

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

КАЙДАН МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.391

**МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ ПОБУДОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ
ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів - 2017

Дисертацією є рукопис

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

Науковий консультант: лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки, 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;

доктор технічних наук, професор
Власов Олександр Миколайович,
Державний університет телекомунікацій,
професор кафедри телекомунікаційних систем та мереж;

доктор технічних наук, доцент
Політанський Руслан Леонідович,
Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича,
професор кафедри радіотехніки та інформаційної безпеки.

Захист дисертації відбудеться “06” жовтня 2017 р. о 11³⁰ год. на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.10 у Національному університеті “Львівська політехніка” (79013, Львів-13, вул. С. Бандери, 12, ауд. 226 головного навчального корпусу).

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

Автореферат розісланий “05” вересня 2017 р.

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



І.В. Демидов

Актуальність теми. Сучасний етап суспільного розвитку нерозривно пов'язаний із постійним зростанням потреб в отриманні інформації необхідної якості, що призводить до збільшення трафіку та підвищення вимог до обслуговування в транспортній мережі. Для створення високошвидкісних систем передавання важливого значення набувають енергоефективні технології. При цьому виникає сукупність наукових завдань технічного, фізичного та математичного характеру, зокрема – побудови ефективних мережних структур на основі новітніх елементів мережної архітектури (апаратних засобів та протоколів). Необхідно також впроваджувати мережеві компоненти з найбільш ефективним використанням матеріалів в елементах активного комутаційного обладнання.

В транспортних мережах, функціонування яких здійснюється з використанням електронних пристроїв, обмежується швидкодія системи в цілому за рахунок наявності оптоелектрооптичних (ОЕО) перетворень. Останнім часом відбуваються спроби переходу до повністю оптичних мереж, тобто фотонних мереж, які максимально позбуваються ОЕО перетворень.

На сьогодні для збільшення пропускну здатності OTN (Optical transport network – оптична транспортна мережа) розробляються та розвиваються технології швидкої комутації. Зокрема, використовують комутацію за мітками – MPLS (Multiprotocol Label Switching - багатопротокольна комутація за мітками) або GMPLS (Generalized MPLS - узагальнена багатопротокольна комутація за мітками), а також реалізовується технологія OBS (Optical Burst Switching- оптична комутація блоків), яка забезпечує оптичну комутацію блоків із використанням оптичних комутаторів, що дозволяє зменшити час передачі даних. Для забезпечення необхідної якості та кількості наданих телекомунікаційних послуг необхідно також впроваджувати новітні мережні засоби, такі як фотонно-кристалічні волокна (ФКВ), а також об'єднання існуючих технологій, наприклад IP/MPLS/DWDM (Internet Protocol - міжмережвий протокол; Dense Wavelength Division Multiplexing - щільне хвильове мультиплексування).

Завантаженість PTN (Photon Transport Network - фотонна транспортна мережа) зазнає різних за характером змін, внаслідок чого виникають можливості перевантажень оптичної мережної платформи, а відповідно – ймовірних втрат у процесі передавання інформації і погіршення часових параметрів. Виникає необхідність у дослідженні PTN, а саме методів та протоколів управління навантаженням, зокрема – при застосуванні OBS.

Значний науковий внесок у розвиток технологій за даною тематикою внесли вчені: Стеглов В.К., Убайдуллаєв Р.Р., Склярів О.К., Слепов М.М., Климаш М.М., Власов О.М., Бондаренко О.В., Семенов А.Б., Агравал Г.П., Ківшарь Ю.С., Фріман Р., Беррі Р., Хамблет П., Желтіков А.М., Розанов Н.Н., Хмелев К.Ф., Султанов А.Х. та інші.

Необхідно враховувати, що згідно рекомендації ITU-T (International Telecommunication Union - Telecommunication sector- Міжнародний союз електрозв'язку- сектор телекомунікації) до 2020 р. телекомунікаційна мережа

повинна задовольняти будь-які потреби користувачів, надавати велику кількість послуг швидко та якісно. Крім того, потрібно зменшити до мінімального рівня витрати матеріалів і споживання енергоресурсів для роботи використовуваних пристроїв. Отже, існує необхідність у пошуку шляхів ефективного використання матеріалів для пристроїв РТН.

З метою проведення досліджень існує необхідність у використанні теорій випадкових графів, перколяції та масового обслуговування, що дає змогу визначити параметри РТН в різних режимах завантаженості, оцінити ефективність її існуючих та перспективних моделей, протоколів та алгоритмів для практичної реалізації.

Складність мережі, швидкі зміни її стану, багаторівневність призводять до необхідності використовувати тензорний аналіз, як математичний апарат для телекомунікаційних мереж. Ряд визначних досягнень у тензорному аналізі мереж внесли Крон Г., Хепп Х., в тому числі для галузі телекомунікацій Петров А.Е., Арменський А.Е., Пасечников І.І., Лебедянець В.В. Значний доробок зробили і українські вчені Лемешко О.В., Стрелковська І.В., Євсєєва О.Ю., Григор'єва Т.І., Стрихалюк Б.М. На основі тензорного аналізу Кроном Г. також розроблено метод діакоптики (метод Крона), що дозволяє проводити дослідження мереж великих розмірів. З іншого боку, на основі теоретичної бази в галузі фізики твердого тіла, в рамках її прикладного застосування для виготовлення активних елементів в оптичних пристроях, за допомогою тензорного аналізу здійснюється побудова вказівних поверхонь. Це дозволяє дослідити просторову анізотропію використовуваних матеріалів і визначити їх орієнтацію для забезпечення енергоефективності пристроїв РТН. Вагомий внесок в даному напрямку зробили Мицик Б.Г., Андрущак А.С., Богаті Л., Бурий О.А. та інші.

Проте, тензорний аналіз не в повній мірі використовується при дослідженні телекомунікаційних мереж. Зокрема, сучасні мережі доцільно описувати за допомогою тензорного аналізу з використанням диференціальної геометрії. Це дає можливість проводити дослідження поведінки параметрів телекомунікаційних мереж в залежності від динаміки зміни їх стану.

З вищесказаного випливає, що актуальним є розвиток, вдосконалення та впровадження математичних моделей для дослідження РТН з метою мінімізації енергоспоживання, часових параметрів та ймовірності втрат даних.

Водночас існує **протириччя** між мінімізацією часових параметрів та ймовірністю втрат даних при одночасному забезпеченні енергоефективності РТН.

Отже, **науково-прикладною проблемою** є підвищення ефективності РТН із забезпеченням мінімізації енергоспоживання, часових параметрів та ймовірності втрат даних.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.

Дисертаційна робота виконувалась в рамках держбюджетних науково-дослідних робіт «Дослідження і оптимізація структури і топологій інфокомунікаційних систем і мереж», (ДБ/Структура, (2006–2007 pp.),

№ держреєстрації 0113U003184; «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 0113U003138; «Методи побудови та моделі інформаційно – телекомунікаційної інфраструктури на основі SDN – технологій для систем електронного урядування» (ДБ/SDN) (2015-2016 рр.), № держреєстрації 0115U000444; госпдоговірних науково-дослідних робіт № 439 «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» (2013 р.); ГД № 0548 «Проектування та впровадження локальної мережі передачі мультимедійних даних на базі Ethernet технологій» (2016 р.); міжнародних проектів Українського Науково-технічного Центру (УНТЦ) «Оптимізація геометрії електро-, п'єзо- та акустооптичних взаємодій на основі повного тривимірного аналізу просторової анізотропії (нова комп'ютеризована розробка вискоефективних оптичних модуляторів і дефлекторів)» (№3222, 2005-2007 рр.); «Розробка методології створення найбільш ефективних акустооптичних комірок НВЧ-діапазону для управління потужним лазерним випромінюванням» (№4584, 2008-2009 рр.).

Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності функціонування фотонної транспортної мережі шляхом зменшення енергоспоживання, часових параметрів і втрат при передачі даних.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасного стану, тенденцій розвитку та впровадження нових мережних технологій, визначити теоретичні моделі і підходи для дослідження та оцінювання параметрів PTN.

2. Розробити тензорну модель із використанням теорії диференціальної геометрії для аналізу зміни станів телекомунікаційної мережі.

3. Удосконалити тензорну модель багатошляхової маршрутизації у PTN для випадку використання двостороннього зв'язку між транзитними вузлами.

4. Розвинути метод діакоптики для багатошляхової маршрутизації та на його основі впровадити розрахунок транспортної задачі засобами лінійного програмування для телекомунікаційної мережі.

5. За допомогою 3D-аналізу провести дослідження коефіцієнта електромеханічного зв'язку для кристалів LiNbO_3 та визначити оптимальні зрізи, що дозволяють енергоефективно використовувати побудовані акустооптичні (АО) пристрої у компонентах PTN.

6. Удосконалити математичну модель для визначення параметрів енергоефективності OTN та провести дослідження цих параметрів.

7. Провести дослідження залежності енергоспоживання у OTN від зміни швидкості передавання даних та визначити енергоефективні параметри АО

комутатора і електрооптичного (ЕО) модулятора в залежності від кристалофізичної орієнтації використаних матеріалів.

8. Провести дослідження енергоефективності OTN при використанні ФКВ та технології GMPLS.

9. За допомогою моделей випадкових графів визначити середню довжину шляху та коефіцієнт кластеризації у PTN в залежності від умов завантаженості.

10. Розробити структурну схему оптичного комутатора для реалізації технології OBS та провести аналіз ефективності використання відповідних протоколів сигналізації.

11. На основі теорії перколяції розробити модель для дослідження часових параметрів PTN та втрат при передаванні даних за технологією OBS в залежності від умов завантаженості мережі для різних протоколів сигналізації.

Об'єкт дослідження – процес функціонування фотонної транспортної мережі.

Предмет дослідження – моделі функціонування та елементів мережної архітектури фотонної транспортної мережі.

Методи дослідження. В процесі досліджень використані: теорія масового обслуговування, теорія випадкових графів, теорія перколяції, тензорний аналіз, теорія ймовірності.

Наукова новизна отриманих результатів.

- Вперше запропоновано тензорну модель для дослідження параметрів телекомунікаційної мережі, яка, на відміну від існуючих, використовує методи теорії диференціальної геометрії, що дає змогу враховувати динамічні зміни станів мережі при проведенні аналізу ефективності використання алгоритмів управління інформаційними потоками та визначати оптимальний розподіл трафіку за критеріями мінімізації його часових параметрів і показників втрат при передаванні даних у PTN.

- Набула подальшого розвитку тензорна модель мережі з багатошляховою маршрутизацією для випадку використання двостороннього зв'язку між транзитними вузлами шляхом оцінювання необхідності врахування напряду передавання інформаційних потоків у мережній структурі, що дозволяє ефективно розподіляти навантаження в PTN та покращити часові параметри передавання даних.

- Вперше запропоновано використовувати метод діакоптики шляхом розв'язання транспортної задачі засобами лінійного програмування для телекомунікаційних мереж з багатошляховою маршрутизацією, що дозволяє провести аналіз часових параметрів мереж великих розмірів.

- Удосконалено математичну модель визначення параметру енергоефективності для OTN шляхом врахування параметрів витрат електроенергії на відкриття наскрізних каналів та потужності, яка витрачається мережним обладнанням в режимі холостого ходу, що дозволило здійснювати більш повне оцінювання його експлуатаційних параметрів для покращення енергоефективності мережі.

- Набула подальшого розвитку модель 3D-аналізу коефіцієнта електромеханічного зв'язку шляхом побудови вказівних поверхонь, що дозволяє визначати орієнтацію зрізів для п'єзоперетворювачів в АО пристроях PTN за критерієм енергетичної ефективності.

- Вперше запропоновано проводити дослідження PTN на основі використання моделі теорії випадкового графа, які в різній мірі є еквівалентними реальним телекомунікаційним мережам, що дозволяє здійснювати оцінку ефективного використання різних топологічних структур мереж в залежності від їх завантаженості.

- Вперше запропоновано модель оцінки часових параметрів та втрат передавання даних PTN за допомогою теорії позиційної перколяції, що дало змогу виконати дослідження відповідних параметрів в різних умовах завантаженості мережі, побудованої за технологією OBS для різних протоколів сигналізації.

Наукове і практичне значення отриманих результатів.

- Запропоновано використання буферизації у PTN, побудованій за технологією OBS для протоколу сигналізації JET та визначено, що кількість місць у буфері може не перевищувати п'яти; при цьому досягається зменшення до допустимої межі ймовірності втрат блоку даних, що передаються.

- В результаті 3D-аналізу коефіцієнта електромеханічного зв'язку отримано енергоефективну орієнтацію кристалів LiNbO_3 , як п'єзоперетворювачів АО комутаторів, що дозволяє зменшити їхнє енергетичне споживання на 3 %.

- На основі проведених досліджень енергоефективності OTN рекомендовано:

- мінімізувати використання проміжного оптоелектронного перетворення, що дозволяє зменшити енергетичне споживання до 63 %;
- використовувати орієнтацію кристалів LiNbO_3 , що відповідає максимальному значенню EO коефіцієнта та коефіцієнта АО якості, яка приводить до зменшення енергетичного споживання EO модулятора та АО комутатора на 4,8% та 20 %, відповідно, коли швидкість передачі даних становить 100 Гбіт/с;
- впроваджувати перехід від модуляторів PM-QPSK (100Гбіт/с) до PM-16QAM (400Гбіт/с), що приводить до зниження параметра енергоефективності на 42%, але на сучасному етапі ймовірність відмови PM-16QAM модулятора є в чотири рази вищою порівняно з PM-QPSK модулятором;
- використовувати ФКВ у EDFA підсилювачах, що дозволяє зменшити енергетичне споживання оптичного лінійного тракту на 9,5% у порівнянні із звичайним EDFA, забезпечуючи зменшення ймовірності їх відмови в 1,6 разів;
- застосовувати в GMPLS мережі технологію об'єднання міток, що дозволяє зменшити використання енергоресурсів за умови, коли коефіцієнт завантаження каналів становить не менше 45%, оскільки

нерівномірний розподіл навантаження між каналами може призвести до зростання енергоспоживання мережі;

- здійснювати комутацію GMPLS лише часових блоків і хвиль у випадку, коли кількість проміжних вузлів більше семи, а для коротких LSP можливою є також комутація пакетів.

• В результаті проведених досліджень в рамках теорії випадкових графів на основі моделі Уотса-Строгатса рекомендовано для PTN з каскадно- кільцевою топологічною структурою ступінь зв'язності вузла забезпечувати на рівні не менше трьох.

• В результаті досліджень на основі теорії перколяції та проведеного моделювання технології OBS у PTN, для практичної реалізації рекомендовано використовувати:

- протокол TAW при максимальному рівні завантаження пакетів у блоки, коли мережа знаходиться в квазіперевантаженому стані;
- протокол JET при ефективному та нормальному рівнях завантаження пакетів у блоки;
- буферизацію на транзитному вузлі за допомогою оптоелектронного перетворення для протоколів JET та INI у випадку, коли оптичний буфер знаходиться у заповненому стані, що дозволяє зменшити ймовірність втрати інформаційних блоків, які передаються.

Розроблені моделі, методи та проведені наукові дослідження використані та впроваджені у ТзОВ «Телекомунікаційна компанія», ТзОВ ВТФ «Контех» та при викладанні курсів «Направляючі системи електричного та оптичного зв'язку», «Телекомунікаційні системи передачі» і «Телекомунікаційні та інформаційні мережі» в Інституті телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові результати дисертаційної роботи отримано автором самостійно. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: у роботі [1] – отримані результати на основі теорій графів, ймовірності та систем масового обслуговування; у [2] – отримані результати на основі моделей випадкових графів, моделювання і аналізу оптичних мереж; у [3] – отримано співвідношення, проведено моделювання та описано запропоновану буферизацію в OBS; у [4] - представлено ймовірність втрат OBS в оптичній мережі; у [5]- розроблено і описано представлену математичну модель; [6-8]- побудовано вказівні поверхні та проведено оцінку екстремальних значень; [9]- проведено та описано їх теоретичні розрахунки; [10]- вдосконалено модель визначення параметра енергоефективності для оптичної транспортної мережі; [11]- представлено технічні і архітектурні підходи щодо підвищення енергоефективності телекомунікаційних мереж; [13] - визначено параметри енергоефективності, в залежності від зміни швидкості передачі даних для маршрутизатора, АО комутатора і ЕО модулятора; [14] - розроблено алгоритм дослідження багатопарової транспортної мережі з IP/MPLS/DWDM; [16] - проведено дослідження енергоефективності телекомунікаційних мереж в залежності від швидкості передавання даних та з використанням ФКВ; [17] -

оцінено параметр енергоефективності для технологій GMPLS; [18] - розроблено та проведено дослідження за допомогою методу діакоптики; [19] - запропоновано структурну схему оптичного комутатора на основі АО комірки; [20, 21] - розроблено тензорну модель дослідження телекомунікаційної мережі кільцевої топології; [22] - запропоновано тензорну модель дослідження багатовимірної мережі; [23] - проведено дослідження мережної системи в околі точок, близьких до її граничного стану; [15,24-27]- вдосконалено тензорну модель; [28] - розроблено алгоритм функціонування оптимізаційної моделі багат шарових телекомунікаційних структур за допомогою лінійного програмування із застосуванням методу діакоптики; [29] - проведено оцінку підвищення ефективності АО модуляторів, як компонентів оптичної мережі; [30-33] - проведено теоретичні розрахунки та аналіз отриманих результатів; [34] - розглянуто вплив факторів завантаження на живучість складної мережі; [35] - розроблено представлену тензорну модель; [36] - проведено аналіз ефективності різних протоколів OBS в залежності від завантаження мережі; [37-38] - проведено теоретичні розрахунки для тензорної моделі при K_m - шляховій маршрутизації; [39] - розроблено методи аналізу PTN різної топології; [40] - здійснено постановку задачі та розроблено модель дослідження багат шарової структури транспортної мережі; [41] - проведено дослідження оптичної мережі з маршрутизацією довжин хвиль; [42-51] – виконано постановку завдань, проведено теоретичні розрахунки та аналіз отриманих результатів; [52] - розроблено модель перколяції для PTN; [53,54] - проведено дослідження енергоефективності мережі для протоколів сигналізації технології OBS; [55] - визначено енергоефективність ЕО пристроїв у PTN; [56] - вдосконалено модель їх розрахунку; [57-58] - проведено теоретичні розрахунки та аналіз ефективного використання модуляторів у волоконнооптичних системах; [59] – виконано аналіз отриманих результатів для АО пристроїв; [60] - запропоновано модель багатоканального комутатора; [61] - запропоновано алгоритм розрахунку; [62-64] - проведено аналіз отриманих результатів для транспортних мереж; [65] - проведено аналіз для багаторівневої мережної структури; [66-68] - запропоновано структуру оптичного комутатора, здійснено постановку завдання та оцінювання розробленої математичної моделі; [69-70] - проаналізовано використання фотонних кристалів в оптичних транспортних мережах; [71-72] - розроблено модель оптимізації багат шарових телекомунікаційних мереж та проведено розрахунки на основі методу діакоптики; [74-76] - проведено моделювання та оцінку отриманих результатів.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях: Proceeding of IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDTW'06), Sochi, Russia, September 15-19, 2006; Proceedings of the symposium on photonics technologies for 7th framework program, Wroclaw 12-14, October 2006; Proceeding of the International Conference CADSM (Львів- Поляна 2007, 2015); SENSOR Conference 2007 Proceedings of 13th International Conference, 22 - 24 May 2007, Nürnberg, Germany; Proceedings of International

Conference «CRYSTAL MATERIAL'2007», September 17-20, 2007, Kharkiv, Ukraine; Proceedings of International Conference «Functional Materials» ICFM' 2007, October 1–6, 2007, Partenit, Crimea, Ukraine; «Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікації» (Львів, Україна, 2007, 2009, 2011 - 2014); «Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science - Proceeding of the International Conference TCSET» (Львів-Славське, Україна, 2008, 2010, 2012, 2014); Труды 9 международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии», 19-23 Мая, 2008, Одесса, Украина; Proceeding of International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM). (Крим, Україна 2008, 2010); Emerging Research and Projects Applications Symposium (ERPAS 2010), in conjunction with the iiWAS2010, 8-10 November, 2010, Paris, France; Чотирнадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету «Львівська політехніка» з проблем електроніки, 5-7 квітня 2011 – Львів (Україна); Міжнародна науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології» COMINFO'-Livadia (АР Крим, Ялта-Лівадія 2011, 2012); Міжнародний науково-технічний симпозиум «Новітні технології в телекомунікаціях» – ДУІКТ-Карпати (Київ, 2012, 2013); International scientific-practical conference «Problem of infocommunications science and technology (PIC S&T'2015,2016)» (Харків, Україна 2015, 2016); 1 Міжнародна науково-практична конференція «Нові досягнення в галузі інформаційно-комунікаційних технологій - 2015», 29 Жовтня - 1 Листопада, 2015 Львів, Україна; Міжнародна Науково-технічна конференція «Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології», 17-20 листопада 2015, Київ, Україна; Десята міжнародна науково-технічна конференція «Проблеми телекомунікацій» і Восьма міжнародна науково-технічна конференція «Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем», 19-22 квітня 2016р. – Київ Україна; 2016 IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та радіоелектроніки (UkrMico'2016/ UkrMico'2016), 11-15 вересня 2016 р.- м.Київ, Україна; V Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах»- 3-5 листопада 2016 р - м.Чернівці, Україна.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 76 наукових робіт, серед них монографій – 2 [1-2], статей у фахових виданнях – 34 [3–36], з них в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз – 17 [3–19], у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 40 [37–76].

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, шести розділів, висновків, списку використаних джерел і двох додатків. Загальний обсяг роботи становить 387 сторінок, з них 268 сторінок основного тексту, в тому числі: 30 таблиць, 135 рисунків, 330 найменувань списку використаних джерел на 38 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, вказано зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, сформульовано мету і визначено основні завдання, об'єкт, предмет і методи дослідження, подано наукову новизну і практичну значимість отриманих результатів із відомостями про впровадження результатів роботи, описано особистий внесок здобувача, наведено відомості про апробацію результатів роботи і про публікації за темою роботи, подано короткий опис структури і обсягу дисертації.

Перший розділ – «Аналіз методів побудови та тенденцій розвитку фотонних транспортних мереж» – на основі різних літературних джерел проаналізовано існуючий стан проблем побудови енергоефективних PTN із забезпеченням мінімізації енергоспоживання, часових параметрів та ймовірності втрат даних і обґрунтовано необхідність у проведенні таких досліджень.

В розділі проведено аналіз PTN та представлено основні визначення, які використовуються у роботі. Представлено концептуальну модель та приведено класифікацію PTN. Розглянуто основні технології, компоненти та моделі, які використовуються при передачі даних у PTN.

Приведено основні характеристики та вимоги, що ставляться до телекомунікаційних мереж згідно рекомендацій ІТУ-Т – Y.3000-3499 до 2020 р. Згідно існуючих вимог необхідно надавати швидко та якісно різноманітні послуги в мережах майбутнього для яких необхідно скоротити витрати матеріалів і енергії.

Проаналізовано процес комутації в PTN, представлено класифікацію використовуваних алгоритмів, розглянута багатопрокольна комутація MPLS та комутація блоків із використанням оптичних комутаторів OBS.

Подано математичні підходи для проведення досліджень в телекомунікаційних мережах. Показано, що для теоретичного розв'язування поставлених сучасних телекомунікаційних проблем виникає необхідність у використанні тензорного аналізу, теорії випадкових графів та перколяції.

Представлено перспективу можливого використання різноманітних елементів, компонент та пристроїв на основі фотонних кристалів та анізотропних оптичних волокон у PTN.

Розглянуто EO ефект та АО взаємодію, а також пристрої, які працюють на основі цих явищ. Показано, що у PTN використання EO ефекту є кращим для оптичних модуляторів, а АО взаємодію доцільно використовувати для оптичних комутаторів.

Показано, що визначення енергетичного балансу PTN вимагає комплексних підходів для вдосконалення мережевої енергоефективності. Представлено технічні і архітектурні підходи щодо підвищення енергоефективності телекомунікаційних мереж. Наведено основні технічні параметри, які визначають їхнє енергоспоживання. Показано, що важливим чинником, який впливає на енергоефективність телекомунікаційних мереж, є

виробник обладнання.

Встановлено, що маршрутизатори ядра мережі споживають найбільше електроенергії по відношенню до іншого обладнання. Наведено рішення щодо перенесення процесу обробки службових даних з маршрутизаторів ядра на нижні рівні, де працює менш енергозатратне обладнання.

Проведено аналіз та класифікацію коефіцієнтів електромеханічного зв'язку для АО пристроїв. Показано доцільність проведення досліджень такого параметру для енергоефективного використання акустичних пристроїв у PTN.

Показано, що для апробації досліджень на основі кристалів доцільно вибрати LiNbO_3 як матеріал, що широко використовується в оптоелектронних пристроях у PTN. Для кристалу ніобату літію приведено основні характеристики.

У другому розділі – «Математичне представлення та моделі фотонних транспортних мереж» – для аналізу PTN розглянуто основні моделі теорії випадкових графів, описано тензорну модель для багатопляхової маршрутизації, запропоновано використання тензорної моделі диференціальної геометрії для дослідження параметрів телекомунікаційної мережі та представлено алгоритм аналізу параметрів телекомунікаційних мереж великих розмірів шляхом використання методу діакоптики.

Розглянуто теорія випадкових графів для дослідження PTN. Представлено основний теоретичний матеріал для дослідження PTN за допомогою моделей Уотса-Строгатса, Ердос-Ренеі, Барабасі-Альберта та узагальненого випадкового графа.

Приведено геометризацию станів мережі, яка представлена у багатовимірному просторі, що ефективно використовується тензорним аналізом. Наведено приклад визначення матриці переходу при зміні стану телекомунікаційної мережі, що відповідає зміні системи координат. Розглянуто незвідні представлення для тензорів.

Приведена узагальнена тензорна модель розрахунку параметрів телекомунікаційної мережі. Зокрема відома формула Літгла представлена у безкоординатній формі запису:

$$\mathbf{H} = \mathbf{T}\mathbf{L}, \quad (1)$$

де кожний тензор представляє сукупність відповідних значень параметрів для вузлів та гілок мережі пропускної здатності \mathbf{L} , часу затримки \mathbf{T} та навантаження \mathbf{H} . Використовуючи тензорні операції над (1), зокрема згортку, можна визначити час перебування даних у вибраній ділянці мережі:

$$\mathbf{T} = \mathbf{H}\mathbf{L}^{-1}, \quad (2)$$

де \mathbf{L}^{-1} - час затримки одиничного навантаження.

Для аналізу стану телекомунікаційної мережі запропоновано використовувати тензорну модель для дослідження її на основі диференціальної геометрії. Для тензорної моделі з використанням диференціальної геометрії вводиться система координат, що відображає n -мірне поле, де кожна точка відповідає певному стану телекомунікаційної мережі. Навантаження, що передається в кожному i -му каналі позначимо

контраваріантною компонентою x^i , де $i=1, \dots, n$. Центр системи координат O відповідає випадку, коли навантаження не спостерігається на всіх каналах. Орти e_i мають по модулю одиничну довжину.

Розглядається радіус-вектор r , що відповідає стану мережі, і геометрично відображається, як проведений від центру системи координат до заданої точки, і визначається, як $r=x^i e_i$. Радіус вектор може бути представлений також через коваріантні компоненти x_i , як $r=x_i e^i$, який розглядається на основі репера $\{e^1, \dots, e^n\}$, що ортогональний $\{e_1, \dots, e_n\}$. Загалом піднімання і опускання індексів здійснюється за допомогою коваріантного $g_{ij}=e_i e_j$ і контрваріантного $g^{ij}=e^i e^j$ метричних тензорів. В тензорній моделі диференціальної геометрії розглядаються випадки, коли $\partial e^i/\partial_j \neq 0$. Тут $\partial e^i/\partial r^j = \partial e^i/\partial_j$.

При зміні навантаження, тобто стану мережі, спостерігається зміна радіуса-вектора. Величину зміни параметра в загальному випадку визначають за допомогою коваріантного диференціювання:

$$Dr = \partial_i r dr^i = e_j (D_i r^j) dr^i = e_j Dr^j, \quad (3)$$

де Dr^j - коваріантний диференціал, $D_i r^j$ - коваріантна похідна.

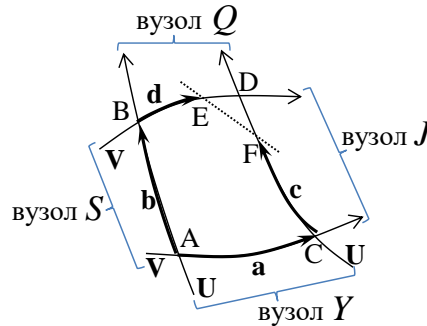


Рис. 1. Зміна послідовності кореляції стану мережі у криволінійній системі координат

Нехай на вузол S надійшло навантаження, яке має бути передане на вузол J , отже, відбулась зміна стану мережі, що відповідає множині V . Припустимо, що в цей же момент надійшло навантаження на вузол Y для вузла Q , відповідна зміна стану мережі відповідає множині U . Згідно рис. 1 множина V складається з векторів a та d , а множина U – з векторів b та c . Різниця між векторами a та d , як і між b та c полягає у послідовній зміні стану мережі.

Нехай спочатку стан мережі змінився за рахунок навантаження, що надійшло на вузол S для передачі даних на вузол J , тоді: $a=a^i e_i = (D_v r^i) dr^v e_i$, потім надійшло навантаження з вузла Y на вузол Q :

$$c = (D_u(r^i + a^i)) dr^u e_i = (D_u(r^i + (D_v r^i) dr^v)) dr^u e_i.$$

У випадку, коли зміна стану мережі відбувається внаслідок надходження на вузол Y навантаження, яке має бути передане на вузол Q , то: $b = b^i e_i = (D_u r^i) dr^u e_i$, а потім з вузла S надходить навантаження на вузол J згідно рис. 1:

$$d = (D_v(r^i + b^i)) dr^v e_i = (D_v(r^i + (D_u r^i) dr^u)) dr^v e_i.$$

Беручи до уваги, що на практиці відомості про зміну стану мережі на вузлах надходять по різному, необхідно визначити, як зміниться радіус-вектор від послідовності змін стану:

$$(\mathbf{a}+\mathbf{c})-(\mathbf{b}+\mathbf{d})=(D_u D_v - D_v D_u) r^i dr^u dr^v \mathbf{e}_i = R^i_{j,uv} r^j dr^u dr^v \mathbf{e}_i. \quad (4)$$

Тут враховано, що: $(D_u D_v - D_v D_u) r^i = R^i_{j,uv} r^j$, де $R^i_{j,uv}$ – тензор Рімана (тензор кривизни), який визначають за допомогою символів другого роду Крістофеля (коефіцієнти зв'язності):

$$R^i_{j,uv} = \partial \Gamma^i_{jv} / \partial u - \partial \Gamma^i_{ju} / \partial v + \Gamma^i_{pu} \Gamma^p_{jv} - \Gamma^i_{pv} \Gamma^p_{ju}. \quad (5)$$

При зміні навантаження у мережі, саме коефіцієнти зв'язності дозволяють описати оптимальний перерозподіл навантаження в мережі, які визначаються у вигляді: $\Gamma^p_{ij} = \mathbf{e}^p \partial \mathbf{e}_i / \partial j$.

Представлені співвідношення є вірними в межах ріманової геометрії, коли нижня пара індексів у символі Крістофеля є симетричною, інакше в (4) треба врахувати $(\Gamma^p_{uv} - \Gamma^p_{vu})(\partial_p r^i + \Gamma^i_{jp} r^j) = 2T^p_{uv}(\partial_p r^i + \Gamma^i_{jp} r^j)$, де $T^p_{uv} = 0,5(\Gamma^p_{uv} - \Gamma^p_{vu})$ – тензор кручення.

Кількість компонент символів Крістофеля і тензора Рімана досить швидко зростає із збільшенням розмірності простору. Для спрощеного визначення цих компонент доцільно використовувати диференціальні форми. Представлено диференціальні форми для символів Крістофеля, тензорів Рімана, Річі, скаляру кривизни простору, а також похідні Лі, як альтернатива коваріантним похідним.

Зазначено, що відомості про послідовність зміни стану мережі на різних ділянках можуть відрізнятися. Для зменшення ймовірних втрат та помилок необхідно, щоб компоненти тензора Рімана дорівнювали нулю, тоді згідно (4), зміна станів комутує між собою і простір є евклідовим.

Вперше запропоновано використовувати метод діакоптики шляхом розв'язання транспортної задачі засобами лінійного програмування для телекомунікаційних мереж з багатошляховою маршрутизацією, що дозволяє провести аналіз часових параметрів мереж великих розмірів (рис. 2).

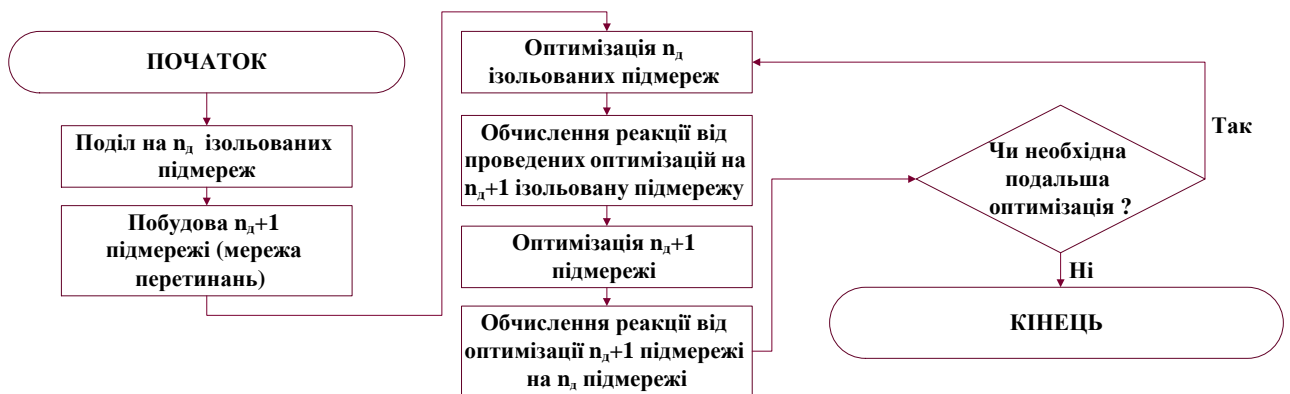


Рис. 2. Блок-схема методу діакоптики за допомогою лінійного програмування на основі транспортної задачі

Представлений алгоритм передбачає, що мережа може бути розділена на n_d незв'язаних підмереж і n_d+1 -шу підмережу (мережа перетинань). Завдання полягає в тому, щоб:

1. вибрати \mathbf{K}_R маршрутів, які можуть бути використані;
2. визначити кількість навантаження, яке має бути відправлено по кожному з обраних маршрутів.

Далі слід інтерпретувати вихідні вирази для задач лінійного програмування для підмереж та мереж перетину.

Кожен цикл оптимізації виконується згідно рис. 2 в такій послідовності:

1. окремо оптимізуються n_d підмереж;
2. обчислюється реакція від проведених оптимізацій на мережу перетинань;
3. окремо оптимізується n_d+1 -ша підмережа (мережі перетинань);
4. обчислюється реакція від оптимізації мережі перетинань на n_d підмереж.

При проведенні кожного з циклів оптимізації, кожен крок виконується так, щоб загальна вартість ймовірності втрат, часових параметрів тощо зменшувалась. Якщо після проведеного циклу не вдалось отримати екстремальне значення вартості, то цикл повторюємо ще раз вже на основі отриманих останніх результатів.

Для мінімізації часових параметрів телекомунікаційної мережі можна використати формулу Літла (2), яку представляємо у вигляді:

$$T = \mathbf{N}^B \mathbf{L}^{B-1} + \mathbf{N}^G \mathbf{L}^{G-1} = \mathbf{M} \mathbf{N}^B + \mathbf{N}^G \mathbf{L}^{G-1}, \quad (6)$$

де \mathbf{N}^G та \mathbf{N}^B – навантаження на гілках та вузлах в мережі, \mathbf{L}^{G-1} та \mathbf{L}^{B-1} – час затримки одиничного навантаження на гілках та вузлах в мережі. Тут на всіх вузлах прийнято, що $L^{B-1} = M$ – час затримки одиничного навантаження, який перевищує допустимі вимоги згідно рекомендації ITU-T.

Метод діакоптики полегшує дослідження й аналіз мереж великих розмірів. Зокрема, при зміні стану мережі у першому циклі оптимізації достатньо здійснювати обчислення в підмережі перетинань та в підмережах, де відбулись зміни. Водночас у загальному випадку, без використання методу діакоптики, необхідно постійно здійснювати чисельне обчислення всієї мережі повністю.

Для кожного типу вузла на основі теорії масового обслуговування представлено оцінку середньої кількості пакетів у черзі та розглянуто нижню границю пропускну здатності даних вузлів.

В розділі також представлено модель дослідження просторової анізотропії параметрів кристалофізики за допомогою вказівної поверхні. Представлено направляючі косинуси з урахуванням особливостей поширення світла в одновісних кристалах.

У третьому розділі – «Тензорний аналіз оптичної транспортної мережі» – розглянуто визначення компонент тензора в криволінійній системі координат для телекомунікаційної мережі, проведено дослідження PTN за допомогою методу діакоптики при багатошляховій маршрутизації, а також 3D-аналіз коефіцієнта електромеханічного зв'язку для кристалів LiNbO_3 .

Приведено приклад визначення компонент тензора в криволінійній системі координат для телекомунікаційної мережі, коли метричний тензор отриманий на основі теореми косинусів, де значення векторів вибирається як навантаження заданого вектора. Показано, що згідно запропонованої моделі диференціальної геометрії, метричний тензор не є симетричний і для проведення досліджень його доцільно розкласти на симетричний і антисиметричний тензори.

Набула подальшого розвитку тензорна модель багатошляхової маршрутизації у РТН для випадку використання двостороннього зв'язку між транзитними вузлами шляхом оцінювання необхідності врахування напряму передавання інформаційних потоків у мережній структурі.

Для прикладу розглянуто мережу між вузлом-джерелом та вузлом-адресатом (рис. 3(а)). З рис. 3(б) отримано матриці переходу C_{Π} та A_{Π} , від системи координат гілок ($\Gamma 1$ - $\Gamma 7$) мережі до системи координат незалежних контурів і пар вузлів у вигляді ($K1$ - $K3$ і $ПВ1$ – $ПВ5$):

$$A_{\Pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad C_{\Pi} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де A_{Π} і C_{Π} - відповідають коваріантному і контрваріантному перетворенням, відповідно. Якщо після проведених обчислень виявиться, що навантаження на гілці $\Gamma 4$ або $\Gamma 8$ є від'ємним, то відповідну гілку не потрібно враховувати. Тобто можливі випадки, коли необхідно знехтувати у приведеному прикладі, рис. 3б, $\Gamma 4$, $\Gamma 8$ або $\Gamma 4$ і $\Gamma 8$ одночасно. Отже, не завжди доцільно здійснювати зв'язок між існуючими транзитними вузлами.

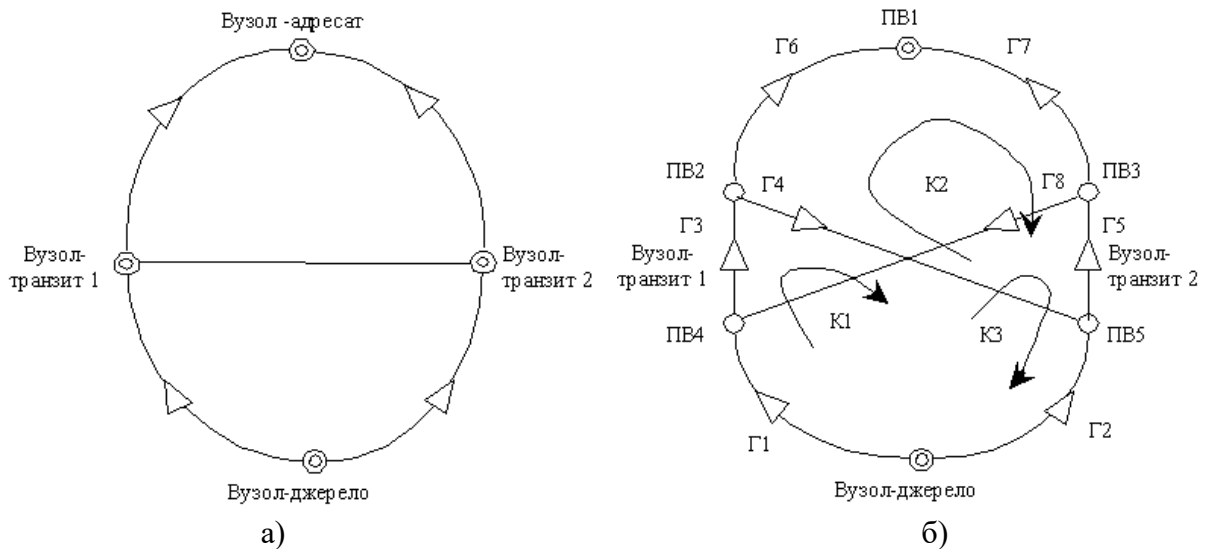


Рис. 3. Схема телекомунікаційної мережі: а) між вузлом-джерелом та вузлом-адресатом; б) вибір координатних шляхів

Представлена тензорна модель є складнішою, але проведене дослідження показало, що врахування особливостей двохстороннього зв'язку між транзитними вузлами дозволяє зменшити час затримок передачі даних в більшості випадків на 10-30%.

Наведено приклад дослідження РТН при кільцевій топології з перерозподілом навантаження за допомогою методу діакоптики при багатошляховій маршрутизації. Представлено алгоритм дослідження

багатошарової структури транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM.

Проведена апробація методу діакоптики для MPLS мережі між LER (Label Edge Routers – граничний маршрутизатор міток) та LSR (Label Switch Path – шляхи комутації міток) маршрутизаторами шляхом розв’язання транспортної задачі за допомогою лінійного програмування. Здійснено оцінку якості обслуговування за критерієм мінімізації часу затримки з використанням формули Літла у вигляді (6).

В роботі розвинуто 3D-аналіз коефіцієнта електромеханічного зв’язку. Вперше побудовано вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв’язку (рис. 4). Визначено максимальні значення для побудованих поверхонь: для поздовжньої поляризації $k_m=0.5$ ($q_a=3$), для поперечних поляризацій з «меншою» швидкістю $k_m=0.25$ ($q_a=1$), а з «більшою» швидкістю $k_m=0.68$ ($q_a=2$). Аналізуючи поверхні для поперечних поляризацій, виявляємо різкі зміни значень (рис. 4), що можна пояснити наявністю акустичних осей. З рис. 4 г бачимо, що коефіцієнт електромеханічного зв’язку для $q_a=1$ є значно меншим, ніж для $q_a=2$ і $q_a=3$, які є співрозмірними для кристалів LiNbO_3 .

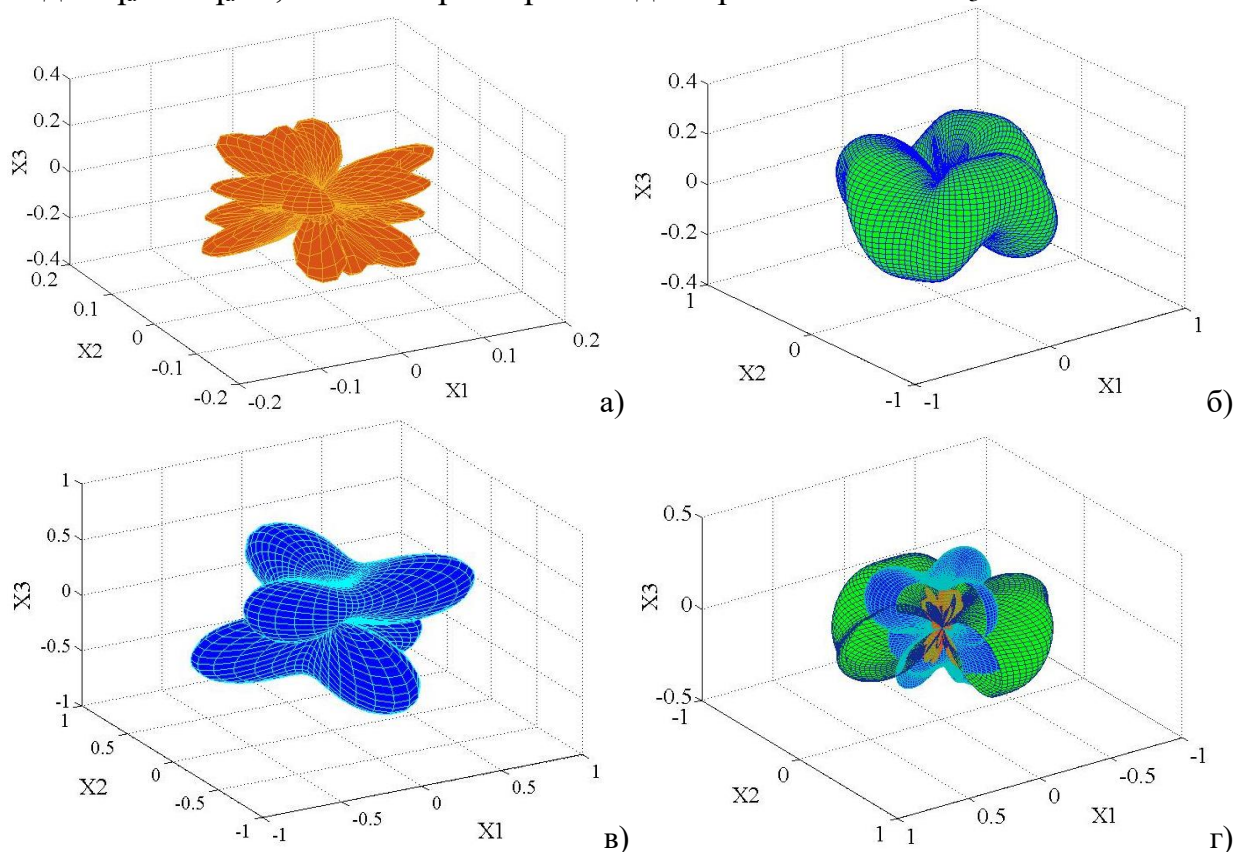


Рис. 4. Вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв’язку для кристалів LiNbO_3 : а) $q_a=1$; б) $q_a=2$; в) $q_a=3$; г) $q_a=1, 2$ і 3 з частковим перерізом

Визначено зрізи енергоєфективного використання кристалів LiNbO_3 для акустичних пристроїв. Для поздовжньої поляризації найбільш ефективним є напрям, який на практиці використовується. Для поперечної хвилі встановлено можливість зменшити енергетичне споживання п’єзоперетворювача на 3%.

Отримані результати показали необхідність у проведенні 3D-аналізу коефіцієнта електромеханічного зв'язку і для інших п'єзоелектричних матеріалів.

Проаналізовано можливості використання фотонних кристалів в OTN при АО взаємодії. Отримані результати показують, що параметри АО якості M_2 залежать від частки використаних однорідних кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$.

У четвертому розділі – «**Моделювання та оцінка енергоефективності оптичної транспортної мережі**» – проведено дослідження параметрів енергоефективності OTN з урахуванням фізичних компонентів, активного та пасивного обладнання і передачі даних на каналному рівні з використанням різних транспортних технологій.

Описано загальний підхід визначення параметру енергоефективності для OTN, який дозволив встановити, що ключовим підходом для зменшення енергетичного споживання є уникнення проміжного оптоелектронного перетворення, що дає змогу зекономити до 63% електроенергії. На основі даного підходу вдосконалено математичну модель, яка дозволяє визначити параметр енергоефективності для OTN. Зокрема, загальне енергоспоживання мережі при передачі даних визначається за допомогою:

$$P_{p.c.} = M_{\text{бл}}(2 P_{\text{Edge}} + N_{\text{еф}} P_{\text{O}} + K_{\text{еф}} P_{\text{E}} + P_{\text{ROE}} + P_{\text{d_time}}) + P_{\text{transp}}, \quad (8)$$

де P_{Edge} – споживання електроенергії на граничному вузлі, P_{O} і P_{E} – енергоспоживання проміжних вузлів без і з проміжним оптоелектронним перетворенням, відповідно, $N_{\text{еф}}$ і $K_{\text{еф}}$ – кількість вузлів без і з проміжним оптоелектронним перетворенням, $M_{\text{бл}}$ – кількість блоків даних, P_{ROE} – витрата електроенергії на регенераційне обладнання.

При визначенні $P_{p.c.}$ в (8) вперше враховуються параметри: P_{transp} – витрата електроенергії на відкриття наскрізних каналів, $P_{\text{d_time}}$ – потужність, яка витрачається при роботі обладнання в режимі холостого ходу. На основі даної математичної моделі розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє визначити значення енергоефективності при різних робочих параметрах мережі.

На основі отриманих автором результатів для коефіцієнта електромеханічного зв'язку при поперечній акустичній поляризації кристалу LiNbO_3 визначено енергоефективність АО комутатора. Результати досліджень показали, що при рекомендованій енергоефективній орієнтації зразка зменшується енергетичне споживання АО комутатора на 5,17 %.

Проведено дослідження параметру енергоефективності в залежності від зміни швидкості передачі даних, яке показало, що збільшення швидкості передачі даних призводить до більш раціонального використання енергоресурсів, але спостерігається зростання енергетичного споживання пристроїв мережі.

Визначено, що при використанні зрізу зразка, який відповідає максимальному значенню ЕО коефіцієнта, відбувається зменшення енергетичного споживання ЕО модулятора на 4,8 %, коли швидкість передачі даних становить 100 Гбіт/с (табл. 1).

Таблиця 1.

Енергетичне споживання елементів EO модулятора та АО комутатора при різних швидкостях передачі

Швидкість, Гбіт/с	$r_{ij}=32,2 \cdot 10^{-12}$ м/В	$r_{ij}=39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В	$M_2=7 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг	$M_2=15,9 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг
	Енергетичне споживання EO модулятора, Вт		Енергетичне споживання АО комутатора, Вт	
10	24,5	22,3	306,3	222,1
100	57,4	54,6	436,2	352,4

Аналогічні дослідження проведені для АО комутаторів, зокрема коли швидкість передачі даних 100 Гбіт/с, виявлено, що:

- при використанні орієнтації кристалів LiNbO_3 , які відповідають максимальному значенню коефіцієнта АО якості, це приводить до зменшення енергетичного споживання на 20 %, (див. табл. 1);

- використання наскрізних каналів передачі даних дозволяє зменшити енергетичне споживання на 10,7 %, а для зрізу кристалу, що відповідає максимальному значенню коефіцієнта АО якості, енергетичне споживання комутатора зменшується на 27,8 %;

- збільшення в два рази кількості вхідних/вихідних портів АО комутатора призводить до збільшення енергетичного споживання на 88%.

Визначено і оцінено параметр енергоефективності мережі, ймовірність відмови та час експлуатації модуляторів при збільшенні пропускної здатності мережі шляхом переходу до вищих порядків модуляцій. Зокрема, перехід від PM-QPSK (100Гбіт/с) до PM-16QAM (400Гбіт/с) модуляторів дозволяє зменшити параметр енергоефективності на 42%. Проте ймовірність відмови PM-16QAM модулятора є в чотири рази вищою, порівняно з PM-QPSK модулятором. Аналіз отриманих результатів разом з економічним фактором показав, що PM-QPSK модулятор є кращим рішенням на даний момент для PTN.

Для зменшення енергетичного споживання оптичного лінійного тракту і зменшення ймовірності його відмови рекомендується використання EDFA підсилювачів на базі ФКВ. Таке рішення дозволяє зменшити енергетичне споживання оптичного лінійного тракту на 9,5% по відношенню до тракту із звичайними EDFA, забезпечуючи при цьому зменшення ймовірності їх відмови в 1,6 разів.

Досліджено вплив використання технології об'єднання міток (Link Bundling) в мережі GMPLS на енергетичне споживання OTN. Встановлено, що для LSP (Label Switch Path – шляхи комутації міток) при збільшенні від чотирьох до сорока кількості проміжних вузлів енергетичне споживання зросло в 2,52 рази. Встановлено, що нерівномірний розподіл навантаження між каналами може призвести до зростання енергоспоживання мережі в 2,78 рази. Рекомендовано здійснювати агрегацію LSPs з використанням механізму GMPLS Link Bundling, коли навантаження оптичної несучої становить не

менше 45 %, оскільки нерівномірний розподіл навантаження між каналами може призвести до зростання енергоспоживання мережі.

Визначено і оцінено параметр енергоефективності при здійсненні комутації різних об'єктів (пакетів, часових блоків, хвиль) з використанням GMPLS. Встановлено, що при комутації хвиль для обслуговування сорока вузлів LSP витрачається в 2,33 рази менше електроенергії, ніж при комутації часових блоків, і в 10,1 разів менше – у порівнянні з комутацією пакетів. Встановлено, що при коротких LSPs параметр енергоефективності є майже однаковим для досліджуваних видів комутації. У випадку, коли кількість проміжних вузлів для LSP більше семи – доцільно здійснювати комутацію блоків і хвиль (рис. 5).

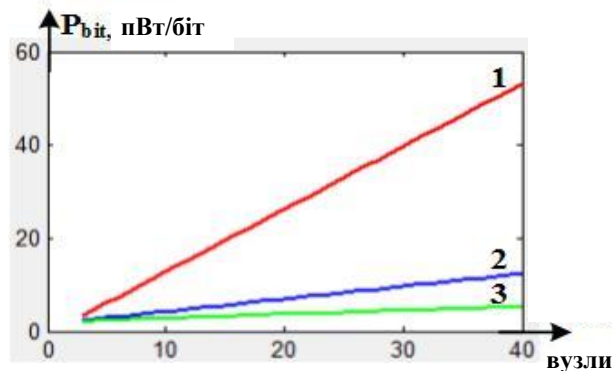


Рис. 5. Параметр енергоефективності мережі для трьох LSPs при здійсненні комутації на: 1 – обладнанні мережевого рівня (MPLS комутація); 2 – обладнанні каналного рівня (комутація часових блоків); 3 – обладнанні DWDM рівня (комутація хвиль)

У п'ятому розділі – «Дослідження топологічних властивостей фотонних транспортних мереж з використанням теорії випадкових графів» – приведено оцінювання топологічних структур PTN з використанням моделей випадкового графа, що проводилось шляхом визначення залежності середньої довжини шляху та коефіцієнта кластеризації від кількості вузлів та ймовірності їх з'єднання в мережі. В розділі також проведено аналіз завантаженості PTN за допомогою досліджень відносної працездатності кількості вузлів та гілок на основі моделей випадкового графу та теорії перколяції.

В результаті проведених досліджень в рамках моделі Уотса-Строгатса рекомендовано для PTN з каскадно-кільцевою топологічною структурою ступінь зв'язності вузла забезпечувати на рівні не менше трьох, що дозволяє зменшити кількість транзитних вузлів при передачі даних. Визначено, що коефіцієнт кластеризації C суттєво не змінюється від ступеня зв'язності з близькими вузлами K (рис. 6), тоді як зі збільшенням ймовірності з'єднання p коефіцієнт кластеризації має спадний характер (рис. 7). На основі отриманих результатів впливає, що згідно моделі Уотса-Строгатса при збільшенні кількості вузлів в PTN збільшується середня довжина шляху. Водночас при збільшенні ймовірності зв'язку між вузлами p коефіцієнт кластеризації і

середня довжина шляху зменшуються. Це можна пояснити тим, що зі зростанням p збільшується зв'язність між вузлами.

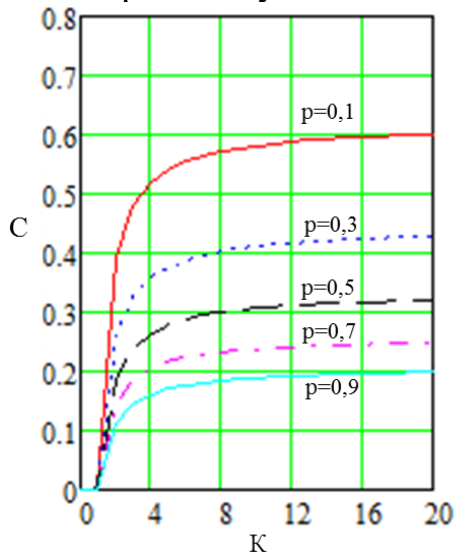


Рис. 6. Залежність коефіцієнта кластеризації від K

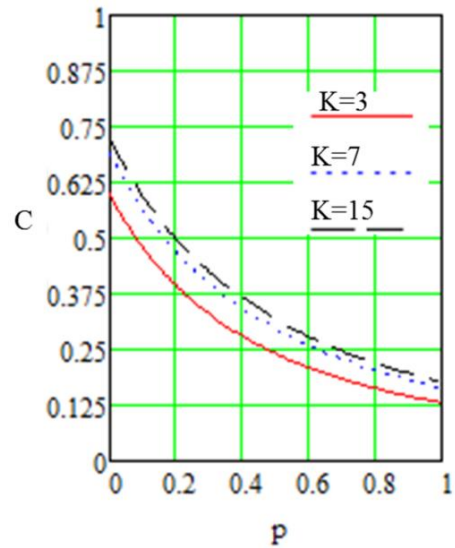


Рис. 7. Залежність коефіцієнта кластеризації від параметра p

В моделі Барабаші-Альберта при систематичній появі нових вузлів середній шлях зростає, а коефіцієнт кластеризації спадає, що пояснюється зростанням кількості вузлів i , відповідно, зменшенням середньої зв'язності. Визначено, що коефіцієнт кластеризації у мережах згідно моделі Барабаші-Альберта має спадний характер, причому при великій кількості вузлів суттєво не змінюється, а діаметр випадкового графа зменшується при зростанні кількості вузлів та параметра p , оскільки збільшується середня зв'язність. Згідно моделі узагальнених випадкових графів спостерігається, що при збільшенні середньої зв'язності зростає середній шлях, середня кількість перших та других по близькості сусідів і зменшується коефіцієнт кластеризації.

Проведено аналіз завантаженості РТН за допомогою досліджень відносної працездатності кількості вузлів та гілок на основі моделей випадкового графу. Зокрема у РТН, що відповідає моделі Ердос-Ренеї, розглянуто критичні випадки, коли мережа перебуває в квазіперевантаженому та в недовантаженому станах.

При дослідженні завантаженості РТН за моделями Уотса-Строгатса, Барабаші-Альберта та узагальнених випадкових графів виявлено, що зі збільшенням відносної частини вузлів, що є непрацездатними (q_N), середня довжина шляху зменшується (рис. 8, а). Така тенденція може бути пояснена зростанням кількості ізольованих вузлів. Виявлено, що коефіцієнт кластеризації збільшується із зростанням кількості непрацездатних вузлів. У такому випадку передача між вузлами може здійснюватися на невелику довжину шляху. Встановлено, що графіки залежності відносної частини непрацездатних гілок (q) від середньої довжини шляху (рис. 8, б) та коефіцієнта кластеризації у досліджуваних моделях випадкового графа в діапазоні від 0,1 до 0,9 не змінюються.

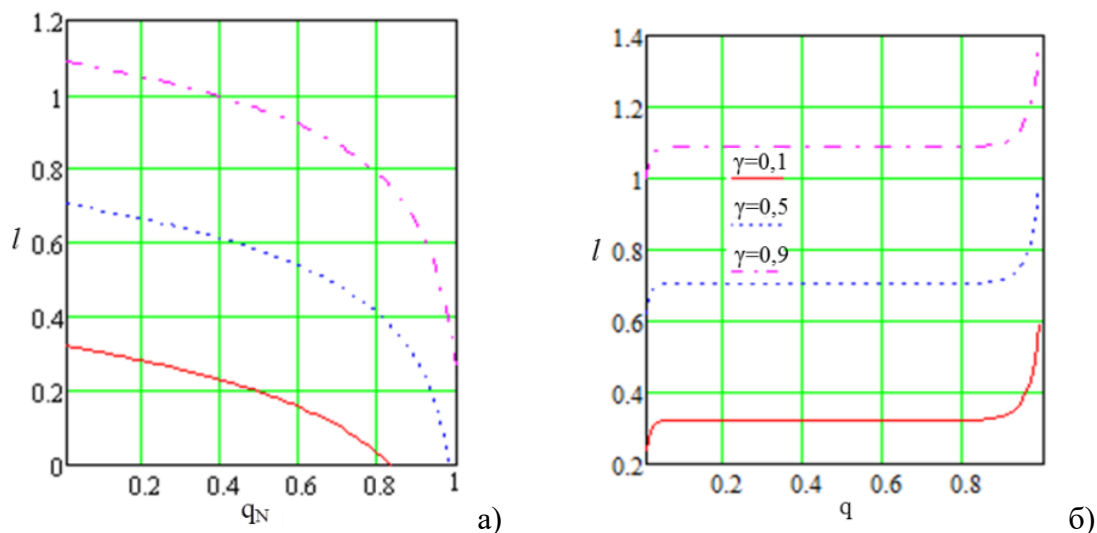


Рис. 8. Залежність середньої довжини шляху від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними згідно моделі узагальнених випадкових графів з розподілом степеневих вершин $k^{-\gamma}$

Запропоновано використання теорії перколяції для контролю і керування навантаженням РТН. Згідно даної теорії, в РТН канали (зв'язна перколяція) або комутаційне з'єднання між різними каналами (позиційна перколяція) є зайнятими в певні моменти часу з ймовірністю p_z або p_{Π} , відповідно. Досліджено виникнення кластерів різних розмірів та кількості, а також появу нескінченного кластера. Встановлено, що при кільцевій топології можливе одночасне існування єдиного чорного та білого кластера, які існують при зникненні зв'язку між деякими парами вузлів (рис. 9).

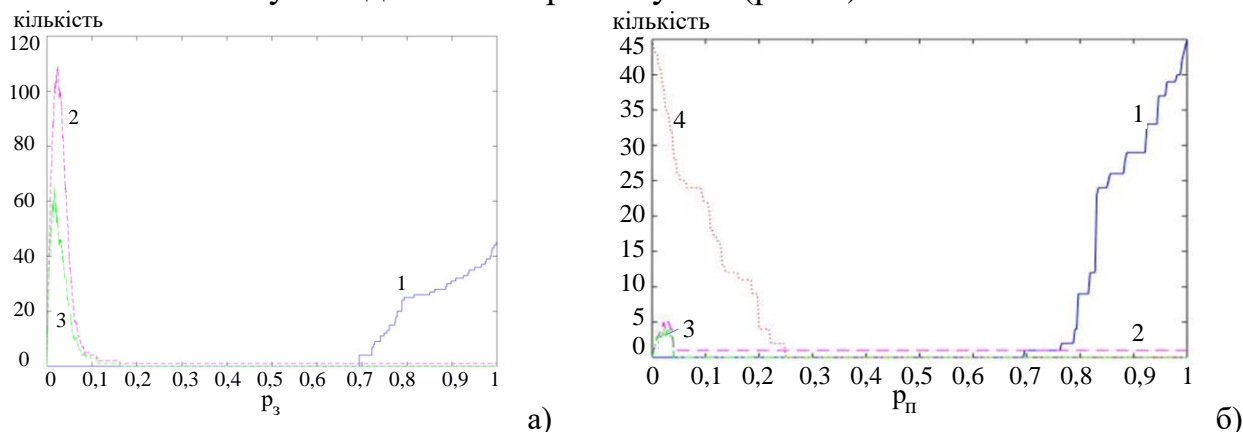


Рис. 9. Залежності кількості: 1) не взаємодіючих кінцевих пар вузлів; 2) кластерів; 3) кластерів з мінімальним розміром, 4) не взаємодіючих кінцевих пар вузлів для білої перколяції від ймовірності при зв'язній (а) та позиційній (б) перколяції (кількість вузлів – 10)

Шостий розділ – «Моделювання та практичні рекомендації використання оптичної комутації блоків у фотонних транспортних мережах» – сформовано підходи до побудови OBS для РТН, за допомогою моделювання проведено аналіз та дослідження ефективності протоколів сигналізації по критерію часових параметрів та ймовірності втрат даних для

технології OBS, а також приведені практичні рекомендації їхнього використання.

Представлена структурна схема оптичного комутатора на основі АО комірки, яка дозволяє комутувати сигнал у двох площинах. Доведено, що відповідна конструкція комутаторів дозволяє більш енергоефективно використовувати пристрої в PTN.

Представлено математичну модель для дослідження та алгоритм функціонування імітаційної моделі OBS в PTN. Визначено, що при використанні протоколів сигналізації JET виникають втрати блоку внаслідок зайнятості існуючих каналів на виході комутатора. В роботі для даного випадку запропоновано використовувати буферизацію. Детально описано можливість буферизації у OBS і розглянуто умови здійснення буферизації. За допомогою моделі випадкового графа визначено, що кількість місць у буфері доцільно обмежити п'ятьма місцями (рис. 10).

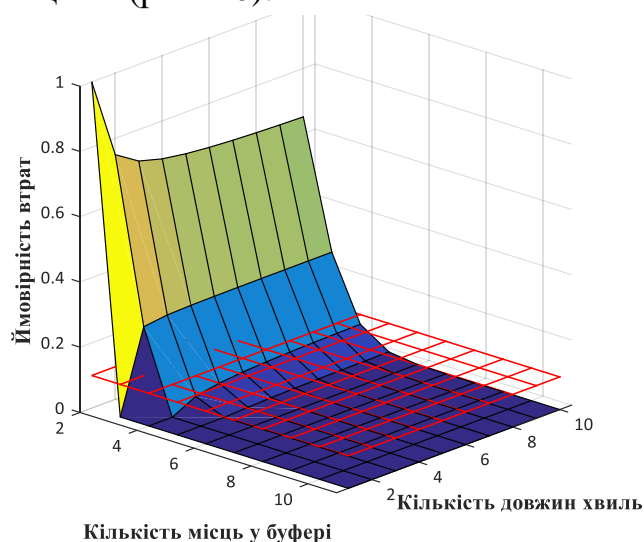


Рис. 10. Ймовірність втрат даних в залежності від кількості довжин хвиль та місць в буфері

Зауважимо, що в OTN найбільш поширеним є використання кільцевої топології. Враховуючи результати проведених у попереднього розділі досліджень, в рамках теорії випадкових графів на основі моделі Уотса-Строгатса, імітаційна модель PTN з використанням OBS мала каскадно-кільцеву топологічну структуру із ступенню зв'язності вузла рівною трьом. Вибір маршрутів передачі даних здійснювався для випадку, коли тензор Рімана є найменшим.

При формуванні максимально завантажених блоків в OBS кількість пакетів становить – 200, ефективно завантажених – 150 пакетів, нормально завантажених – 100 пакетів.

Проведено дослідження завантаження мережі ($\rho = \lambda / \mu$) в залежності від часу обслуговування та втрат для різних протоколів сигналізації OBS. Тривалості обслуговування на вузлах (μ) були вибрані однаковими і постійними, а інтенсивність вхідного навантаження на вузлах (λ) змінювалася в залежності

від дослідженого випадку ρ , тобто залежала від зовнішнього навантаження (коли вузол передає навантаження на інші вузли) і від навантаження, яке проходить через вузол (вузол використовується як транзитний).

Встановлено, що протокол TAW рекомендовано використовувати при максимальному завантаженні пакетів у блоки, коли мережа квазіперенавантажена (рис. 11). Зазначимо, що у випадку, коли місць у буфері немає, то час передачі даних для протоколу сигналізації JET є меншим, ніж для протоколу TAW у 1,6 разів, але необхідно зазначити, що кількість втрачених блоків в такому випадку є майже 99 %. При збільшенні кількості місць у буфері з використанням технології OBS, час для передачі блоку протоколом сигналізації JET зростає, причому кількість втрат зменшується. Для випадків, коли кількість місць у буфері більше п'яти, час передачі даних є однаковим і кількість втрат прямує до нуля. Зазначимо, що отримані результати для технології IP/MPLS/DWDM є гіршими в два рази порівняно із протоколом сигналізації JET при використанні більше чотирьох буферних місць.

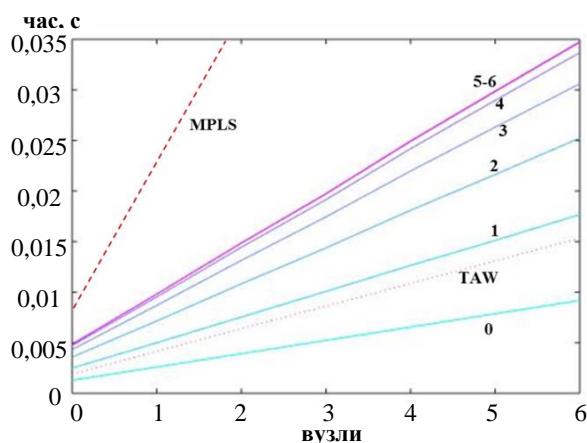


Рис. 11. Залежність часу доставки даних від кількості транзитних вузлів при максимальному завантаженні пакетів у блоках, коли мережа є квазіперенавантажена (числа відповідають кількості місць у буфері при протоколі JET)

Водночас, при ефективному чи нормальному завантаженні пакетів у блоки рекомендовано використовувати протокол сигналізації JET. Наприклад, при ефективному завантаженні пакетів у блок, протокол сигналізації TAW недоцільно використовувати для передачі даних, що представлено на рис. 12, коли $\rho=0,98$. Час передачі даних для протоколу сигналізації JET майже однаковий, коли кількість місць у буфері є більше двох (рис. 12, а), втрати блоків є малими (прямують до нуля), коли кількість місць у буфері є більше чотирьох (рис. 12, б). В розглянутому випадку для технології IP/MPLS/DWDM (з ОЕО перетворенням в OTN) час передачі даних є меншим у 1,4 рази, ніж для протоколу сигналізації TAW.

В роботі проведено дослідження протоколів сигналізації для технології OBS при багатошляховій маршрутизації. На основі отриманих результатів можна стверджувати, що багатошляхову маршрутизацію не доцільно використовувати в технології OBS, коли $\rho > 0,5$.

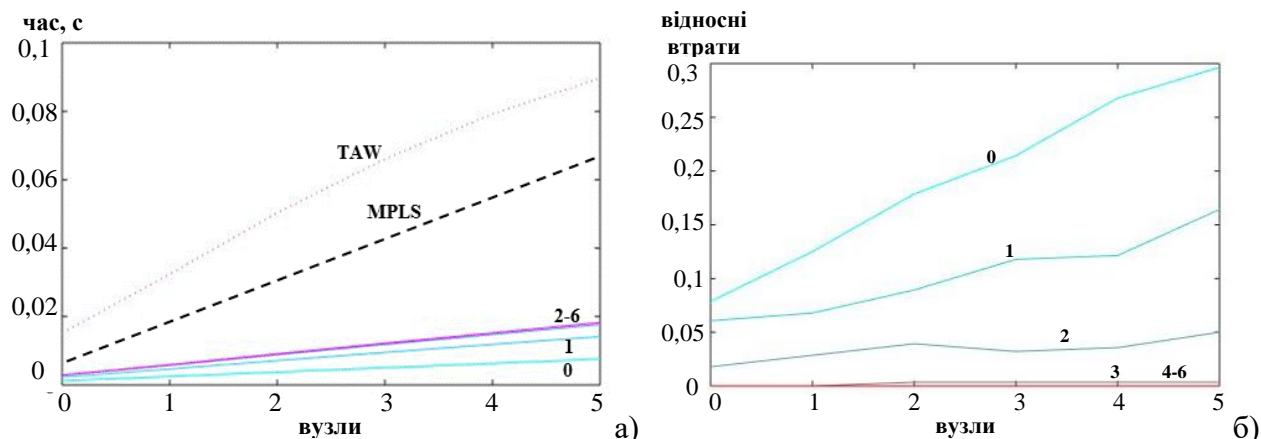


Рис. 12. Залежності часу доставки даних (а) та відносних втрат блоків (б) від кількості транзитних вузлів при ефективному завантаженні пакетів у блоки (числа позначають кількість місць у буфері при протоколі JET)

Проведено дослідження для гібридного протоколу сигналізації INI, який передає дані, як протокол сигналізації JET до певного транзитного вузла (граничний вузол), а потім – як протокол сигналізації TAW.

Досліджено гібридний протокол INI з виділенням оптичних каналів окремо при передачі даних для протоколів JET і TAW. Встановлено, що у даному випадку найбільш ефективно виділяти 30 % каналів для передачі даних згідно протоколу TAW, а іншу кількість каналів надавати для передачі даних протоколом сигналізації JET.

На рис. 13 для протоколу сигналізації INI представлено залежність, коли 30 % каналів виділено при передачі блоків для протоколу сигналізації TAW, а решта для JET, коли $\rho=0,97$. З отриманих результатів видно, що при виділенні певної кількості каналів для протоколів TAW та JET час доставки даних та відносні втрати є співмірними при одночасному використанні цих протоколів (без виділеної кількості каналів).

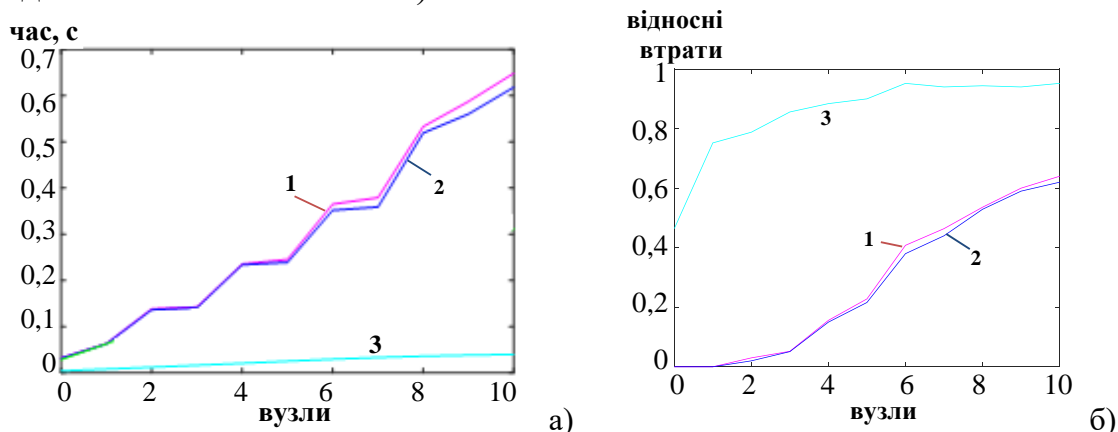


Рис. 13. Графіки залежності кількості транзитних вузлів від: а) часу доставки даних; б) відносних втрат при максимальному завантаженні пакетів у блок при наявності у буфері двох місць: 1) протокол INI, коли всі канали одночасно використовуються протоколами TAW та JET; 2) протокол INI, коли для протоколів TAW та JET виділяється 30 і 70 % кількості каналів, відповідно; 3) тільки протокол JET

В роботі розглянуто можливість використання різних протоколів в залежності від розміру блоків. При ефективному та нормальному завантаженні пакетів у блоки доцільно передавати дані протоколом JET, а при максимальному навантаженні пакетів у блок – протокол сигналізації TAW, коли мережа в квазіперевантаженому стані. Встановлено, що при змінному завантаженні пакетів у блок з використанням різних протоколів сигналізації час затримки є меншим, порівняно з використанням лише протоколів сигналізації JET.

При використанні протоколів JET та INI для уникнення втрат блоків, коли оптичний буфер є переповнений запропоновано надсилати блок на приймач транзитного вузла та здійснювати перетворення сигналу в електричний. На основі результатів моделювання при $\rho=0,98$ час доставки даних не суттєво погіршується для протоколу INI приблизно на 14-19 %, а для JET – на 2-7% (рис. 14), забезпечуючи фактично відсутність втрат блока.

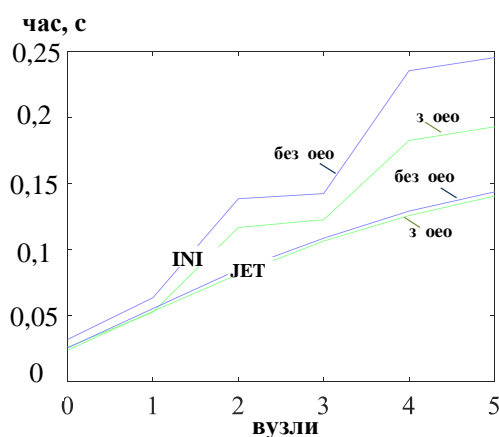


Рис. 14. Залежність часу доставки даних від кількості транзитних вузлів при максимальному завантаженні пакетів у блоки з ОЕО і без ОЕО перетворення для протоколів JET та INI

Також проведено дослідження протоколів сигналізації OBS за допомогою теорії перколяції. Аналіз результатів для протоколу INI показав, що час доставки збільшується при ймовірності зайнятості комутаційного з'єднання між різними каналами (ймовірність завантаженості комутаторів) від 0,8 і вище (рис. 15, а). З рис. 15, б випливає, що протокол INI при двох місцях у буфері здійснює ефективну передачу даних, коли кількість транзитних вузлів є менше трьох, а при більшій їх кількості ймовірність зайнятості комутаційного з'єднання між різними каналами має бути $p_n < 0,15$. Встановлено, що для протоколу JET час передачі блоків є кращим, порівняно з протоколом INI, але водночас втрати при передачі блоків є більшими.

Визначено параметр енергоефективності для протоколів JET і TAW. Показано, що при збільшенні кількості пакетів в блоці параметр енергоефективності OBS комутатора зменшується. Встановлено, що для блоків, які містять менше 100 пакетів, протокол сигналізації JET є більш енергоефективним, а при збільшенні їх розміру – кращим на 30,4 % є протокол

ТАW (див. табл. 2). Це пов'язано з тим, що протокол сигналізації ТАW більше часу використовується в режимі холостого ходу.

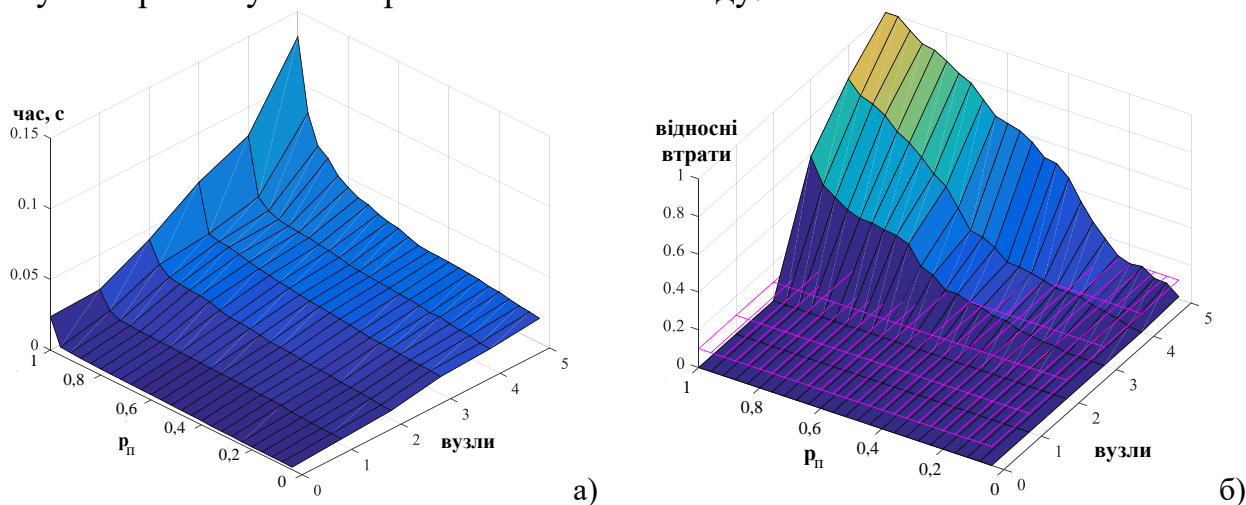


Рис. 15. Діаграми залежності часу доставки даних (а) та відносних втрат (б) від кількості транзитних вузлів та ймовірності завантаженості комутаторів при максимальному завантаженні пакетів у блоки для протоколу ІNІ

Таблиця 2.

Результати моделювання параметру енергоефективності для OBS комутатора

Протокол/кількість пакетів на блоків	Параметр енергоефективності пВт/біт			
	10 пакетів	100 пакетів	150 пакетів	200 пакетів
ТАW	0,563	0,213	0,167	0,132
JET	0,491	0,306	0,248	0,185

У **висновках** дисертаційної роботи стисло викладено основні результати і висновки з проведених досліджень, наведено особливості впровадження та розвитку теоретичних моделей, кількісну оцінку ефективного використання РТN з мінімізацією часу та втрат передачі даних, зі споживанням енергетичних ресурсів.

У **додатках** до дисертації долучено акти впровадження результатів дисертаційної роботи, а також список наукових праць і апробацій автора за темою дисертації.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову проблему підвищення ефективності РТN із забезпеченням мінімізації енергоспоживання, часових параметрів та ймовірності втрат даних.

Основні результати роботи полягають у наступному:

1. В роботі проведено системний аналіз сучасного стану і розвитку РТN. Вказано на необхідність впровадження математичних підходів, які дозволяють визначити ефективність використовуваних моделей, методик, алгоритмів в досліджуваних РТN. Результати проведеного аналізу підтверджують актуальність подальшого дослідження РТN з пошуком шляхів мінімізації

часових параметрів та ймовірності втрат даних та витрат енергоресурсів використуваних пристроїв.

2. Запропоновано тензорну модель для аналізу стану телекомунікаційної мережі з використанням диференціальної геометрії, що дозволяє визначати оптимальний розподіл трафіку за критеріями мінімізації його часових параметрів та показників втрат при передаванні даних у PTN. За допомогою коваріантного диференціювання описано можливість врахування зміни стану на основі символу Крістофеля, який характеризує вплив кожної компоненти мережі одна на одну. Встановлено, що метричний тензор не є симетричним і для проведення досліджень його необхідно розкласти на симетричний і антисиметричний тензори. Показано, що для зменшення втрат в телекомунікаційній мережі необхідно, щоб простір на основі отриманого симетричного метричного тензора був евклідовим.

3. Удосконалена тензорна модель багатошляхової маршрутизації у PTN для випадку використання двостороннього зв'язку між транзитними вузлами на основі оцінювання необхідності врахування наряду передавання інформаційних потоків у мережній структурі, що приводить до ефективного розподілу навантаження в мережі та зменшення часу затримок сигналу між вузлами на 10-30 %.

4. Запропоновано метод діакоптики для розв'язання транспортної задачі засобами лінійного програмування, що дозволяє провести аналіз часових параметрів для телекомунікаційних мереж великих розмірів з багатошляховою маршрутизацією та проведено його апробацію для MPLS мережі здійсненням оцінки якості обслуговування за критерієм часу затримки. Наведено приклад для дослідження PTN при кільцевій топології з перерозподілом навантаження за допомогою методу діакоптики при багатошляховій маршрутизації, що дозволило провести в подальшому моделювання мережі на основі технології OBS.

5. Вдосконалено модель дослідження просторової анізотропії коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Вперше побудовано вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку та визначено їх максимальні значення. Визначено орієнтацію кристалів LiNbO_3 як п'єзоперетворювача для поперечної акустичної поляризації, що дозволяє зменшити енергетичне споживання АО комутатора на 3 %.

6. Удосконалено математичну модель визначення параметру енергоефективності для OTN, яка, на відміну від існуючих моделей, враховує споживання електроенергії на відкриття наскрізних каналів та потужності, які витрачаються мережним обладнанням в режимі холостого ходу. Встановлено, що уникнення проміжного оптоелектронного перетворення в OTN приводить до економії 63% електроенергії. На основі проведених досліджень енергоефективності PTN, коли швидкість передачі даних становить 100 Гбіт/с визначено, що використання орієнтацій кристалів LiNbO_3 , які відповідають максимальним значенням ЕО коефіцієнта та коефіцієнта АО якості приводить до зменшення енергетичного споживання ЕО модулятора та АО комутатора на

4,8 % та 20 %, відповідно. Встановлено, що при збільшенні в два рази кількості вхідних/вихідних портів АО комутатора за швидкості передачі даних 100 Гбіт/с енергетичне споживання зростає на 88 %.

7. Встановлено, що збільшення швидкості передачі даних призводить до більш раціонального використання енергоресурсів, але спостерігається зростання енергетичного споживання пристроїв мережі. В результаті досліджень параметру енергоефективності визначено, що перехід від PM-QPSK (100 Гбіт/с) до PM-16QAM (400 Гбіт/с) модуляторів приводить до його зменшення на 42 %. Водночас встановлено, що на основі отриманих результатів, ймовірність відмови PM-16QAM модулятора в чотири рази вища, порівняно з PM-QPSK модулятором. Для зменшення енергетичного споживання оптичного лінійного тракту та його ймовірності відмови запропоновано використання EDFA на базі ФКВ. Запропоноване рішення дозволяє зменшити енергетичне споживання тракту на 9,5 % по відношенню до тракту зі звичайними EDFA.

8. Встановлено, що нерівномірний розподіл навантаження в мережі GMPLS між каналами може призвести до зростання енергоспоживання мережі. Виявлено, що необхідно здійснювати агрегацію LSPs з використанням механізму GMPLS Link Bundling, коли навантаження оптичної несучої становить не менше 45 %. Визначено і оцінено параметр енергоефективності при здійсненні комутації різних об'єктів (пакетів, часових блоків, хвиль) з використанням GMPLS, та встановлено, що при комутації хвиль на обслуговування LSP витрачається в 2,33 рази менше електроенергії порівняно з комутацією часових блоків і в 10,1 рази менше, ніж при комутації пакетів.

9. На основі запропонованої моделі дослідження PTN з використанням теорії випадкового графа здійснено оцінку ефективного використання різних топологічних структур мереж в залежності від їх завантаженості. В рамках моделі Уотса-Строгатса визначено, що кожний вузол необхідно з'єднувати як мінімум із трьома іншими вузлами для PTN, що дозволяє зменшити кількість транзитних вузлів. При дослідженні завантаженості PTN за моделями Уотса-Строгатса, Барабаші-Альберта та узагальнених випадкових графів виявлено, що зі збільшенням відносної частини вузлів, що є непрацездатними, середня довжина шляху зменшується, оскільки зростає кількість ізольованих вузлів.

10. Сформульовано концепцію побудови комутаційних вузлів OBS та представлено структурну схему оптичного комутатора на основі АО комірки. Для ефективного використання протоколів сигналізації JET запропоновано використовувати буферизацію та за допомогою моделі випадкового графа визначено, що розмір буферів може бути обмеженим п'ятьма місцями.

11. На основі впровадженої теорії позиційної перколяції встановлено, що при кільцевій топології PTN можливе одночасне існування єдиного чорного та білого кластера, які також існують при зникненні зв'язку між деякими парами вузлів. За допомогою теорії перколяції проведено аналіз ефективного використання протоколів OBS, що дозволило визначити сприятливі умови передачі даних у залежності від ймовірності зайнятості з'єднань для різної

кількості транзитних вузлів. Встановлено, що для протоколу сигналізації JET час передачі блоків є кращим порівняно з протоколом INI, але водночас втрати при передачі блоків є більшими. Показано, що протокол INI при двох місцях у буфері здійснює ефективну передачу даних, коли кількість транзитних вузлів є менше трьох, а при більшій їх кількості ймовірність зайнятості комутаційного з'єднання між різними каналами має бути $p_n < 0,15$.

12. В результаті проведеного моделювання технології OBS в PTN рекомендується протокол сигналізації TAW використовувати при максимальному завантаженні пакетів у блоки, коли мережа є квазіперенавантажена. При ефективному чи нормальному завантаженні пакетів у блоки, а також при максимальному завантаженні пакетів у блоки, коли завантаження мережі $\rho < 0,98$, рекомендується використовувати протокол сигналізації JET. При передачі даних з використанням протоколів сигналізації JET та INI, коли оптичний буфер є переповнений, запропоновано надсилати блок на приймач транзитного вузла, що призводить до незначного збільшення часу доставки даних, при цьому втрата блоків є мінімальною. Показано, що при збільшенні кількості пакетів в блоці параметр енергоефективності OBS комутатора покращується. Встановлено, що для блоків, які містять менше 100 пакетів, протокол сигналізації JET є більш енергоефективним, а при збільшенні їх розміру – кращим на 30,4 % є протокол TAW.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії:

1. Климаш М.М. Теоретичні основи телекомунікаційних мереж / М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан - Львів: Укр. акад. друк., 2011. - 496 с.

2. Климаш М.М. Теоретические основы телекоммуникационных сетей: монографія / М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 644 с.

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

3. Klymash M. Performance analysis of optical burst switching networks for different signaling protocols / M. Klymash, M. Kaidan, S. Dumych // Smart Computing Review, 2015. – V. 5, №5. - P. 378-387.

4. Maksymyuk T. Study and Development of Next-Generation Optical Networks / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Kaidan, B. Strykhalyuk // Smart Computing Review, 2014. – V. 4, №6.- P. 470-480.

5. 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 НУ “Львівська політехніка”. Радіoeлектроніка та телекомунікації, Львів, 2014. – № 796. - С. 147–156.

6. Kaidan M.V. The indicative surfaces of photoelastic effect for Cs_2HgCl_4 biaxial crystals / M.V. Kaidan, B.V. Tybinka, A.V. Zadorozhna, W. Schranz, B. Sahraoui, A.S. Andrushchak, A. Kityk // *Optical Material.*-2007.-V.29.-P.475-480.

7. Andrushchak A.S. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect for crystal materials: II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization in LiNbO_3 / A.S. Andrushchak, B.G. Mytsyk, N.M. Demyanyshyn, M.V. Kaidan, O.V. Yurkevych, S.S. Dumych, A.V. Kityk, W. Schranz // *Optics & Lasers in Engineering.*– 2009.–V.47, N.1. – P.24-30.

8. Andrushchak A.S. Spatial anisotropy of the acoustooptical efficiency in lithium niobate crystals / A.S. Andrushchak, E.M. Chernyhivsky, Z.Yu. Gotra, M.V. Kaidan, A.V. Kityk, N.A. Andrushchak, T.A. Maksymyuk, B.G. Mytsyk, W. Schranz // *J. Applied Physics.* – 2010. – V.108. – P.103118(1-5).

9. Andrushchak A.S. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect in crystal materials: I. Experimental determination of electro-optic tensor in LiNbO_3 by means of interferometric technique / A.S. Andrushchak, B.G. Mytsyk, N.M. Demyanyshyn, M.V. Kaidan, O.V. Yurkevych, I.M. Solskii, A.V. Kityk, W. Schranz // *Optics & Lasers in Engineering.*– 2009.–V.47, N.1. – P.31-38.

10. Kaidan M. Model for determination the energy efficiency of all-optical transport networks / M. Kaidan, V. Andrushchak, M. Klymash // *Smart Computing Rewiev.* - 2016. - Vol.6. - N.4. - P. 34-44.

11. Кайдан М.В. Аналіз енергетичного балансу оптичної транспортної мережі з врахуванням технологічних і архітектурних підходів /М.В. Кайдан, В.С. Андрущак // Вісник НУ “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації . – 2015. – №818. – С. 120-129.

12. Кайдан М.В. Визначення енергоефективності акустичних пристроїв в оптичній транспортній мережі за допомогою 3D-аналізу коефіцієнта електромеханічного зв'язку/ М.В. Кайдан //Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації . – 2016. – №846.- С.185-193.

13. Кайдан М.В. Визначення параметру енергоефективності оптичних транспортних мереж / М.В. Кайдан, В.С. Андрущак // Системи обробки інформації. – 2016. – № 7 (144). – С. 134-142.

14. Климаш М.М. Оптимізація багат шарової структури транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM за допомогою методу діакоптики / М.М. Климаш, М.В. Кайдан, М.І. Бешлей, А.В. Редька // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2015. – №3(37) – С. 32-42.

15. Кайдан М. В. Тензорна модель системи зв'язку фотонної транспортної мережі / М.В. Кайдан, М.М. Климаш // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №3(31). – С. 10-13.

16. Климаш М.М. Дослідження порядків модуляції для підвищення енергоефективності телекомунікаційних систем передачі / М.М. Климаш, М.В. Кайдан, В.С. Андрущак // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2016. – №2(42). - С.12-15.

17. Kaidan M.V. Configuration of network management for energy efficiency in optical transport networks using GMPLS and OBS techniques / M.V. Kaidan, V.S. Andrushchak, N.I. Kryvinska, M.M. Klymash, M.O. Seliuchenko // Simulation Modelling Practice and Theory -2017. -№74. - P.17–27.

18. Klymash M. Traffic routing in telecommunication nets and its diakoptics representation / M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan, I. Demydov // Computational Problems of Electrical Engineering. –2011. - №1(1). – P.15-19.

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

Статті у періодичних фахових виданнях, що входять до переліку МОН України:

20. Стрихалюк Б.М. Тензорне подання топологічних структур тороїдальних мереж/ Б.М. Стрихалюк, М.М. Климаш, М.В. Кайдан // Вісник НУ “Львівська політехніка” Радіоелектроніка та телекомунікації.- 2008. - №618. - С.138-144.

21. Тимченко О.В. Визначення структурних характеристик тороїдальних мереж/ О.В. Тимченко, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // Моделювання та інформаційні технології Збірник наукових праць ІПМЕ НАН України. - Вип. 45. – К.: 2008. – С. 203-210.

22. Стрихалюк Б.М. Модель багатовимірної мережі FGN/ Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // Збірник наукових праць “Моделювання та інформаційні технології”. – Київ, 2009.- Випуск 54.- С.212-217.

23. Климаш М.М. Використання інваріантності тензора для моделювання телекомунікаційних мереж / М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // Збірник наукових праць “Моделювання та інформаційні технології”. – Київ, 2008. – Вип.49. – С.72-79.

24. Климаш М.М. Тензорний аналіз переходу транспортної мережі в NGN/ М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // Комп’ютерні технології друкарства збірник наукових праць. –Львів, 2009.- №21. – С.126-139.

25. Климаш М.М. Тензорна модель характеристик мультисервісного трафіку в NGN мережах/ М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // Комп’ютерні технології друкарства збірник наукових праць.- 2010 - №23. – С.79-88.

26. Климаш М.М. Тензорне подання алгоритмів маршрутизації / М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // Зв'язок - 2010.- №1. – С.33-35.

27. Стрихалюк Б.М. Використання незвідних представлень для аналізу К-шляхової маршрутизації /Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан, Р.С. Колодій, О.В. Тимченко // Збірник наукових праць. НАН України, Інституту проблем моделювання в енергетиці. – К., 2010. – Вип. 56. – С.224-230.

28. Климаш М.М. Модель оптимізації багатошарових структур телекомунікаційних мереж за допомогою лінійного програмування методом діакоптики / М.М. Климаш, М.В. Кайдан, М.І. Бешлей, А.І. Редька //

Комп'ютерні технології друкарства збірник наукових праць. – Львів, 2014.- №32 – С.59 -68.

29. Андрущак А.С. Підвищення ефективності акустооптичних модуляторів світла як основної компоненти оптичних комунікаційних мереж / А.С. Андрущак, Б.Г. Мицик, І.П. Островський, М.В. Кайдан, Г.П. Лаба, І.Б. Чайковський, Н.М. Дем'янишин // Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є.Пухова. – 2006. – Вип. 35. – С. 171-177.

30. Андрущак А.С. Заповнення матриць лінійного електрооптичного ефекту в кристалах довільного класу симетрії. Апробація методу на прикладі кристалів ніобату літію / А.С. Андрущак, Б.Г. Мицик, Н.М. Дем'янишин, М.В. Кайдан, О.В. Юркевич // Вісник НУ “Львівська політехніка” Електроніка.- 2007. - №592. - С.148-156.

31. Лаба Г.П. Просторова анізотропія електро-, п'єзо- та акусто-оптичного ефектів в кристалічних матеріалах твердотільної електроніки. Апробація на прикладі кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$. Частина II. Заповнення матриць пружних та п'єзоелектричних коефіцієнтів кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ / Г.П. Лаба, О.В. Юркевич, І.Д. Карбовник, М.В. Кайдан, С.С. Думич, І.М. Сольський, А.С. Андрущак // Вісник НУ “Львівська політехніка” Електроніка.-2008. - №619. - С.172-180.

32. Андрущак А.С. Найбільш ефективні акустооптичні модулятори інформаційного сигналу для волоконно-оптичних інфокомунікаційних систем / А.С. Андрущак, М.В. Кайдан М.В., О.В. Юркевич, Б.Г. Мицик, І.М. Сольський // Моделювання та інформаційні технології. Збірник наукових праць Інституту проблем моделювання НАН України. – 2008. – Вип.49. – С. 194-201.

33. Бурий О.А. Новий метод оптимізації геометрії акустооптичної взаємодії в кристалічних матеріалах довільного класу симетрії / О.А. Бурий, Д.М. Винник, М.В. Кайдан, А.С. Андрущак // Вісник НУ “Львівська політехніка”. Електроніка. – 2011. – № 708. – С. 184–194.

34. Дещинський П.Ю. Дослідження впливу перевантаження мережі на живучість пірингової системи / П.Ю. Дещинський, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // Вісник НУ “Львівська політехніка” Радіоелектроніка та телекомунікації – 2012. – № 738. – С. 231-234.

35. Климаш М.М. Тензорна модель телекомунікаційної мережі на основі криволінійної системи координат / М.М. Климаш, М.В. Кайдан, Б.М. Стрихалюк // Телекомунікаційні та інформаційні технології -2016. -№3.- С. 14-21.

36. Климаш М.М. Ефективність протоколів оптичної комутації блоків в транспортній мережі / М.М. Климаш, М.В. Кайдан // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2016 - №3 (43) –С. 5-12.

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

37. Strykhalyuk V. Tensor models for the efficient multipath routing in large-scale communication networks / V. Strykhalyuk, M. Kaidan, M. Klymash,

N. Kryvinska // Emerging Research and Projects Applications Symposium (ERPAS 2010), in conjunction with the iiWAS2010, 8-10 November 2010, Paris, France, ACM ISBN 978-1-4503-0421-4. - P. 816-819.

38. Klymash M. The irreducible represent for analysis of telecommunication networks / M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan, I. Kostyuk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science - Proceeding of the International Conference TCSET'2010, 23-27 February 2010, Lviv-Slavske, Ukraine.– P.147-148.

39. Kaidan M. Topology and structure algorithms designing for photonic transport networks / M. Kaidan, O. Krasko // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science - Proceeding of the XIIth International Conference TCSET 2014, 25 February– 1 March 2014, Lviv-Slavske, Ukraine – P.487-488.

40. Kaidan M. Diacoptic method for multilayer optimization of optical transport network / M. Kaidan, O. Krasko, P. Huskov, A. Redka //XIII International conference “The experience of designing and application of CAD systems in microelectronics-CADSM-2015”, 24-27 February 2015, Lviv-Poljana, Ukraine. – P.87-89.

41. Dymich S. Wavelength routed optical neural networks / S. Dymich, M. Kaidan, B. Strykhaluik, O. Yaremko, O. Melnyk // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science Proceedings of the XI th International Conference TCSET'2012, Lviv – Slavske, 21–24 February, 2012. – P. 246-248.

42. Kajdan M. Optimization for electro- and acousto-optical interactions in low-symmetric anisotropic materials / M. Kajdan, H. Laba, I. Ostrovskij, N. Demyanyshyn, A. Andrushchak, B. Mytsyk // Proceeding of IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDWTW'06), 15-19 September, 2006, Sochi, Russia. – P.179-183.

43. Kaidan M.V. Anisotropy of piezo-, elasto- and acousto-optic properties of $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ crystal / M.V. Kaidan, H.P. Laba, N.M. Demyanyshyn, A.S. Andrushchak, B.G. Mytsyk // Proceedings of the symposium on photonics technologies for 7th framework program, 12-14 October 2006, Wroclaw – P. 396-399.

44. Kaidan M.V. Efficiency increasing of electro- and acousto-optical modulators as main component of optical communication network / M.V. Kaidan, H.P. Laba, N.M. Demyanyshyn, A.S. Andrushchak, B.G. Mytsyk // Proceedings of the symposium on photonics technologies for 7th framework program, 12-14, October 2006, Wroclaw. – P. 562-565.

45. Andrushchak A.S. Optimization technique for piezo- and acousto-optical interactions geometry of light in anisotropic materials for example of pure and MgO-doped lithium niobate crystals / A.S. Andrushchak, I.B. Tchaikovsky, N.M. Demyanyshyn, S.S. Dumych, O.V. Yurkevych, M.V. Kaidan, H.P. Laba, B.G. Mytsyk // Proceeding of the International Conference CADSM'2007, 20-24 February 2007, Lviv-Polyana, Ukraine. – P.18-22.

46. Andrushchak A.S. Method of experimental 3D-analysis of spatial anisotropy of optical parametric effects in crystals/ A.S. Andrushchak, I.P. Ostrovskij, M.B. Kaidan, O.V. Yurkevych, B.G. Mytsyk // SENSOR Conference 2007 Proceedings of 13th International Conference, 22 - 24 May 2007, Nürnberg, Germany – V.2. – P.289-294.

47. Andrushchak A.S. Completed characterization and spatial anisotropy 3D-analysis for electro-, piezo- and acousto-optical effects in crystal materials / A.S. Andrushchak, B.G. Mytsyk, I.M. Solskii, N.M. Demyanyshyn, M.V. Kaidan, H.P. Laba, I.P. Ostrovskij, O.V. Yurkevych // Proceedings of International Conference “CRYSTAL MATERIAL’2007”, 17-20 September, 2007, Kharkiv, Ukraine. – P.82.

48. Andrushchak A.S. Efficiency increasing of electro-, piezo- and acousto-optical interactions of light in anisotropic materials / A.S. Andrushchak, B.G. Mytsyk, N.M. Demyanyshyn, M.V. Kaidan, H.P. Laba, I.P. Ostrovskij, O.V. Yurkevych // Proceedings of International Conference “Functional Materials” ICFM ’ 2007, 1–6 October, 2007, Partenit, Crimea, Ukraine. – P.170.

49. Andrushchak A.S. Design of optimization technique for electro- and acousto-optical interactions of light in crystalline materials / A.S. Andrushchak, B.G. Mytsyk, N.M. Demyanyshyn, M.V. Kaidan, O.V. Yurkevych // Proceeding of 9-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2008), 2-4 October 2008, Alushta, Krimea, Ukraine – P. 66-68.

50. Andrushchak A.S. New computer aided design of most efficient electro- and acousto-optics cells as main component for modern fiber-optic infocommunication systems / A.S. Andrushchak, B.G. Mytsyk, I.M. Solskii, M.V. Kaidan, T.I. Voronyak, N.M. Demyanyshyn, O.V. Yurkevych // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science - Proceeding of the International Conference TCSET’2008, 19-23 February 2008, Lviv-Slavske, Ukraine. – P.392-395.

51. Andrushchak A.S. Application efficiency increasing of $\text{LiNbO}_3\text{:MgO}$ and GaP crystals for acoustooptical high frequency control of powerfull laser irradiation / A.S. Andrushchak, M.V. Kaidan, Je.M. Chernyhivskiy, O.V. Yurkevych, T.A. Maksymyuk, B.G. Mytsyk, A.V. Kityk // Proceeding of 10-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2010). 10-14 September, 2010 Sevastopol, Crimea, Ukraine. -P.172-174.

52. Klymash M. Algorithm of optical transport network modeling based on percolation theory / M. Klymash, M. Kaidan, V. Koval // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science - Proceeding of the XIIIth International Conference TCSET 2016, 23 –26 February, 2016, Lviv-Slavske, Ukraine. – P.674-676.

53. Kaidan M.V. Investigation of energy efficiency in optical transport networks on based technology OBS/ M.V. Kaidan, V.S. Andrushchak // IEEE International Conference on RadioElectronics and InfoCommunications (UkrMiCo’2016), 11-16 September, 2016, Kyiv, Ukraine. – P.338-340.

54. Kaidan M. Research on the efficiency of optical resources utilization for OLS networks/ M. Kaidan, V. Andrushchak, M. Klymash // Third International Scientific-Practical Conference “Problem of infocommunications science and technology (PIC S&T’2016)”, 4-6 October, 2016, Kharkiv, Ukraine. - picst16_10. P.1-3.

55. Kaidan M. Calculation model of energy efficiency in optical transport networks / M. Kaidan, V. Andrushchak, M. Pitsyk //2015 second international scientific-practical conference “Problem of infocommunications science and technology (PIC S&T’2015)”, 13-15 October, 2015, Kharkiv, Ukraine. – P.167-170.

Публікації у матеріалах міжнародних та всеукраїнських конференцій:

56. Кайдан М. Оцінка параметру енергоефективності оптичних транспортних мереж на базі електрооптичних пристроїв / М. Кайдан, В. Андрущак // Десята міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми телекомунікацій” і Восьма міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та систем”, 19-22 квітня 2016 р. м. Київ – С.107-109.

57. Андрущак А.С. Проведення 3D-аналізу анізотропії ефектів в кристалах при розробці на їх основі модуляторів світла для сучасних волоконнооптичних систем передачі інформації/ А.С. Андрущак, Б.Г. Мицик, М.В. Кайдан, Г.П. Лаба, І.П. Островський, О.В. Юркевич, С.С. Думич// Науково-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікації 2007“, 17-20 жовтня 2007, Львів, Україна – С. 25-26.

58. Андрущак А.С. Разработка наиболее эффективных акусто-оптических ячеек для управления лазерным излучением / А.С. Андрущак, Б.Г. Мыщык, И.М. Сольский, Н.М. Демянышин, Н.В. Кайдан, О.В. Юркевич // Труды 9-й международной научно-практической конференции “Современные информационные и электронные технологии”, 19-23 Мая 2008, Одесса, Украина. - Т.2. - С.135.

59. Бурий О.А. Оптимізація геометрії взаємодії електромагнітної та акустооптичної хвиль в акустооптичних приладах, що працюють в режимі Бреґівської дифракції/ О.А. Бурий, Д.М. Винник, С.Б. Убізький, А.С. Андрущак, М.В. Кайдан // Чотирнадцята відкрита науково-технічна конференція Інституту телекомунікацій, радіоелектроніки та електронної техніки Національного університету “Львівська політехніка” з проблем електроніки, Львів (Україна), 5-7 квітня 2011. - С. 13.

60. Стрихалюк Б.М. Фрактальні властивості конвергентних мереж з багатоканальними комутаторами/ Б.М. Стрихалюк, М.М. Климаш, М.В. Кайдан // Науково-практична конференція “ Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій - 2009”, 27-30 жовтня 2009 р., Львів, Україна, 2009. – С.38.

61. Климаш М.М. Поточкова маршрутизація телекомунікаційних мереж і її представлення методом діакоптики / М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // VII Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні

інформаційно-комунікаційні технології” COMINFO’2011-Livadia. 10-14 жовтня 2011 р., Ялта-Лівадія, АР Крим. – С.27-30.

62. Дещинський П.Ю. Моделювання Grid-вузла побудованого на основі пірінгових мереж / П.Ю. Дещинський, М.М. Климаш, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // Науково-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій -2011”, 27-30 жовтня 2011 р., Львів. – С.73-77.

63. Стрихалюк Б.М. 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”, 27-30 жовтня 2011 р., Львів. - С. 97-99.

64. Дещинський П.Ю. Декомпозиційне представлення та моделювання Grid-вузла на основі мереж Петрів для пірінгових систем з використанням діакоптики / П.Ю. Дещинський, Б.М. Стрихалюк, М.В. Кайдан // V Міжнародний науково-технічний симпозіум “Новітні технології в телекомунікаціях”, 17-21 січня 2012 р., ДУІКТ-с. Вишків. – С.160-164.

65. Стрихалюк Б. Математичні моделі ієрархічних інфокомунікаційних систем з використанням теорії гіперграфів/ Б. Стрихалюк, М. Кайдан // VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні інформаційно-комунікаційні технології COMINFO’2012-Livadia”, 1-5 жовтня 2012 р., Ялта-Лівадія, АР Крим.- С.37-38.

66. Стрихалюк Б. Модель оптичного комутатора для систем зі спектральним ущільненням каналів / Б. Стрихалюк, М. Кайдан, Т. Максимюк, С.Думич // VIII Міжнародна науково-технічна конференція “Сучасні інформаційно-комунікаційні технології COMINFO’2012-Livadia”, 1-5 жовтня 2012 р., Ялта-Лівадія, АР Крим.- С.116-117.

67. Стрихалюк Б.М. Повнозв’язний оптичний комутатор для оптичних систем зі спектральним ущільненням каналів/ Б.М. Стрихалюк, С.С. Думич, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк // Науково-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2012”. Матеріали конференції, 1-4 листопада 2012 р., Львів, 2012. – С. 66-67.

68. Стрихалюк Б.М. Алгоритм маршрутизації довжин хвиль в повністю оптичній транспортній мережі/ Б.М. Стрихалюк, С.С. Думич, Т.А. Максимюк, М.В. Кайдан //VI Міжнародний науково-технічний симпозіум “Нові технології в телекомунікаціях”, Матеріали конференції 21-25 січня 2013 р. ДУІКТ-Карпати, м.Київ, 2013. - С.103-106.

69. Климаш М.М. Підвищення ефективності оптичних транспортних систем за рахунок акустооптичних взаємодій у фотонних кристалах/ М.М. Климаш, М.В. Кайдан, Т.А. Максимюк //VI Міжнародний науково-технічний симпозіум “Нові технології в телекомунікаціях” Матеріали конференції 21-25 січня 2013 р, ДУІКТ-Карпати, м.Київ, 2013. - С.143-146.

70. Климаш М.М. Дослідження структур фотонно-кристалічних волокон для побудови фотонних транспортних мереж / М.М. Климаш, М.В. Кайдан //

Науково-методична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2013”. Матеріали конференції, 30 жовтня-2 листопада 2013 р., Львів. – С.211-214.

71. Кайдан М.В. Оптимізація багатошарових телекомунікаційних мереж за критеріями якості надання сервісу / М.В. Кайдан, М.І. Бешлей, А.В. Редька // Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікації – 2014”. СПТЕЛ-2014, Матеріали конференції 30-жовтня – 2 листопада 2014, Львів, 2014. – С. 81-84.

72. Кайдан М. Модель транспортної мережі із перехідними процесами за допомогою методу діакоптики / М. Кайдан, А. Редька //1 Міжнародна науково-практична конференція “Нові досягнення в галузі інформаційно-комунікаційних технологій - 2015“, 29 Жовтня - 1 Листопада, 2015, Львів, Україна. - С.166-170.

73. Кайдан М.В. Дослідження анізотропних оптичних волокон / М.В. Кайдан // Всеукраїнська науково-практична конференція “Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікації–2014”. СПТЕЛ-2014, Матеріали конференції, 30-жовтня – 2 листопада 2014 – Львів, 2014. – С.184-185.

74. Климаш М. Модель визначення параметру енергоефективності транспортних оптичних мереж з використанням SDN контролера / М. Климаш, М. Кайдан, В. Андрущак // Міжнародна Науково-технічна конференція “Сучасні інформаційно-телекомунікаційні технології”, 17-20 листопада 2015, Київ, Україна. - Т.2. - С.21-23.

75. Кайдан М. Модель розрахунку енергоефективності для електро- та акустооптичних пристроїв у оптичних транспортних мережі/ М.Кайдан, В.Андрущак //1 Міжнародна науково-практична конференція “Нові досягнення в галузі інформаційно-комунікаційних технологій - 2015”, 29 Жовтня - 1 Листопада 2015, Львів, Україна. - С.171-174.

76. Кайдан М. Дослідження енергоефективності процесу комутації блоків даних у оптичній транспортній мережі / М. Кайдан, В. Андрущак // V-та Міжнародна науково-практична конференція “Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах”, 3-5 листопада 2016, м.Чернівці, Україна.- С.202-203.

АНОТАЦІЯ

Кайдан М.В. Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних мереж. – На правах рукопису.

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

Дисертаційна робота присвячена проблемі підвищення ефективності PTN із забезпеченням мінімізації енергоспоживання, часових параметрів та ймовірності втрат даних.

Для аналізу стану телекомунікаційної мережі запропоновано використовувати тензорну модель дослідження на основі диференціальної геометрії. Впроваджено тензорну модель та метод діакоптики для PTN при багатошляховій маршрутизації. Запропоновано використовувати метод діакоптики шляхом розв'язання транспортної задачі засобами лінійного програмування для телекомунікаційних мереж з багатошляховою маршрутизацією та здійснено його апробацію для MPLS мережі.

Набула подальшого розвитку модель 3D-аналізу коефіцієнта електромеханічного зв'язку шляхом побудови його вказівних поверхонь та проведено відповідну апробацію на прикладі кристалів LiNbO_3 .

Вдосконалено модель визначення параметрів енергоефективності для OTN та проведено дослідження цих параметрів з урахуванням фізичних компонентів, активного та пасивного обладнання і передачі даних на каналному рівні з використанням різних транспортних технологій.

На основі моделей випадкового графа проведено оцінку ефективного використання різних топологічних структур у PTN в залежності від її завантаженості. Запропоновано використання теорії перколяції для вивчення механізму управління навантаженням мережі для PTN.

Сформовано підходи до побудови технології OBS для PTN. Запропоновано використання буферизації у PTN, побудованій за технологією OBS для протоколу сигналізації JET. За допомогою моделювання проведено дослідження ефективного використання протоколів сигналізації OBS за критеріями часових параметрів та ймовірності втрат даних. Визначено і оцінено параметр енергоефективності для двох протоколів передачі даних OBS – JET і TAW. Приведено практичні рекомендації для використання протоколів сигналізації для технології OBS.

Ключові слова: PTN, OBS, тензорний аналіз, діакоптика, випадкові графи, параметр енергоефективності.

АННОТАЦІЯ

Кайдан Н.В. Методы и модели построения энергоэффективных фотонных транспортных сетей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.12.02 – телекоммуникационные системы и сети. – Национальный университет "Львівська політехніка" Министерства образования и науки Украины, Львов, 2017.

Диссертация посвящена проблеме повышения эффективности PTN с обеспечением минимизации энергопотребления, временных параметров и вероятности потерь данных.

Для анализа состояния телекоммуникационной сети предложено использовать тензорную модель исследования на основе дифференциальной

геометрии. Введена тензорная модель и метод диакоптики для PTN при многопутевой маршрутизации. Предложено использовать метод диакоптики путем решения транспортной задачи средствами линейного программирования для телекоммуникационных сетей с многопутевой маршрутизацией и проведена его апробация для MPLS сети.

Получила дальнейшее развитие модель 3D-анализа коэффициента электромеханической связи путем построения его указательных поверхностей и проведена соответствующая апробация на примере кристаллов LiNbO_3 .

Усовершенствована модель определения параметров энергоэффективности для OTN, эти параметры исследованы с учетом физических компонентов, активного и пассивного оборудования, а также передачи данных на канальном уровне с использованием различных транспортных технологий.

На основе моделей случайного графа проведена оценка эффективного использования различных топологических структур PTN в зависимости от ее загруженности. Предложено использование теории перколяции для изучения механизма управления нагрузкой сети для PTN.

Сформирован подход к построению технологии OBS для PTN. С помощью моделирования проведено исследование эффективного использования протоколов сигнализации OBS по критерию временных параметров и вероятности потерь данных. Определены и проведена оценка параметров энергоэффективности для двух протоколов передачи данных OBS - JET и TAW. Приведены практические рекомендации для использования протоколов сигнализации для технологии OBS.

Ключевые слова: PTN, OBS, тензорный анализ, диакоптика, случайные графы, параметр энергоэффективности.

ABSTRACT

Kaidan M.V. Methods and models to design the energy efficient photonic transport networks. – The Manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the doctor of technical sciences degree on specialty 05.12.02 - telecommunication systems and networks. - Lviv Polytechnic National University of Ministry for Education and Science of Ukraine, Lviv, 2017.

The thesis is devoted to solving the problem of increasing the efficiency of PTN while minimizing the energy consumption, latency, jitter and data loss probability.

In order to analyze the current conditions of telecommunication network, we contribute the tensor model based on differential geometry. In this model, we introduce the coordinate system that reflects multidimensional field, where each point of this field represents the particular condition of the telecommunication network.

The tensor model combined with diakoptics method has been implemented to solve the task of multipath routing in PTN. This model is based on the assumption that the network can be divided into a set of multiple non-connected subnetworks with additional intersection subnetwork.

We propose to use the diakoptics method to solve the transport task of

multipath routing in telecommunication network by the means of linear programming. The proposed algorithm has been implemented and tested based on the MPLS network.

We have developed the model for 3D analysis of electromechanical connection coefficient in lithium niobate crystals by the calculation of its indicative surfaces. The proposed model has been implemented and tested on the real example of lithium niobate crystal. We have determined that using the lithium niobate crystal as piezo transducer with horizontal polarization of the acoustic wave allows to decrease the energy consumption of acoustooptical switch by 3%.

The model for calculation of the energy efficiency parameters in optical transport network has been improved in the thesis. We have derived the equations for energy efficiency parameters of optical transport networks. Proposed model takes into account the features of hardware, as well as the parameters of active and passive nodes involved in the data transmission on the link layer. These parameters are the following: number and structure of involved nodes, network architecture, type of transport technology, the size and number of data blocks, type of optoelectronic conversion, type of switching, wavelength conversion, regeneration and amplification, and the number of channels. Different technologies for optical transport networks have been studied in order to ensure the feasibility of proposed model for complex networks.

The efficiency of different topological structures in PTN depends on traffic load has been estimated by using the random graphs models. We have proposed to use the percolation theory in order to study the load management in the PTN.

The main approaches for the PTN design based on the OBS technology have been determined. We have proposed the buffering technology in PTN with JET signaling protocol in OBS. Simulations have been conducted to determine the effective usage of different OBS signaling protocols taking into account the latency, jitter and data loss probability. The energy efficiency parameters for JET and TAW signaling protocols have been determined and the practical recommendations for their usage in OBS networks have been outlined.

The energy efficiency of optical transport network has been studied in details from the perspective of architectural and technical approaches. Impact of many different parameters on energy efficiency have been evaluated such as number and structure of involved nodes, network architecture, type of transport technology, the size and number of data blocks, optoelectronic conversion, type of switching, wavelength conversion, regeneration and amplification, and the number of channels. The model to calculate energy efficiency for various configurations of optical transport network based on aforementioned parameters is proposed and the software that implements proposed model is developed. The developed software allows designing the network architecture with target values of energy efficiency. The performances of the proposed model have been evaluated for two types of optical switches: electro- and acousto-optical switches.

Key words: PTN, OBS, tensor analysis, diakoptics, random graphs, energy efficiency parameter

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – щільне хвильове мультиплексування;

EDFA – Erbium Doped Fiber Amplifier – ербієвий волоконно-оптичний підсилювач;

GMPLS – Generalized MPLS – узагальнена багатопроTOCOLьна комутація за мітками;

JET – Just Enough Time – мінімальний необхідний час;

INI – Intermediate Node Initiation – підтвердження через проміжний вузол;

IP – Internet Protocol – міжмережевий протокол;

ITU-T – International Telecommunication Union–Telecommunication sector – Міжнародний союз електрозв'язку–сектор телекомунікацій;

LSP – Label Switch Path – шляхи комутації міток;

MPLS – Multiprotocol Label Switching – багатопроTOCOLьна комутація за мітками;

OBS – Optical Burst Switching – оптичний блок комутації;

OTN – Optical transport network – оптична транспортна мережа;

PTN – Photonic Transport Network – фотонна транспортна мережа;

TAW – Tell and Wait – відправити і чекати;

АО – акустооптичний;

ЕО – електрооптичний;

ОЕО – оптоелектрооптичний;

ФКВ – фотонно-кристалічне волокно.

Підписано до друку 23.08.2017 р.
Формат 60×90 1/16. Папір офсетний.
Друк на різнографі. Умов. друк. арк. 2,2. Обл.-видав. арк.1,7.
Тираж 100 прим. Зам. № 170933

Поліграфічний цент
Видавництва Національного університету "Львівська політехніка"
вул. Ф.Колесси, 4, 79013, Львів,
Рестраційне свідоцтво серії ДК № 4459 від 27.12.2012 р.