розміром BS_{ij} , який необхідно відправити до вузла A_{ij} з пріоритетом C_{ij} .

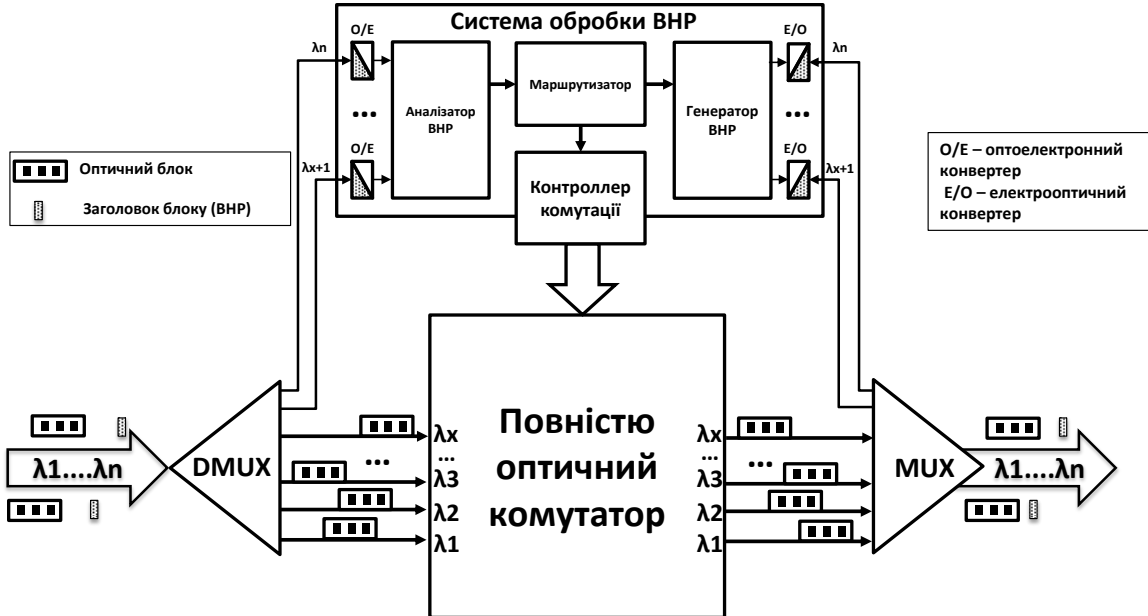


Рис. 5. Функціональна схема проміжного вузла оптичної мережі з комутацією блоків.

Крок 3. За обраним алгоритмом маршрутизації визначається множина із z шляхів до вузла A_{ij} для вхідного блоку:

$$VC = \begin{bmatrix} VC_1 \\ \vdots \\ VC_z \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де VC_k – один із можливих шляхів до вузла призначення, який визначається як вектор вагових коефіцієнтів ребер та вершин граф-моделі оптичної мережної системи. Елементами кожного вектора є послідовно записані вагові коефіцієнти кожного ребра та вузла, які утворюють віртуальний канал:

$$VC_k = \left[E_{s \rightarrow (s+1)}, V_{(s+1)}, \dots, V_{(d-1)}, E_{(d-1) \rightarrow d} \right], (0 < k \leq z). \quad (3)$$

З множини шляхів P обирається оптимальний шлях для передавання блоку до вузла призначення з дотриманням наступної умови:

$$VC_{ij} = \begin{cases} \min \left(VC \left(T_{\Sigma} \right) \right), 0 \leq q_{ij} \leq 6 \\ \forall \in [VC], q_{ij} = 7 \end{cases}, (0 < i \leq N, 0 < j \leq M) \quad (4)$$

Як видно з умови (4), за високого пріоритету блоку, наприклад у випадку передавання UDP данограм, для нього буде обрано маршрут з мінімальним значенням сумарної затримки. При низькому пріоритеті буде обрано будь-який з доступних шляхів. Таким чином формується матриця віртуальних каналів, кожен елемент якої є вектором (3):

$$VC = \begin{bmatrix} VC_{11} & \cdots & VC_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ VC_{n1} & \cdots & VC_{nm} \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Крок 4. Сумарний інформаційний потік на вході комутаційного вузла представимо у вигляді матриці:

$$X = \begin{bmatrix} \lambda_{11} & \cdots & \lambda_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \lambda_{n1} & \cdots & \lambda_{nm} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Рядки матриці (6) відповідають вхідним оптичним лініям, а стовпці – довжинам хвиль, відповідно. Вибір вихідних каналів, по яких будуть відправлені блоки, здійснюватиметься наступним чином:

1. Спочатку елементи вектора (2) сортуються в порядку спадання:

$$VC_k = \max(VC_i), (i \in [k, z], 0 < k \leq z). \quad (7)$$

2. З матриці адрес A формується бінарна матриця однойменних адрес:

$$D_{sl}^{\{A_{ij}\}} = \begin{cases} 1, A_{sl} = A_{ij} \\ 0, A_{sl} \neq A_{ij} \end{cases}, 0 < s \leq n, 0 < l \leq m. \quad (8)$$

Сформована матриця (8) показує індекси тих блоків в матриці (6), які мають спільну адресу призначення.

3. Для блоків, які мають спільну адресу призначення, формується матриця пріоритетів як елементний добуток матриці C (1) з бінарною матрицею D (8):

$$P_{ij}^{\{A_{ij}\}} = C_{ij} D_{ij}^{\{A_{ij}\}}, (0 < i \leq N, 0 < j \leq M). \quad (9)$$

В результаті формується матриця P , яка показує значення поля класу трафіку лише для тих блоків, які мають спільну адресу призначення.

4. Матриця (9) перетворюється у вектор-стовпець наступним чином:

$$\begin{cases} \vec{P}_k = P_{ij}^{\{A_{ij}\}} \\ \vec{i}_k = i \\ \vec{j}_k = j \end{cases}, (P_{ij}^{\{A_{ij}\}} \neq 0, 0 < i \leq N, 0 < j \leq M, 0 < k \leq z), \quad (10)$$

де i_k, j_k – вектори-стовпці індексів вхідних спільноадресних блоків, P_k – вектор стовпець пріоритетів вхідних спільноадресних блоків.

5. По аналогії з (7), вектори (10) сортуються в порядку зростання:

$$\begin{cases} \vec{P}_k = \min(\vec{P}_i), (i \in [k, z], 0 < k \leq z) \\ \vec{i}_k = \min(\vec{i}_i), (i \in [k, z], 0 < k \leq z) \\ \vec{j}_k = \min(\vec{j}_i), (i \in [k, z], 0 < k \leq z) \end{cases}. \quad (11)$$

Крок 5. ПЛІС здійснює перерахунок матриці OT за наступною формулою:

$$OT = OT - t_{обр} - t_{неп}, \quad (12)$$

де $t_{обр}$ – час обробки ВНР та пошуку маршруту (кроки 2, 3), $t_{неп}$ – сумарний час формування матриці S (крок 4) та перемикання комутаційного елемента, який залежить від типу комутатора.

Крок 6. Генерація та відправлення нових контрольних пакетів до вузлів призначення згідно з визначеними каналами.

Блок-схема процесу комутації у проміжному вузлі представлена на рис.6.

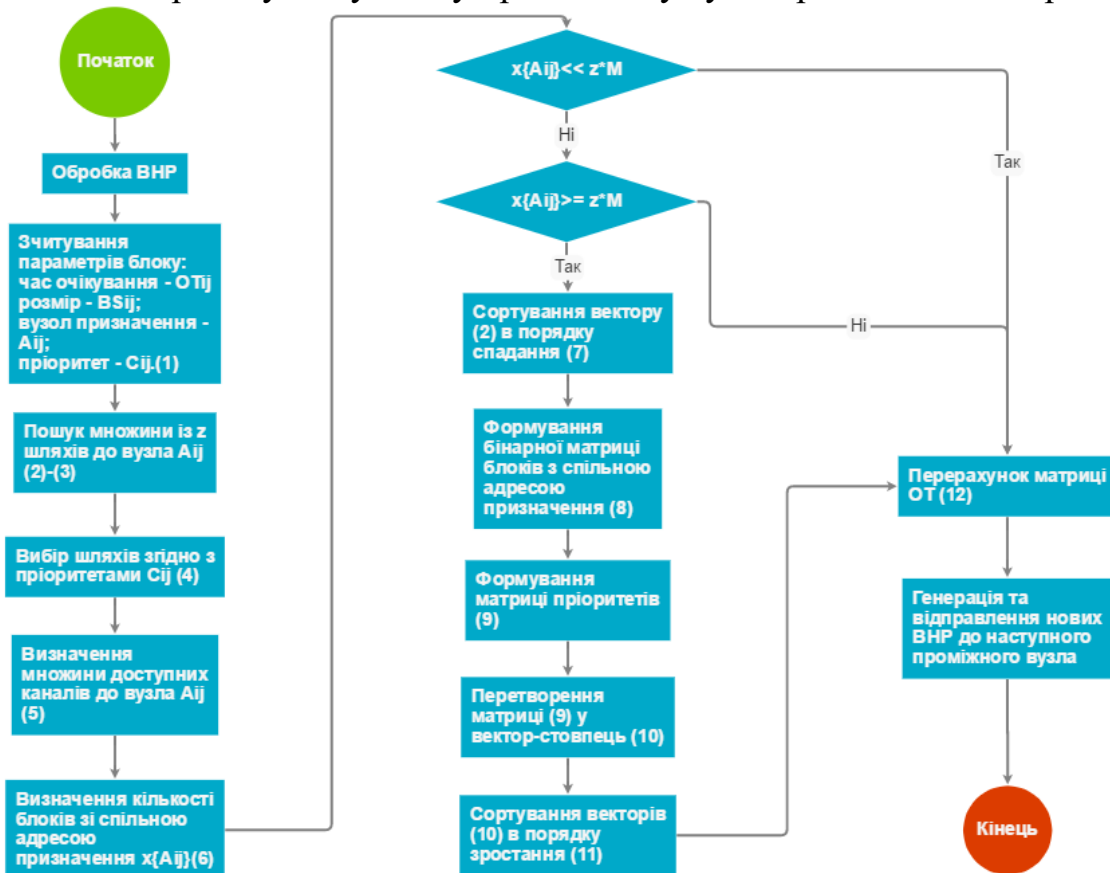


Рис. 6. Блок-схема процесу пріоритезації трафіку у проміжному вузлі

У третьому розділі дисертації – «**Моделювання та дослідження процесу передавання пакетного трафіку в повністю оптичних транспортних мережах**» проведено моделювання процесу передавання пакетного трафіку в оптичних транспортних мережах з комутацією блоків. Для порівняння ефективності алгоритмів формування блоків з урахуванням варіації інтенсивності вхідного навантаження було згенеровано вхідний трафік з наступними параметрами: середній розмір пакету – 1 кБ, кількість вхідних потоків – 24, інтенсивність вхідних потоків – 10 Гбіт/с, тривалість моделювання – 50 год. Параметр Херста для змодельованого трафіку становить $H=0.92$. Інтенсивність надходження пакетів розподілена за нормальним законом. Мінімальний розмір блоку становить 64 кБ, що відповідає максимальному розміру пакету IPv4. Тобто, в деяких випадках блок може формуватись з одного IP-пакету. Для даного вхідного трафіку змодельовано трафік блоків з використанням розглянутих вище методів формування блоку. В загальному випадку розмір блоку залежить від кількості пакетів, які він об'єднує, а також від схеми його формування та завантаженості мережі. Як показано на рис. 7, за невеликої кількості пакетів у блоці ($n < 100$), густина розподілу ймовірностей його розміру не може бути чітко описана. Гістограми на рис. 7 показують, що закон розподілу розмірів блоків наближається до Гаусівського при збільшенні кількості пакетів у блоці для всіх методів формування.

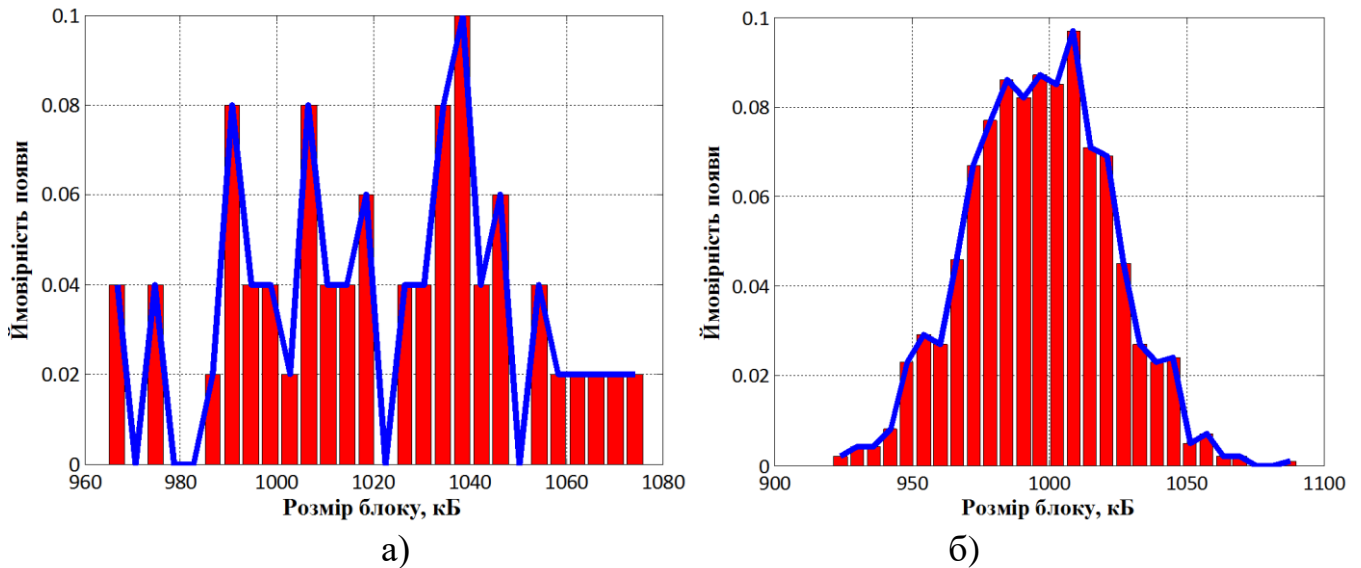


Рис. 7. Статистичний розподіл розміру блоків у випадку агрегації а) 100 пакетів та б) 1000 пакетів в одному блоці

Крім того, проведено моделювання процесу агрегації блоків у крайовому вузлі мережі з оптичною комутацією блоків. Крайовий вузол представлено у вигляді системи масового обслуговування G/M/1 з довільним розподілом вхідного трафіку і Пуассонівським розподілом розміру IP пакетів. Дослідження проводились для двох існуючих методів агрегації блоків: за критерієм завантаженості буфера та критерієм тривалості формування, які порівнювались із запропонованим адаптивним пороговим методом, що оцінює динаміку зростання завантаженості буфера для виявлення різких флуктуацій навантаження. Результати моделювання представлені на рис. 8.

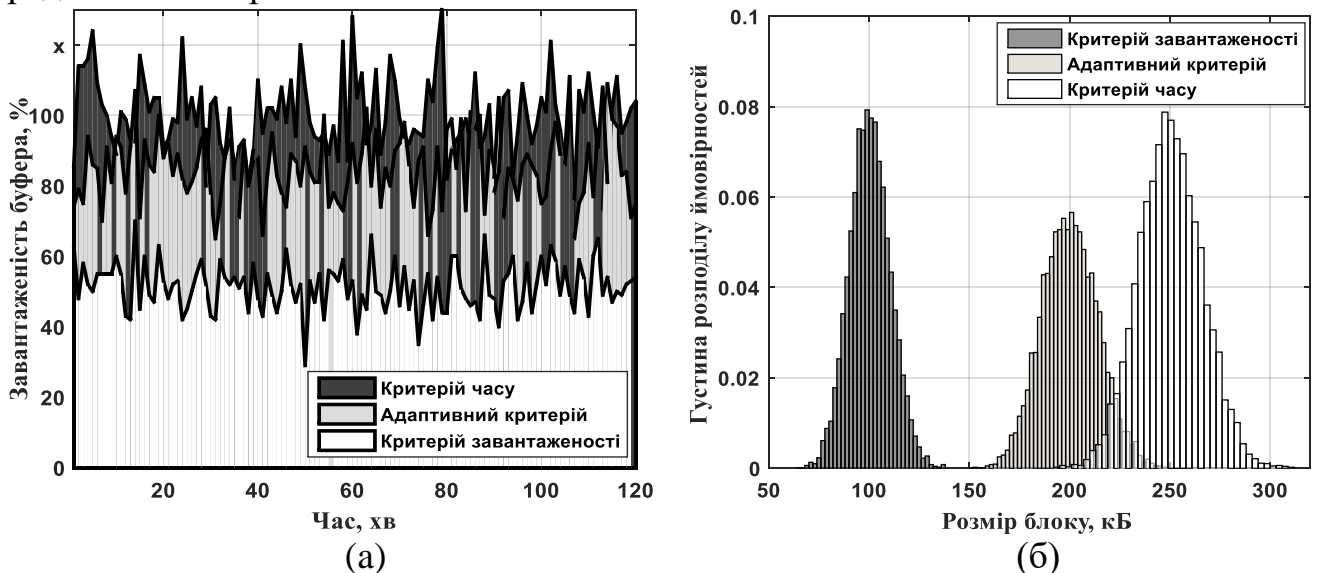


Рис. 8. Профіль завантаженості буфера (а) та густина розподілу розміру блоків (б) для методів на основі трьох критеріїв агрегації блоків

Отримані результати показують, що при використанні алгоритму формування блоку за критерієм завантаженості буфера втрати пакетів в мережі відсутні. Однак, кількість блоків, які були передані перевищила 2000 у зв'язку із малими розмірами самих блоків, що негативно впливає на пропускну здатність мережі з технологією

OBS. З використанням методу формування блоків за критерієм тривалості очікування, розмір блоку був максимальним, а кількість блоків становила менше 1000 при тому ж обсязі переданих даних. Тобто, пропускна здатність в мережі для такого методу є максимальною. Проте, за умови різких стрибків інтенсивності трафіку, даний метод допускає часті перевантаження буфера і, як наслідок, відкидання до 30% вхідних IP пакетів. За адаптивного методу формування блоків, критерій готовності блоку до відправлення буде обрано в залежності від конкретних умов. За невеликої інтенсивності вхідного навантаження блок формується за критерієм часу очікування. Однак, зі зростанням інтенсивності надходження пакетів у буфер, виникають перевантаження і вузол автоматично змінює критерій формування блоку. Як показано на рис. 8, б, розмір блоку коливається, і може приймати значення, характерні для обох розглянутих вище методів. Запропонований метод формування забезпечує оптимальний баланс між пропускною здатністю мережі OBS та кількістю втрачених пакетів, яка для даного випадку становить близько 3%.

Крім того, проведено моделювання процесу агрегації пакетного трафіку у вузлі з використанням запропонованої моделі диференційної сегментації блоків за класами трафіку. При моделюванні використано модель вузла з двома вхідними та двома вихідними каналами та сумарною пропускною здатністю 400 Мбіт/с. Для спрощення прийнято, що у проміжному вузлі не використовуються оптичні буфери та конвертери довжин хвиль. На рис. 9 представлено результати моделювання впливу міжпакетного інтервалу на інтервал колізії між блоками та коефіцієнт втрачених пакетів. Кожен сегмент містить 10 пакетів, а тривалість агрегації блоку фіксована і становить 5 мс.

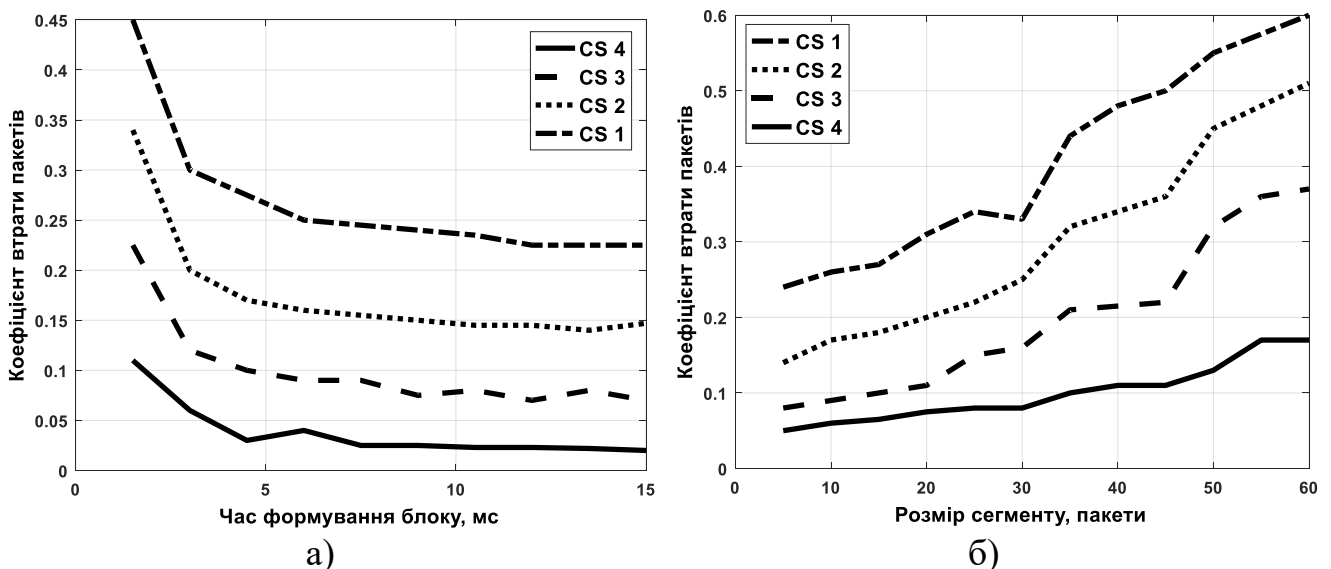


Рис. 9. Залежність коефіцієнту втрати пакетів від а) тривалості формування та б) розміру сегменту для чотирьох класів обслуговування

Четвертий розділ роботи – «Практична реалізація програмно-керованої оптичної транспортної мережі з комутацією блоків» – присвячений практичним аспектам реалізації транспортної інфраструктури оптичної мережі з комутацією блоків. Запропоновано нову площину керування оптичною мережею на основі технології програмно-конфігурованих мереж SDN (Software Defined Network), яка

виконує функції керування інформаційними потоками у мережі зі складною топологічною структурою, неоднорідними характеристиками інтенсивності трафіку та вимогами до параметрів якості передавання.

Особливістю площини керування є програмно-керовані крайові та проміжні вузли оптичної транспортної мережі, які взаємодіють з центральним контролером та підтримують незалежну віддалену реконфігурацію окремих програмно-апаратних модулів без переривання процесу функціонування мережі. Це досягається шляхом використання модифікованих структурно-функціональних схем крайового та проміжного вузлів на основі програмованих логічних інтегральних схем. Модифікований крайовий вузол мережі OBS забезпечує взаємодію модулів класифікації пакетів, планування блоків та генерації BHP з основним SDN контролером. Модифікований проміжний вузол мережі OBS забезпечує взаємодію SDN контролера з модулями обробки BHP, модулями пріоритетизації та маршрутизації інформаційних потоків, планування процесу оптичної комутації блоків тощо. Модифікована структурно-функціональна схема керуючого пристрою проміжного вузла представлена на рис. 10.

Результати моделювання продуктивності процесу комутації потоків у вузлі показують, що гібридна програмно-апаратна реалізація оптичного комутаційного вузла на основі програмованих логічних інтегральних схем дає змогу підвищити швидкодію вузлів у процесі обробці службової інформації за рахунок апаратної реалізації операцій сортування та множення великих масивів даних, а також адаптивної програмної реалізації модулів контролю параметрів вузла з можливістю його адаптації до змінних умов мережі (рис.10).

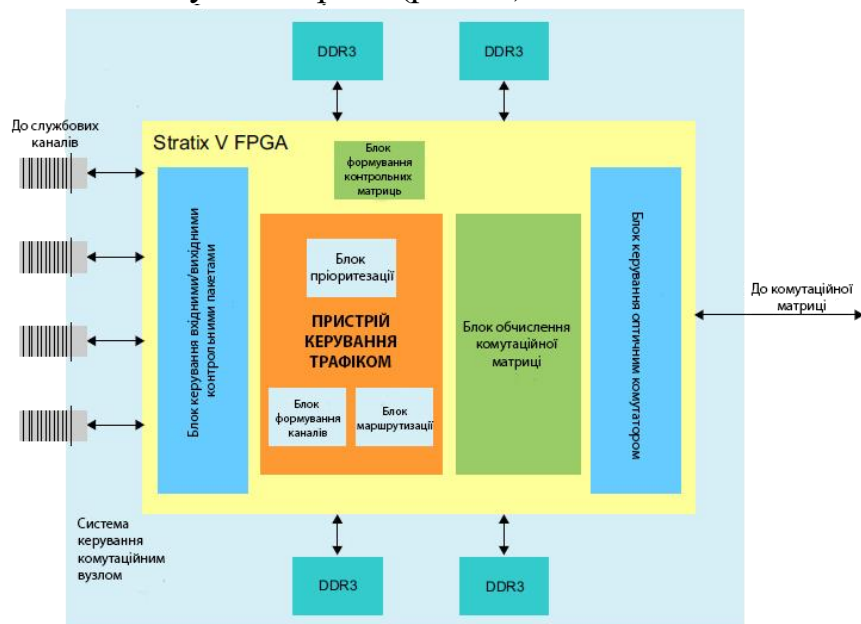


Рис. 10. Модифікована структурно-функціональна схема керуючого модуля проміжного вузла програмно-конфігурованої мережі з оптичною комутацією блоків на основі програмованих логічних інтегральних схем

З результатів на рис. 11 а) видно, що використання модифікованої схеми дає змогу нарощувати розмірність комутаційного вузла без значного підвищення затримки в процесі пріоритетизації потоків, в той час, як його класична реалізація є

обмеженою з точки зору кількості інформаційних потоків, які можуть одночасно проходити через комутаційний вузол. Крім того, апаратна реалізація модулів обчислення комутаційної матриці забезпечує значну масштабованість комутаційної матриці з точки зору затримки комутації, яка є обмеженою з точки зору ємності самих програмованих логічних інтегральних схем (рис.11, б). Теоретичні розрахунки показують, що існуючі на сьогодні програмовані логічні інтегральні схеми дають змогу реалізувати комутаційний вузол розмірністю 2048x2048 інформаційних потоків без підвищення затримки в процесі комутації.

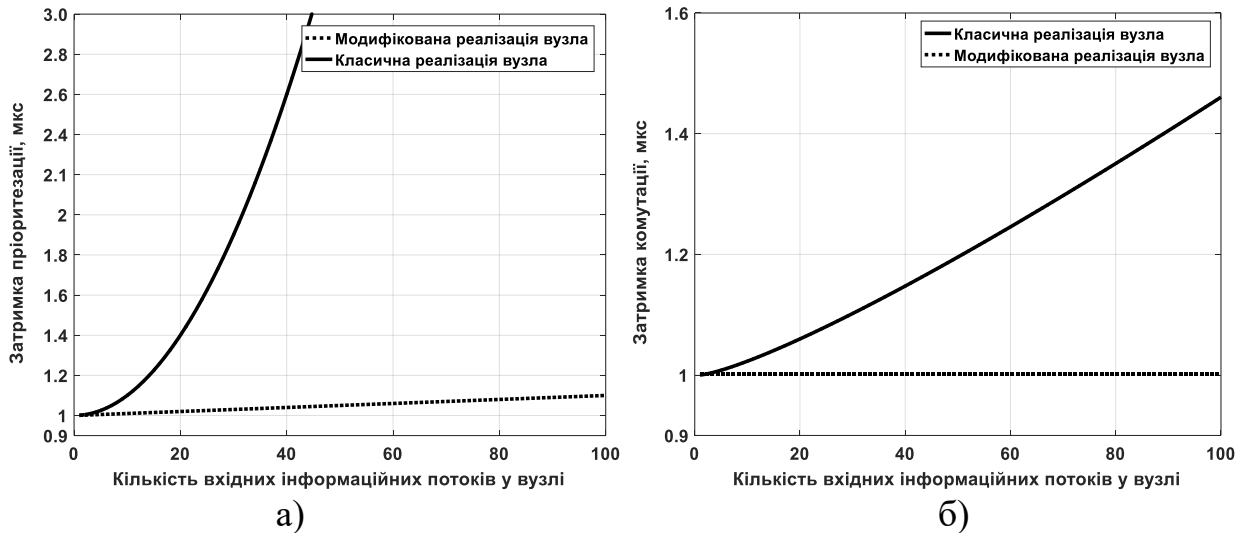


Рис. 11. Залежність затримки у вузлі від кількості вхідних інформаційних потоків в процесі а) пріоритизації та б) комутації

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі розв'язано актуальне наукове завдання розроблення моделей, методів та алгоритмів комутації інформаційних потоків у оптичних транспортних мережах зі складною структурою з урахуванням змінних вимог до параметрів якості передавання даних та різких флуктуацій інтенсивності трафіку.

1. Детально проаналізовано стан та тенденції розвитку повністю оптичних транспортних мереж з пакетною комутацією і визначено основні обмеження, зумовлені складністю процесу агрегації трафіку у крайових вузлах з одночасним забезпеченням належних параметрів затримки та пропускної здатності оптичних каналів, відсутністю єдиної площини керування процесом розподілу інформаційних потоків у мережі зі складною структурою та неоднорідністю вимог до параметрів якості передавання інформаційних потоків, а також непристосованістю існуючих комутаційних вузлів до ефективної комутації пакетного трафіку із забезпеченням низької затримки, високої ефективності використання пропускної здатності каналів, гнучкості та масштабованості оптичної мережної інфраструктури.

2. Удосконалено метод агрегації трафіку мереж доступу в крайовому вузлі оптичної транспортної мережі з комутацією блоків, що дало змогу підвищити ефективність використання пропускної здатності оптичних каналів зв'язку із одночасним забезпеченням належної якості передавання інформаційних потоків. На основі удосконаленого методу розроблено алгоритм агрегації трафіку у крайовому вузлі оптичної мережі з комутацією блоків, який використовує

адаптивний критерій формування блоку з урахуванням параметрів затримки, ефективності використання каналів та інтенсивності навантаження у вузлі, що дало змогу підвищити ефективність використання пропускну здатності оптичних каналів зв'язку на 10-25% при одночасному зменшенні кількості втрачених пакетів до 10 разів в залежності від інтенсивності трафіку в мережах доступу.

3. Запропоновано модель диференційної сегментації блоків на основі пріоритетного сортування пакетів різних класів у межах одного блоку, що забезпечує покращення параметрів якості передавання інформаційних потоків за рахунок зниження ймовірності втрат пріоритетних пакетів та уникнення непослідовної доставки пакетів навантаження. Результати моделювання показали, що використання диференційної сегментації блоку дає змогу знизити втрати пріоритетних пакетів у два рази шляхом перегрупування пакетів у блоці в порядку спадання їх пріоритету, що зменшує ймовірність блокування для пакетів з вищим пріоритетом обслуговування. Крім того, визначено, що із використанням запропонованого алгоритму вплив розміру сегменту на затримку пріоритетного трафіку є несуттєвим у порівнянні із затримкою непраіоритетного трафіку.

4. Запропоновано удосконалений метод комутації блоків у вузлі, який, на відміну від існуючих методів, є адаптованим до комутації оптичних блоків з урахуванням їх пріоритетів, розміру та вимог з точки зору часових та кількісних характеристик якості передавання трафіку. Важливою перевагою запропонованого методу є його адаптованість до програмно-апаратної реалізації окремих обчислювальних модулів, що зменшує затримку в процесі керування оптичним комутаційним вузлом за рахунок паралельної обробки пакетів заголовків і зменшує затримку в процесі пріоритезації трафіку за рахунок ефективного методу обробки службових даних. Запропонований алгоритм комутації інформаційних потоків у проміжному вузлі оптичної мережі дав змогу зменшити затримку в процесі обробки пакетів заголовків на 20% та 40% із використанням 40 та 80 довжин хвиль в оптичних каналах відповідно.

5. Запропоновано модифіковану структурно-функціональну модель програмно-апаратного блоку керування оптичним комутаційним вузлом на основі програмованих логічних інтегральних схем, яка, на відміну від існуючих, підтримує незалежну динамічну реконфігурацію окремих функціональних компонентів вузла. Це дало змогу адаптувати вузли мережі з оптичною комутацією блоків до архітектури програмно-конфігурованої мережі, чим забезпечено підвищення ефективності процесу розподілу інформаційних потоків у транспортній мережі, а також – підвищення швидкодії комутаційних вузлів. Результати показали, що використання модифікованої схеми дає змогу нарощувати розмірність комутаційного вузла без значного підвищення затримки в процесі пріоритезації потоків, в той час як класична реалізація є обмеженою з точки зору кількості інформаційних потоків, які можуть одночасно проходити через комутаційний вузол. Крім того, апаратна реалізація модулів обчислення комутаційної матриці, забезпечує необмежену масштабованість вузла.

6. Проведено моделювання процесу функціонування оптичної транспортної мережі для порівняння ефективності запропонованих методів та моделей з відомими. Для порівняння ефективності алгоритмів формування блоків в умовах

варіації інтенсивності вхідного навантаження згенеровано вхідний трафік з наступними параметрами: середній розмір пакету – 1 кБ, кількість вхідних потоків – 24, інтенсивність вхідних потоків – 10 Гбіт/с, тривалість моделювання – 50 год. Параметр Херста для змодельованого трафіку становить $H=0.92$. Інтенсивність надходження пакетів розподілена за нормальним законом. За незначної кількості пакетів у блоці густина розподілу ймовірностей його розміру не може бути чітко описана. Результати показують, що закон розподілу розмірів блоків наближається до Гаусівського при збільшенні кількості пакетів у блоці для всіх методів формування. Із використанням алгоритму формування блоку за критерієм завантаженості буфера втрати пакетів в мережі відсутні. Однак, кількість блоків, які були передані, перевищила 2000 у зв'язку із малими розмірами самих блоків, що негативно впливає на пропускну здатність мережі OBS. У випадку використання методу формування блоків за критерієм тривалості очікування розмір блоку був максимальним, а кількість блоків становила менше 1000 за того ж обсягу переданих даних. Тобто, пропускну здатність в мережі для такого методу була максимальною. Проте, за умов різких стрибків інтенсивності трафіку даний метод допускає часті перевантаження буфера і, як наслідок, відкидання до 30% вхідних IP пакетів. Використання запропонованого методу формування блоків забезпечує оптимальний баланс між пропускну здатністю мережі OBS та кількістю втрачених пакетів, яка для даного випадку становить близько 3%, що є на порядок менше, ніж при використанні методу формування блоків за критерієм часу очікування.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

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

1. 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". Радіoeлектроніка та телекомунікації, Львів, 2013. – № 766. - С. 96–103. (Index Copernicus, Google Scholar).

2. 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". Радіoeлектроніка та телекомунікації, Львів, 2014. – № 796. - С. 147–156. (Index Copernicus, Google Scholar).

3. 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. - P. 470-480. (CrossRef, DBLP, DBPIA, Google Scholar, EBSCO)

4. 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. (CrossRef, DBLP, DBPIA, Google Scholar, EBSCO)

5. 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". Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів, 2015. – № 818. - С. 130-136. (Index Copernicus, Google Scholar).

6. Кайдан М.В. Дослідження принципів побудови транспортних мереж на основі технології OLS / М.В. Кайдан, В.С. Андрушак, С.С. Думич // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів, 2016. – № 849. - С. 203-209. (Index Copernicus, Google Scholar).

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

7. Wavelength Routed Optical Neural Networks [М. Kaidan, S. Dumych, B. Strykhaluk, O. Yaremko, O. Melnyk.] : Матеріали міжнародної конференції [IEEE “Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science – 2012”], (Львів-Славське, 21-24 лютого, 2012). – Львів, 2012. – Р. 246-247. (Scopus)

8. The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network [S. Dumych, T. Maksymyuk, O. Krasko, P. Guskov] : Proceedings of international conference [IEEE “Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics – 2013”], (Polyana-Svalyava, February 19-23, 2013). – Polyana-Svalyava, 2013. – Р. 88. (Scopus)

9. Simulation of characteristics of optical burst switched networks [S. Dumych, P. Guskov, T. Maksymyuk, M. Klymash] : Proceedings of international conference [IEEE “Microwave and Telecommunication Technology – 2013”], (Sevastopol, September 8-14, 2013). – Sevastopol, 2013 – Р. 492-493.(Scopus)

10. Simulation of burst aggregation and signalling schemes for optical burst switched networks [Maksymyuk T., Dumych S]: Proceedings of international conference [“Computer Science & Engineering 2013”], (Lviv, November, 2013 p.). – Lviv, 2013. - Р. 40-41. (Google Scholar)

11. Software Defined Optical Switching for Cloud Computing Transport Systems [T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Jo]: Proceedings of international conference [ACM “International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication – 2015”], (Bali, 8-10 Jan. 2015.). – Bali, Indonesia, 2015. – Р. 42. (Scopus)

12. Study on traffic aggregation algorithms for edge nodes of optical burst switching network [S. Dumych] : Proceedings of the international conference [“Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science – 2016”]. - (Lviv-Slavske, Feb. 22- 26, 2016). – Lviv, 2016. – Р. 947-949.

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

13. Декомпозиція віртуальних каналів оптичних мереж з використанням діакоптики [Б.М.Стрихалюк, М.В.Кайдан, С.С. Думич]: матеріали науково-методичної конференції [“Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2011”], (Львів, 27-30 жовтня 2011 р.).- Львів, 2011. - С. 97-99.

14. Модель оптичного комутатора для систем зі спектральним ущільненням каналів [С.С. Думич, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк] : матеріали міжнародної науково-технічної конференції ["Сучасні інформаційно-комунікаційні технології – 2012"], (Лівадія, 24-27 квітня 2012 р.). - Лівадія, 2012. – С. 116-117.

15. Методика розрахунку ймовірності блокування у повністю оптичних телекомунікаційних системах [С.С. Думич, Т.А. Максимюк О.В. Холявка, П.О. Гуськов] : матеріали науково-методичної конференції ["Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2012"], (Львів, 1-4 листопада 2012 р.). - Львів, 2012. - С. 45-47.

16. Алгоритм маршрутизації довжин хвиль в повністю оптичній транспортній мережі [С.С. Думич, Б.М. Стрихалюк, Т.А. Максимюк, М.В. Кайдан] : матеріали міжнародного науково-технічного симпозіуму ["Нові технології в телекомунікаціях – 2013"], (Вишків, 17-21 січня 2013 р.). - Вишків, 2013. - С. 58-61.

17. Дослідження методів агрегації інформаційних потоків в крайовому вузлі мережі з комутацією блоків [С.С. Думич, Т.А. Максимюк, П.О. Гуськов] : матеріали науково-методичної конференції ["Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій – 2013"], (Львів, 30 жовтня-2 листопада 2013 р.). - Львів, 2013. - С. 215-220.

АНОТАЦІЯ

Думич С.С. Методи та алгоритми підвищення ефективності комутації інформаційних потоків у оптичних транспортних мережах. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі. – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

Дисертаційна робота присвячена розв'язанню актуального науково-практичного завдання розроблення моделей та алгоритмів комутації інформаційних потоків в оптичних транспортних мережах зі складною топологічною структурою в умовах динамічно-змінної інтенсивності трафіку та неоднорідних вимог до параметрів якості передавання даних. В роботі проаналізовано поточний стан та тенденції розвитку повністю оптичних транспортних мереж з пакетною комутацією та визначено основні обмеження продуктивності оптичних транспортних мереж. Удосконалено метод агрегації трафіку мереж доступу в крайовому вузлі оптичної транспортної мережі з комутацією блоків, що дало змогу підвищити ефективність використання пропускну здатності оптичних каналів зв'язку при одночасному забезпеченні належної якості передавання інформаційних потоків. Запропоновано модель диференційної сегментації блоків на основі пріоритетного сортування пакетів різних класів у межах одного блоку, що забезпечує покращення параметрів якості передавання інформаційних потоків за рахунок зниження ймовірності втрат пріоритетних пакетів. Удосконалено метод оптичної комутації блоків у вузлі шляхом використання бінарних матриць переходу між вхідними та вихідними лініями зв'язку, що дало змогу зменшити затримку службових пакетів за рахунок програмно-апаратної реалізації підсистеми керування крос-комутатором.

Запропоновано структурно-функціональну модель програмно-апаратного блоку керування оптичним комутаційним вузлом на основі програмованих логічних інтегральних схем, яка, на відміну від існуючих, підтримує незалежну динамічну реконфігурацію окремих функціональних компонентів вузла з використанням технології програмно-конфігурованих мереж.

Ключові слова: оптичні транспортні мережі, комутація блоків, агрегація трафіку, програмовані логічні інтегральні схеми.

АННОТАЦИЯ

Думич С.С. Методы и алгоритмы повышения эффективности коммутации информационных потоков в оптических транспортных сетях.

– 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, Львов, 2017.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-практической задачи разработки моделей и алгоритмов коммутации информационных потоков в оптических транспортных сетях со сложной топологической структурой в условиях динамично-переменной интенсивности трафика и неоднородных требований к параметрам качества передачи данных. В работе проанализировано текущее состояние и тенденции развития полностью оптических транспортных сетей с пакетной коммутацией и определены основные ограничения производительности оптической сети. Усовершенствован метод агрегации трафика сетей доступа в конечных узлах оптической транспортной сети с коммутацией блоков, что позволило повысить эффективность использования пропускной способности оптических каналов связи при одновременном обеспечении надлежащего качества передачи информационных потоков. Предложенная модель дифференциальной сегментации блоков на основе приоритетной сортировки пакетов различных классов в пределах блока обеспечивает улучшение параметров качества передачи информационных потоков за счет снижения вероятности потерь приоритетных пакетов. Усовершенствован метод оптической коммутации блоков в узле путем использования бинарных матриц перехода между входными и выходными линиями связи, что позволило уменьшить задержку служебных пакетов за счет программно-аппаратной реализации подсистемы управления кросс-коммутатором. Предложена структурно-функциональная модель программно-апаратного блока управления оптическим коммутационным узлом на основе программируемых логических интегральных схем, которая, в отличие от существующих, поддерживает независимую динамическую реконфігурацію отдельных функциональных компонентів узла с использованием технологии программно-конфігурируемых сетей.

Ключевые слова: оптические транспортные сети, коммутация блоков, агрегация трафика, программируемые логические интегральные схемы.

ABSTRACT

Dumych S.S. Methods and algorithms for increasing the data flows switching efficiency in optical transport 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 for education and science of Ukraine, Lviv, 2017.

The thesis is devoted to solving an actual scientific task of developing models and algorithms for data flows switching in optical transport networks with complex topological structure in conditions of dynamic traffic behavior and heterogeneous requirements of data transmission quality.

Current state-of-the art technologies for packet switching in optical transport networks have been studied. The main restrictions for network performance were assessed such as complicated traffic aggregation in the edge node of optical burst switching network due to heterogeneous traffic requirements and complex data flows distribution among network nodes. Additional challenge is to improve the structure of the switching node to make it well suited for packets switching according to dynamic traffic intensity and various traffic classes.

The method of traffic aggregation in the edge node of optical burst switching network has been proposed. It was contributed approach allows to increase the efficiency of optical channels utilization while supporting the target quality of data flows transmission. Simulation results show that buffer threshold method results in smallest burst size distributed around 100 kB. However, during two hours of simulation buffer load for buffer threshold algorithm did not increased higher than 60%. For the time threshold method, bursts aggregated to much larger size approximately distributed around 250 kB. But, buffer overloaded very frequently that resulting in approx. 30% packet losses. Proposed adaptive threshold method for busts aggregation was proved as effective solution for optical burst switching networks. According to our simulation, buffer always loaded up to 90%, but almost never touches 100% limit resulting in approx. 3% of lost packets. Despite of this, bursts size is distributed around 200 kB, which seems to be large enough for effective throughput utilization, but still less than for the time threshold method.

The model of differentiated burst segmentation based on packets sorting within the burst according to its priority. Proposed model allows to improve the quality of data flows transmission by decreasing the probability of traffic loss for the packets of higher priority.

The method of switching in the core node of optical burst switching network has been developed. Proposed method is well suited for hybrid hardware and software implementation of the header packet processing subsystem. This solution allows to speed up the processing of burst header packets that simultaneously decreases the switching delay and the latency of data flows transmission.

The new modified model of hybrid hardware and software control unit for the core node of optical burst switching network was contributed. The main novelty of this model is that it is based on field programmable gate arrays. Proposed approach enables independent dynamic reconfiguration of separate units of the node based on software defined networking.

Keywords: optical transport networks, burst switching, traffic aggregation, field programmable gate arrays.

Здано в набір 07.04.2017. Підписано до друку 26.04.2017.
Формат 60x90 1/16. Зам. № 5010.
Тираж 120 прим. Обсяг 0,9 друк. арк.
Віддруковано на видавничому устаткуванні фірми RISO
у друкарні ПП «Арк-сервіс»
79005, м. Львів, вул. Драгоманова, 16.

