

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КАЙДАН МИКОЛА ВОЛОДИМИРОВИЧ



УДК 621.391

ДИСЕРТАЦІЯ

**Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних
мереж**

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

05 «Технічні науки»
(галузь знань)

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

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



/М.В. Кайдан/

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

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

*Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради*



/І.В. Демидов/

Львів - 2017

АНОТАЦІЯ

Кайдан М.В. Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних мереж. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.12.02 «Телекомунікаційні системи та мережі» (172 - Телекомунікації та радіотехніка). – Національний університет «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України, Львів, 2017.

Дисертаційна робота присвячена проблемі підвищення ефективності PTN (Photon Transport Network – фотонна транспортна мережа) із забезпеченням мінімізації енергоспоживання, часових параметрів та ймовірності втрат блоків даних.

В роботі продемонстровано передумови для виникнення протиріччя між мінімізацією часових параметрів та ймовірністю втрат блоків даних при одночасному забезпеченні енергоефективності PTN.

Перший розділ роботи містить огляд літературних джерел за темою дисертації. В розділі проведено аналіз PTN та представлені основні визначення, які використовуються у роботі. Розглянуто стан проблеми і обґрунтована необхідність проведення дослідження PTN.

Описано основні характеристики та вимоги, що ставляться до телекомунікаційних мереж згідно рекомендацій ITU-T – Y.3000-3499 (International Telecommunication Union – Telecommunication sector– Міжнародний союз електрозв'язку – сектор телекомунікації) до 2020 р.

Проведено аналіз комутації PTN, представлено класифікацію використовуваних алгоритмів, розглянута багатопрокольна комутація MPLS (Multiprotocol Label Switching – багатопрокольна комутація за мітками) та комутація блоків із використанням оптичних комутаторів OBS (Optical Burst Switching – оптичний блок комутації).

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 ЕО (електрооптичний) ефект та АО (акустооптичну) взаємодію, а також пристрої, які працюють на основі цих явищ. Показано, що у PTN використання ЕО 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.

Проведено аналіз та класифікацію коефіцієнтів електромеханічного зв'язку. 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.

У другому розділі роботи для аналізу PTN розглянуто основні моделі теорії випадкових графів, описано тензорну модель для багатошляхової 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 основні положення теорії випадкових графів для дослідження PTN.

Приведено геометризацию станів мережі, яка представлена у багатовимірному просторі, що ефективно використовується тензорним аналізом. Розглянуто незвідні представлення для тензорів.

Запропоновано використання тензорної моделі диференціальної геометрії для дослідження параметрів телекомунікаційної мережі. За

допомогою коваріантного диференціювання описано можливість врахування зміни стану на основі символу Крістофеля.

Представлено алгоритм аналізу параметрів телекомунікаційних мереж великих розмірів з багатошляховою маршрутизацією методом діакоптики.

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 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.

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

Наведено приклад для дослідження PTN при кільцевій топології з перерозподілом навантаження за допомогою методу діакоптики при багатошляховій маршрутизації. В роботі представлено алгоритм дослідження багатосферної структури транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM (Internet Protocol/ Multiprotocol Label Switching/ Dense Wavelength Division Multiplexing – міжмережевий протокол / багатопротокольна комутація за мітками / щільне хвильове мультиплексування).

Проведена апробація методу діакоптики для MPLS мережі шляхом розв'язку транспортної задачі за допомогою лінійного програмування.

Розвинуто 3D-аналіз коефіцієнта електромеханічного зв'язку, що дозволяє визначати орієнтацію зрізів для п'єзоперетворювачів в АО пристроях за критерієм енергетичної ефективності. Вперше побудовано вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Визначено максимальні значення для побудованих поверхонь. Визначено зрізи енергоефективного використання кристалів LiNbO_3 для акустичних пристроїв.

Проаналізовано можливості використання фотонних кристалів в OTN (Optical transport network – оптична транспортна мережа) при АО взаємодії.

У четвертому розділі 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, яка вдосконалена шляхом врахування параметрів витрат електроенергії на відкриття наскрізних каналів та потужності, яка витрачається мережним обладнанням в режимі холостому ходу.

На основі отриманих результатів для коефіцієнта електромеханічного зв'язку при поперечній акустичній поляризації кристалу LiNbO_3 визначено енергоефективність АО комутатора.

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.

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 %.

На основі проведених досліджень енергоефективності PTN, коли швидкість передачі даних становить 100 Гбіт/с визначено, що використання орієнтацій кристалів LiNbO₃, які відповідають максимальним значенням EO коефіцієнта та коефіцієнта АО якості приводить до зменшення енергетичного споживання EO модулятора та АО комутатора на 4,8 % та 20 %, відповідно.

Визначено і оцінено параметр енергоефективності мережі, ймовірність відмови та час експлуатації модуляторів при збільшенні пропускної здатності мережі шляхом переходу до вищих порядків модуляцій. Аналіз отриманих результатів разом з економічним фактором показав, що PM-QPSK (Polmultiplexing- Quadruple Phase Shifted Keying – поляризаційне мультиплексування- квадратичної фазової модуляції) модулятор є кращим рішенням на даний момент для PTN.

Для зменшення енергетичного споживання оптичного лінійного тракту і зменшення ймовірності його відмови рекомендується використання EDFA (Erbium Doped Fiber Amplifier - ербієвий волоконно-оптичний підсилювач) підсилювачів на базі ФКВ (фотонно-кристалічні волокна).

Досліджено вплив використання технології об'єднання міток (Link Bundling) в мережі GMPLS (Generalized MPLS - узагальнена багатопротокольна комутація за мітками) на енергетичне споживання транспортної оптичної мережі. Встановлено, що для LSP (Label Switch Path – шляхи комутації міток) при збільшенні від чотирьох до сорока проміжних вузлів енергетичне споживання зросло в 2,52 рази. Показано, 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 менше 45 %.

Визначено і оцінено параметр енергоефективності при здійсненні комутації різних фундаментальних 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 рази 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.

У п'ятому розділі приведено оцінювання топологічних структур PTN з використанням моделей випадкового графа, що проводилась 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. 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 коефіцієнт кластеризації і середня довжина шляху зменшуються.

В моделі Барабаші-Альберта при систематичній появі нових вузлів середній шлях зростає, а коефіцієнт кластеризації спадає. Визначено, що коефіцієнт кластеризації у мережах згідно моделі Барабаші-Альберта має спадний характер. 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 PTN за допомогою досліджень відносної працездатності кількості вузлів та гілок на основі моделей випадкового графу. Зокрема у PTN, що відповідає моделі Ердос-Ренеї,

розглянуто критичні випадки, коли мережа перебуває в квазіперевантаженому та в недовантаженому станах.

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.

Запропоновано використання теорії перколяції для контролю і керування навантаженням PTN. 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

В шостому розділі сформовано підходи до побудови OBS для PTN, за допомогою моделювання проведено аналіз та дослідження ефективності протоколів сигналізації по критерію часових параметрів та ймовірності втрат даних для технології OBS і 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.

Проведено аналіз протоколів сигналізації для OBS на основі випадкових графів. Визначено, що при використанні протоколів сигналізації JET (Just Enough Time – мінімальний необхідний час) виникають втрати блоку внаслідок зайнятості існуючих каналів на виході комутатора. В роботі для даного випадку запропоновано використовувати буферизацію.

Проведено аналіз ефективності різних протоколів OBS в залежності від завантаження мережі. Встановлено, що протокол TAW (Tell and Wait – відправити і чекати) рекомендовано використовувати при максимальному завантаженні пакетів у блоки, коли мережа квазіперевантажена. 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.

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 $\rho > 0,5$.

Проведено дослідження гібридного протоколу INI (Intermediate Node Initiation – підтвердження через проміжний вузол) з виділенням оптичних каналів окремо при передачі даних для протоколів JET і TAW.

Розглянуто можливість використання різних протоколів в залежності від розміру блоків.

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.

Проведено дослідження протоколів сигналізації OBS за допомогою теорії перколяції. Визначено сприятливі умови передачі даних у залежності часу доставки від ймовірності зайнятості з'єднань у вузлі 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.

Визначено і оцінено параметр енергоефективності для протоколів JET і TAW. 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 є протокол TAW.

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

Список публікацій здобувача:

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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.
3. Klymash M. Performance analysis of optical burst switching networks for different signaling protocols / M. Klymash, M. Kaidan, S. Dumych // Smart Computing Review, 2015. – Vol. 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. – vol. 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". Радіоелектроніка 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 LiNbO₃ 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. - Vol.6. - No.4. - P. 34-44, August 2016.

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 багатошарової 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. Андрушак // 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". Радіoeлектроніка та телекомунікації . . - 2013. -№766. - С.90–95.

20. Стрихалюк Б.М. Тензорне подання топологічних структур тороїдальних мереж/ Б.М. Стрихалюк, М.М. Климаш, М.В. Кайдан // Вісник НУ "Львівська політехніка" Радіoeлектроніка та телекомунікації.- 2008 р. - №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 акустооптичного 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.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

37. Strykhalyuk B. Tensor models for the efficient multipath routing in large-scale communication networks / B. 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, February 25 – March 1, 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, February 21–24, 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 (EWDTW'06), Sochi, Russia, September 15-19, 2006. – 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, Wroclaw 12-14, October 2006 – 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, Wroclaw 12-14, October 2006 – 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”, September 17-20, 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, October 1–6, 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). – Alushta, Krimea, Ukraine. – 2-4 October 2008 - 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). – Sevastopol, Crimea (Ukraine). – September 10-14, 2010.-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, February 23 –26, 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), September 11-16, 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)” October 4-6, 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)” October 13-15 ,2015 Kharkiv,Ukraine.- P.167-170.

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 2016р. –м. Київ 2016 – 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“ – Львів, Україна, 17-20 жовтня 2007. – С. 25-26.

58. Андрущак А.С. Разработка наиболее эффективных акусто-оптических ячеек для управления лазерным излучением / А.С. Андрущак,

Б.Г. Мыщук, И.М. Сольский, Н.М. Демянышин, Н.В. Кайдан, О.В. Юркевич // Труды 9 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 акутооптичної хвиль в акутооптичних приладах, що працюють в режимі Брегівської 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. – АР Крим, Ялта-Лівадія 10-14 жовтня 2011 р. – 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» – Львів, 27-30 жовтня 2011 р. – 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 симпозиум “Новітні технології в телекомунікаціях” – ДУІКТ-Карпати, 17-21 січня 2012 р. – 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., АР Крим, Ялта-Лівадія.- 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., АР Крим, Ялта-Лівадія.- 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 симпозиум “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 симпозиум “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, 2013. – С.211-214.

71. Кайдан М.В. Оптимізація багат шарових 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 листопада2014 – 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 акутооптичних 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 оптичних транспортній мережі / М.Кайдан, В.Андрущак //V Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах»- 3-5 листопада 2016 р - м.Чернівці, Україна.- С.202-203.

ABSTRACT

Kaidan M.V. Methods and models to design the energy efficient photonic transport networks. – Proficiency scientific treatise on the rights of the manuscript.

A thesis submitted in fulfilment of the Doctor of Engineering Science degree in technical sciences on specialty 05.12.02 «Telecommunication systems and networks» (172 - Telecommunications and Radioengineering). – 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.

The preconditions for the contradiction between minimizing the time parameters and data loss probability, while improving the energy efficiency of PTN are presented in the thesis.

First chapter of the thesis contains the literature survey on the topic of dissertation. The analysis of PTN and the main definition used in the thesis are included in the Chapter 1. The current state of the problem and need for further research of PTN is also outlined in the first chapter.

The main characteristics and requirements, which are put forward for telecommunication networks according to the ITU-T – Y.3000-3499 recommendation by 2020 are defined in this chapter.

The first chapter also provides the analysis of PTN switching, classification of used algorithms, description of MPLS and OBS.

Furthermore, the mathematical approaches for research of the telecommunication systems are presented. It is shown that methods of percolation theory, dynamic graph theory and tensor analysis are needed to resolve the defined tasks in telecommunication systems and networks.

The perspective of the possible use of different elements, components and devices based on the photonic crystals and anisotropic optical fibers in PTN is analyzed as well.

The chapter also describes the electro-optical effect and acoustooptical interaction and the devices, which are based on these phenomena. It is shown that electro-optical is preferred for optical modulators in PTN, while acoustooptical is more effective for the optical switches.

It is shown that energy balance of PTN requires complex approaches to improve the network energy efficiency, such as technological, architectural, protocols and cloud based approaches.

The analysis and classification of the electromechanical connection coefficient is conducted. The necessity of this parameter for effective implementation of acoustic devices in PTN is justified.

According to the conducted analysis it is determined that the best material for implementation of acoustic devices is LiNbO_3 crystal, which is widely used in current devices for PTN.

In Chapter 2 the basic models are presented for the PTN analysis such as random graph theory models, tensor model for multipath routing, tensor model based on the differential geometry and diakoptic method. These aforementioned models are used to analyze the parameters of the telecommunication network and to optimize the large scale network.

The fundamentals of the random graph theory for the PTN analysis are provided. The theoretical basics for PTN research by using the Watts-Strogatz,

Erdos–Renyi, Barabasi-Albert and generalized random graph models are presented.

Geometric representation of the network states in multi-dimensional space is proposed for effective exploitation of the tensor analysis. The irreducible representations for tensors are presented.

It is proposed to use the tensor model based on the differential geometry to study the parameters of the telecommunication network. By using the covariant differentiation it is described the variation of the network state based on the Christoffel symbol. The differential forms to simplify the calculation of the Christoffel symbols, Riemann and Ricci tensors, space curvature scalars and Lie derivatives are proposed as an alternative to the covariant derivatives. It is noted that information about the sequence of network states at different segments may differ. Therefore, to avoid possible losses and errors it is required that components of Riemann tensor or Lie parentheses must be equal to zero.

An algorithm of the large network analysis with multipath routing based on the diakoptic method is presented. Proposed algorithm is based on the tensor model with diakoptic method. The diakoptics for multipath routing in telecommunication network is implemented by solving the transport task using the means of linear programming. Proposed approach is tested on the MPLS networks to determine the advantages and disadvantages of the diakoptic method.

For each type of node the estimation of the average number of packets in a queue and the lower bound of the node's throughput is presented.

The model to study anisotropy of physical parameters in crystalline materials by using indicative surfaces of these parameters is proposed. Furthermore, in this chapter the directional cosines are calculated taking into account the features of light propagation in the single axis crystals.

Third chapter covers the determination of the tensor components for telecommunication network in curvilinear coordinate system. The research on the multipath routing in PTN is conducted by using the diakoptic method. The 3D analysis of the electromechanical coefficient in LiNbO_3 crystals is provided.

An example of determination the tensor components in curvilinear coordinate system is provided for the telecommunication network, for the case when metric tensor is obtained by using the cosine theorem, where vector values are selected as the load of the given vector. It is shown that, according to the proposed differential geometry model, metric tensor is not symmetrical and should be factorized into symmetrical and asymmetrical tensors.

The tensor model of multipath routing in PTN is further developed for the case of duplex connection between transit nodes by estimating the need for consideration of the data flow direction in network structure.

The example of PTN study for ring topology with load redistribution by using the diakoptic method for multipath routing is presented. The thesis proposes the algorithm for analysis of multilayer structure of transport network based on IP/MPLS/DWDM technologies. The approbation of diakoptic method for MPLS network is provided by solving the transport task with the means of linear programming. The estimation of quality of service in terms of delay minimization is conducted by using Little's equation.

The 3D-analysis of the electromechanical connection coefficient is improved to determine the cut orientation of piezotransducers in acoustooptical devices taking into account the energy efficiency criteria. The indicative surfaces of the electromechanical connection coefficient are first proposed in the thesis. The extreme values for the studied surfaces are determined. The energy efficient cuts for acoustic devices based on the LiNbO_3 crystals are determined. The use cases of photonic crystals in OTN for AO interaction are outlined.

Chapter 4 covers the research on the energy efficiency parameters of OTN taking into account the features of hardware, parameters of active and passive nodes involved in the data transmission on the link layer, as well as different technologies of transport network.

The general approach to determine the energy efficiency of OTN is improved by taking into account the parameters of power consumption for transparent optical communications and idle network state. Proposed approach allows to

comprehensively estimate the exploitation parameters for energy efficient network operation.

Based on the obtained results of the electromechanical connection coefficient for horizontal acoustic polarization of LiNbO₃ crystal it is determined the energy efficiency of acoustooptical switch.

The research on the energy efficiency parameters depends on the data rate is conducted. Results show that higher data rate provides better utilization of energy, but leads to higher energy consumption of the network nodes. It is shown that increasing the number of input/output ports of acoustooptical switch by the factor of two, with the data rate of 100 Gbps, increases the energy consumption by 88 %.

The conducted research on the PTN energy efficiency shows that for the data rate of 100 Gbps, use of the most effective cuts of LiNbO₃ crystals provides lower power consumption of electro-optical modulator and acoustooptical switch by 4.8% and 20% respectively.

Further, the energy efficiency, failure probability and lifetime of modulators are assessed for higher data rates and higher order modulations. Performance analysis along with the economic factors shows that PM-QPSK is currently the best choice for the PTN. In order to decrease the energy consumption and failure probability of optical communication system it is recommended to use the EDFA based on the Photonic Crystal Fiber.

The impact of link bundling in GMPLS network on the energy consumption of the optical transport network is analyzed. It is determined that for LSP increasing from 4 to 40 intermediate nodes increases the energy consumption by the factor of 2.52. It is also determined that uneven load distribution among channels may result in up to 2.78 higher energy consumption. Therefore, it is recommended to perform aggregation of LSPs by using the GMPLS Link Bundling when the load of the wavelength is less than 45%.

The energy efficiency of GMPLS is also accessed for different switching units such as packets, time bursts or wavelengths. It is determined, that wavelength switching consumes 2.33 times less energy comparing to burst switching, and 10.1

times less comparing to packet switching. Note that for short LSPs, the energy efficiency is almost the same for all types of switching. The meaningful difference is observed for the LSPs with more than 7 intermediate nodes. For such cases, the burst and wavelength switching is more preferred in terms of energy efficiency.

Chapter 5 provides the assessment of different topological structures by using the random graph models. The estimation is conducted by determination of the relation of the average path length and clustering coefficient with the number of nodes and connection probability. The PTN load is also analyzed by considering the nodes and lines functional ability based on random graphs and percolation theory.

Based on the conducted research with Watts-Strogatz model, it is recommended that connectivity factor for PTN with ring topology should be not less than 3 in order to decrease the number of intermediate nodes. Increasing the number of nodes result in higher path length. On the other hand, increasing the connectivity factor decreases the average path length.

In Barabasi-Albert model the path length increases, when clustering factor decreases. According to the generalized random graphs model, increasing of the average connectivity results in the higher path length, higher number of neighbor nodes and lower clustering factor.

The analysis of the PTN load by considering the functional ability of nodes and edges based on random graph models is conducted. In PTN with Erdos-Renyi model the extreme cases are studied when the network is quasi-overloaded or under loaded.

Considering the Watts-Strogatz, Barabasi-Albert and generalized random graphs model it is determined that increasing the percentage of failed nodes, average path length decreases due to higher number of isolated nodes.

The use of percolation theory is proposed for load control and management in PTN. The emergence of clusters with different size and different quantity, as well as emergence of infinite cluster is studied. It is determined that for ring topology

the simultaneous existence of white and black cluster is possible, when the connection between some pair of nodes is lost.

In chapter 6 the approaches for OBS and PTN design are outlined. By simulations the efficiency of signaling protocols in terms of time parameters and data loss probability for OBS are defined and practical recommendations for their use are provided. The structural scheme of the two-dimensional optical switch is presented based on the acoustooptical cell. It is proved, that suggested switch scheme provides better energy efficiency of PTN.

The analysis of the OBS signaling protocols is conducted based on the random graphs. It is determined that JET allows burst loss due to the blocking in the output ports of the switch. For such cases, it is proposed to use buffering.

The analysis of the efficiency of different OBS protocols depends on the network load is performed. It is determined that TAW protocol is recommended for maximal burst utilization by packets. Exception is only when network load is higher than 98%. In high load case, the JET protocol is preferred.

The thesis also presents a study on the multipath routing in OBS network. Obtained results show that when network load is higher than 50 %, the use of multipath routing is not feasible. The hybrid protocol INI is also studied. The main feature of INI is path division into JET and TAW segments. The possibility of different protocol usage depends on the burst size is also considered. When transferring data by using JET and INI protocols and in case when buffer is full, it is proposed to send the burst to the intermediate node. In this case the delay may be slightly higher, but data loss will be minimized.

The research on the OBS signaling protocols based on the percolation theory is conducted. The optimal conditions for the data transmission in terms of delay and data loss probability are outlined. The JET protocol provides lower delay, while INI is better in terms of data loss probability.

The energy efficiency parameters for JET and TAW protocols are determined. When number of packets per burst is higher, the energy efficiency of the OBS switch is better. It is found that JET protocol is more effective when bursts consist

of less than 100 packets. For the larger bursts, the TAW protocol shows better performance in terms of energy efficiency.

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

The list of author's publications:

Proceedings where basic scientific results of thesis were published:

1. Klymash M. The theoretical basis of telecommunication networks / M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan - Lviv: Ukr. acad. print., 2011. - 496 p.

2. Klymash M. The theoretical basis of telecommunication networks: Monograph / M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan – Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 644 p.

3. Klymash M. Performance analysis of optical burst switching networks for different signaling protocols / M. Klymash, M. Kaidan, S. Dumych // Smart Computing Review, 2015. – Vol. 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. – vol. 4, №6, P. 470-480.

5. Kaidan M. Research on quality of service parameters for photonic transport networks / M. Kaidan, S. Dumych, T.A. Maksymyuk, R.A. Burachok, L.M. Hotra // Visnyk NU "Lviv Polytechnic". Radioelectronics and information communications, Lviv, 2014. – № 796. - P. 147–156.

6. M. Kaidan The indicative surfaces of photoelastic effect for Cs₂HgCl₄ biaxial crystals / M. Kaidan, B. Tybinka, A. Zadorozhna, W. Schranz, B. Sahraoui, A. Andrushchak, A. Kityk // Optical Material.-2007.-V.29.-P.475-480.

7. Andrushchak A. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect for crystal materials: II. Indicative surfaces as efficient tool for electro-optic coupling optimization in LiNbO₃ / A. Andrushchak, B. Mytsyk, N. Demyanyshyn, M. Kaidan, O. Yurkevych, S. Dumych, A. Kityk, W. Schranz // Optics & Lasers in Engineering.– 2009.–V.47, N.1. – P.24-30.

8. Andrushchak A. Spatial anisotropy of the acoustooptical efficiency in lithium niobate crystals / A. Andrushchak, E. Chernyhivsky, Z.Yu. Hotra, M. Kaidan, A. Kityk, N. Andrushchak, T. Maksymyuk, B. Mytsyk, W. Schranz // J. Applied Physics. – 2010. – V.108. – P.103118(1-5).
9. Andrushchak A. Spatial anisotropy of linear electro-optic effect in crystal materials: I. Experimental determination of electro-optic tensor in LiNbO₃ by means of interferometric technique / A. Andrushchak, B. Mytsyk, N. Demyanyshyn, M. Kaidan, O. Yurkevych, I. Solskii, A. 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. - Vol.6. - No.4. - P. 34-44, August 2016.
11. Kaidan M. Analysis of the energy balance of optical transport network based on the technological and architectural approaches / M. Kaidan, V. Andrushchak // Visnyk NU "Lviv Polytechnic". Radioelectronics and information communications. – 2015. – №818. – P. 120-129.
12. Kaidan M. Determination of energy efficiency acoustic devices in the optical transport network using 3D-analysis of electromechanical coupling// Visnyk NU "Lviv Polytechnic". Radioelectronics and information communications . – 2016. - №846.-P.185-193.
13. Kaidan M. The determination of parameter of energy efficiency for optical transport networks/ M. Kaidan, V. Andrushchak // Information processing systems. — 2016. — № 7 (144). — P. 134-142.
14. Klymash M. Optimization multilayer structure of transport network based on technology IP/ MPLS/DWDM using the diakoptics method / M. Klymash, M. Kaidan, M. Beshley, A. Redka // Scientific notes of Ukrainian Research Institute of communications. – 2015. – №3(37) – P. 32-42.
15. Kaidan M. Tensor model of the communication system for photonic transport network / M. Kaidan, M. Klymash // Scientific notes of Ukrainian Research Institute of communications. – 2014. – №3(31). – P. 10-13.

16. Klymash M. Research the orders of modulations for increasing energy efficiency optical transport network. / M. Klymash, M. Kaidan, V. Andrushchak // Scientific notes of Ukrainian Research Institute of communications. – 2016. – №2(42). - P.12-15.
17. Kaidan M. Configuration of network management for energy efficiency in optical transport networks using GMPLS and OBS techniques / M. Kaidan, V. Andrushchak, N. Kryvinska, M. Klymash, M. 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. Strykhalyuk B. Model of acoustooptic switch for all optical telecommunication systems/ B. Strykhalyuk, M. Kaidan, T. Maksymyuk, V.Pashkevych //Visnyk NU "Lviv Polytechnic". Radioelectronics and information communications. –2013. - №766. – P.90-95.
20. Strykhalyuk B. Topological tensor representation of toroidal networks / B. Strykhalyuk, M. Klymash, M. Kaidan // Visnyk NU "Lviv Polytechnic". Radioelectronics and information communications.- 2008 p. - №618. - P.138-144.
21. Tymchenko O. Determining the structural characteristics of toroidal networks / O. Tymchenko, B. Strykhalyuk, M. Kaidan // Modeling and Information Technology. Collection of scientific papers Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering National Academy of Sciences of Ukraine.- V. 45. – K.: 2008. – P.-203-210.
22. Strykhalyuk B. The model of FGN multidimensional networks / B. Strykhalyuk, M. Kaidan // Collection of scientific papers "Modeling and Information Technology". – Kyiv, 2009.- Release 54.- P.212-217.
23. Klymash M. The use of tensor invariance in telecommunication networks / M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan // Collection of scientific papers "Modeling and Information Technology". – Kyiv, 2008. - Rel.49. - P.72-79.

24. Klymash M. Tensor Analysis of transport network transition in NGN / M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan // Computer technology of publishing, scientific research journal. – Lviv, 2009.- №21. – P. 126-139.
25. Klymash M. Tensor performance model of multiservice traffic networks in NGN / M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan // Computer technology of publishing, scientific research journal.- 2010, - №23. –P.79-88.
26. Klymash M. Tensor representation of routing algorithms / M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan // Connection - 2010.- №1. – P.33-35.
27. Strykhalyuk B. Using irreducible representations for the analysis of K-track routing. / B. Strykhalyuk, M. Kaidan, R. Kolodiy, O. Tymchenko // Collection of scientific papers National Academy of Sciences of Ukraine, Institute for Modelling in Energy Engineering. - K., 2010. - V. 56. - P.224-230.
28. Klymash M. Optimization model of multilayer structures of telecommunication networks using linear programming by diakoptic method / M.Klymash, M. Kaidan, M. Beshley, A. Redka // Computer technology of publishing, scientific research journal. –Lviv, 2014.- №. 32 – P.59 -68.
29. Andrushchak A. Improving efficiency of acousto optical modulators of light as main component of optical communication networks / A. Andrushchak, B. Mytsyk, I. Ostrovskyy, M. Kaidan, H. Laba, I. Chaykovs'kyy, N. Demyanyshyn // Collection of scientific papers Pukhov Institute for Modelling in Energy Engineering – 2006. – V. 35. – P. 171-177.
30. Andrushchak A. Filling of linear electro-optical effect matrices in crystals of arbitrary symmetry class. Approbation of method on example of lithium niobate crystals/ A. Andrushchak, B. Mytsyk, N. Demyanyshyn, M. Kaidan, O. Yurkevych // Visnyk NU "Lviv Polytechnic" Electronics.-2007.-№592.-P.148-156.
31. Laba H. Spartial anizotropy of electro-, piezo- and acousto-optical effects in crystalline materials, solid-state electronics. Testing on the example of LiNbO_3 and $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$. Part II. Filling the matrix of elastic and piezoelectric coefficient in crystals LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$ / H. Laba, O. Yurkevych,

I. Karbovnyk, M. Kaidan, S. Dumych, I. Solskii, A. Andrushchak // Visnyk NU "Lviv Polytechnic" Electronics.-2008.-№619.-P.172-180.

32. Andrushchak A. The most efficient acousto-optical modulators of information signal for fiber-optic info-communication systems / A. Andrushchak, M. Kaidan, O. Yurkevych, B. Mytsyk, I. Solskii // Modelling and information technology. Collection of scientific papers Institute for Modelling in Energy Engineering, National Academy of Sciences of Ukraine. – 2008. – Rel.49. – P. 194-201.

33. Buryy O. New method of optimization the acoustooptic interaction geometry in crystalline materials of arbitrary symmetry class / O. Buryy, D. Vynnyk, M. Kaidan, A. Andrushchak // Visnyk NU "Lviv Polytechnic". Electronics. – 2011. – № 708. – P. 184–194.

34. Deshchynskyy P. Investigation of the impact on network congestion of the peer system surviveability / P. Deshchynskyy, B. Strykhalyuk, M. Kaidan // Visnyk NU "Lviv Polytechnic" Radioelectronics and telecommunication - 2012. - № 738. - P. 231-234.

35. Klymash M. Tensor model of telecommunication network based on curvilinear coordinates / M. Klymash, M. Kaidan, B. Strykhalyuk // Telecommunication and information technologies -2016. -№3.- P.14-21.

36. Klymash M. Effectiveness of protocols optical burst switching in the transport network / M. Klymash, M. Kaidan // Science notes of Ukrainian scientific-investigation Institute of Connection. – 2016 - №3 (43) –P.5-12.

Proceedings that certify an approvement of thesis materials:

37. Strykhalyuk B. Tensor models for the efficient multipath routing in large-scale communication networks / B.Strykhalyuk, M.Kaidan, M.Klymash, N. Kryvinska // Emerging Research and Projects Applications Symposium (ERPAS 2010), in conduction 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, February 25 – March 1, 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, February 21–24, 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 (EWDTW'06), Sochi, Russia, September 15-19, 2006. – 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, Wroclaw 12-14, October 2006 – P. 396-399.

44. M. Kaidan 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, Wroclaw 12-14, October 2006 – 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 / Andrushchak A.S., Tchaikovsky I.B., Demyanyshyn N., Dumych S., Yurkevych O., M. Kaidan, Laba H., Mytsyk B. // 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”, September 17-20, 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, October 1–6, 2007, Partenit, Crimea, Ukraine. – P.170.

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

50. Andrushchak A. 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. Application efficiency increasing of LiNbO₃:MgO and GaP crystals for acoustooptical high frequency control of powerfull laser irradiation / A. Andrushchak, M. Kaidan, E. Chernyhivskiy, O. Yurkevych, T. Maksymyuk, B. Mytsyk, A. Kityk // Proceeding of 10-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2010). – Sevastopol, Crimea (Ukraine). – September 10-14, 2010.-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, February 23 –26, 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), Sep. 11-16, 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)” October 4-6, 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)” October 13-15 ,2015 Kharkiv,Ukraine, -P.167-170.

56. Kaidan M. Parameter estimation of energy efficiency of optical transport networks based on optical electronic devices / M. Kaidan, V.Andrushchak // X International Scientific and Technical Conference "Problems of Telecommunications" and VIII International Scientific Conference " Development prospects of information and telecommunication technologies and systems”, 19-22 May 2016p. – Kyiv 2016 – P.107-109.

57. Andrushchak A. Conducting 3D-analysis of anisotropy effects in crystals when developing modern light modulators on its basis for fiber optic data transmission systems/ A. Andrushchak, B. Mytsyk, M. Kaidan, H. Laba, I. Ostrovs'kyi, O. Yurkevych, S. Dumych // Scientific-practical conference “ Modern problems of telecommunications and training in the field of telecommunications 2007“ – Lviv, Ukraine, 17-20 October 2007. – P. 25-26.

58. Andrushchak A. Development of the most effective acousto-optic cells for controlling laser radiation / A.Andrushchak, B. Mytsyk, I. Solskii, N. Demyanyshyn, M. Kaidan, O. Yurkevych // Proceedings of the 9th International Scientific and Practical Conference “Modern Information and Electronic Technologies”, 19-23 May, 2008, Odessa, Ukraine. - T.2. - P.135.

59. Buryy O. Optimization of geometry interactions between electromagnetic and acousto-optical waves in acousto-optical devices, that operate in Bragg diffraction mode / O. Buryy, D. Vynnyk, S. Ubizskii, A. Andrushchak, M. Kaidan// XIV opened Scientific and Technical Conference of the Institute of Telecommunications, Radioelectronics and Electronic Engineering of the National University “Lviv Polytechnic” with the electronics problems. – Lviv (Ukraine). – 5-7 April 2011. - P. 13.

60. Strykhalyuk B. Fractal properties of converged networks with multi-channel switches / B. Strykhalyuk, M. Klymash, M. Kaidan // Scientific-practical conference " Modern problems of telecommunications and preparation of

specialists in telecommunication field - 2009". – Lviv, Ukraine, 28-30 October 2009. – P.38.

61. Klymash M. Streaming routing of telecommunications networks and its presentation by diaktotics/ M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan // VII International Scientific and Technical Conference "Modern information and communication technologies" COMINFO'2011-Livadia. – Crimea, Yalta- Livadia 10-14 October 2011 – P.27-30.

62. Deshchynskyy P. Simulation of Grid-built unit based on peer to peer networks / P.Deshchynskyy, M. Klymash, B. Strykhalyuk, M. Kaidan // Scientific-practical conference "Modern problems of telecommunications and preparation of specialists in telecommunication field -2011" –Lviv, 27-30 October 2011. – P.73-77.

63. Strykhalyuk B. Decomposition of virtual channels of optical networks with using diaktotics / B. Strykhalyuk, M. Kaidan, S. Dumych // Materials of the scientific Conference "Modern Problems of telecommunications and preparation of specialists in telecommunication field – 2011", (Lviv, 27-30 October 2011 p.). - Lviv, 2011. - P. 97-99.

64. Deshchyns'kyk P. Decompositive presentation and simulation Grid-node based on Petri nets for peer to peer systems using diaktotics / Deshchyns'kyk P., B. Strykhalyuk , M. Kaidan // V International scientific and technical symposium "New technologies in telecommunications" – State University of Telecommunications - Carpathians, 17-21 January 2012 p. – P.160-164.

65. Strykhalyuk B. Mathematical models of hierarchical infocommunication systems using hypergraph theory / B. Strykhalyuk, M. Kaidan // VIII International Scientific and Technical Conference "Modern information and communication technologies COMINFO'2012-Livadia, 1-5 October 2012 p., Crimea, Yalta-Livadia.- P.37-38.

66. Strykhalyuk B. Model of optical commutator for systems with wavelength-division multiplexing / B.Strykhalyuk, M. Kaidan, T. Maksymyuk, S.Dumych // VIII International Scientific and Technical Conference "Modern

information and communication technologies COMINFO'2012-Livadia", 1-5 October 2012, – Crimea, Yalta- Livadia.- P.116-117.

67. Strykhalyuk B. Fully connected optical switcher for optical systems with wavelength-division multiplexing / B. Strykhalyuk, S.Dumych, M. Kaidan, T. Maksymyuk // Scientific-practical conference "Modern problems of telecommunications and preparation of specialists - 2012". Conference Materials 1-4 November 2012. – Lviv, 2012. – P. 66-67.

68. Strykhalyuk B. Routing algorithm wavelengths in all-optical transport network / B. Strykhalyuk, S.Dumych, T. Maksymyuk, M. Kaidan //VI International scientific and technical symposium "New technologies in telecommunications," Materials Conference 21-25 January 2013 SUICT-Karpaty, Kyiv, 2013. - P.103-106.

69. Klymash M. Improved optical transport systems at the expense of acousto-optical interaction in photonic crystals / M. Klymash, M. Kaidan, T. Maksymyuk //VI International scientific and technical symposium "New technologies in telecommunications" Materials Conference 21-25 January 2013, SUICT-Karpaty ” Conferebce Materials 21-25 January 2013 p, State University of Telecommunications - Carpathians, Kyiv, 2013. - P.143-146.

70. Klymash M. Researches institutions photonic-crystal fibers for constructing photonic transport networks / M. Klymash, M. Kaidan // Scientific-practical conference "Modern problems of telecommunications and preparation of specialists - 2013". Conference Materials 30 October-2 November 2013. – Lviv, 2013. – P.211-214.

71. Kaidan M. Multilayer optimizing of telecommunication networks via criteria of quality service / M. Kaidan, M. Beshley, A. Redka. // Ukrainian scientific-practical conference "Modern problems of telecommunications and preparation of specialists in telekomunikatsiyi- 2014". SPTEL 2014 Conference Materials 30-October – 2 November 2014 – Lviv, 2014. – P. 81-84.

72. Kaidan M. Model of transport network of transients using the method diakoptics / M. Kaidan, A. Redka //1 International scientific conference "New

achievements in Information and Communication Technologies - 2015 “29 October - 1 November, 2015 Lviv, Ukraine. - P.166-170.

73. Kaidan M. Anisotropic optical fibers research / M. Kaidan Ukrainian scientific-practical conference "Modern problems of telecommunications and preparation of specialists in the field of telecommunications – 2014". SPTTEL - 2014 Conference material 30-October – 2 November 2014 – Lviv, 2014. – P.184-185.

74. Klymash M. Parameter determining model of energy efficiency of optical transport networks using SDN controller / M. Klymash, M. Kaidan, V. Andrushchak // International Scientific Conference «Modern information and telecommunication technologies», 17-20 November 2015, Kyiv , Ukraine. - T.2. - P.21-23.

75. Kaidan M. The calculation model for energy efficiency of electric and acousto-optical devices in the optical transport network / M. Kaidan, V. Andrushchak //1 International Scientific Practical Conference “New achievements in the ICT (Information and Communication Technologies) field - 2015 “29 October - 1 November, 2015 Lviv, Ukraine. - P.171-174.

76. Kaidan M. Research of energy efficiency of data blocks switching process in the optical transport network / M. Kaidan, V. Andrushchak //V International Scientific Conference «Physical and technological problems of transfer, processing and storage information in infocommunication systems»- 3-5 November 2016 - Chernivtsi, Ukraine.- P.202-203.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ.....	47
ВСТУП	49
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ	62
1.1. Фотонні транспортні мережі та їх різновиди	63
1.1.1. Основні поняття фотонних транспортних систем і мереж.....	65
1.1.2. Основні підходи до забезпечення енергоефективності оптичних транспортних мереж	68
1.1.3. Класифікація фотонних транспортних систем	69
1.2. Моделі транспортної багаторівневої мережі.....	73
1.2.1. Моделі оптичних транспортних мереж	76
1.2.2. Багаторівнева комутація.....	81
1.2.3. Багатопротокольна комутація по мітках	82
1.2.4. Основний принцип роботи вузла на базі оптичного комутатора	84
1.3. Математичні моделі для аналізу оптичної транспортної мережі	88
1.3.1. Теорія графів	89
1.3.2. Тензорний аналіз.....	91
1.4. Елементи та пристрої в фотонній транспортній мережі.....	94
1.4.1. Властивості і застосування фотонно-кристалічних волокон	94
1.4.2. Анізотропні оптичні волокна	97
1.4.3. Оптичні модулятори в мережах зв'язку	97
1.4.4. Оптичні комутатори в мережах зв'язку.....	98
1.4.5. Аналіз використання електро- та акустооптичних комутаторів і модуляторів	99
1.4.6. Електрооптичний ефект в оптоелектронних пристроях.....	101
1.4.7. Акустооптична взаємодія в пристроях зв'язку.....	102
1.5. Енергетичний баланс оптичної транспортної мережі.....	106

1.5.1. Технологічні принципи підвищення енергоефективності оптичних транспортних мереж	106
1.5.2. Аналіз архітектурних рішень для підвищення енергоефективності	108
1.5.3. Коефіцієнт електромеханічного зв'язку	109
1.6. Вибір матеріалу із заданими властивостями для апробації досліджень в пристроях фотонної транспортної мережі.....	110
1.7. Основні невирішені проблеми у фотонних транспортних мережах....	112
Висновки до розділу 1	113
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА МОДЕЛІ ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ	116
2.1. Моделі випадкових графів	116
2.1.1. Модель Ердос-Ренеі.....	116
2.1.2. Узагальнені випадкові графи.....	119
2.1.3. Модель Уотса-Строгатса.....	122
2.1.4. Безмасштабні мережі та модель Барабаші-Альберта	124
2.1.5. Теорія перколяції	125
2.2. Тензорний аналіз при дослідженні телекомунікаційної мережі	127
2.2.1. Основні параметри тензорного представлення в мережі для різних систем координат	129
2.2.2. Незвідні представлення тензорів.....	132
2.2.3. Похідні та диференціювання в тензорному аналізі для телекомунікаційної мережі	134
2.2.4. Узагальнена тензорна модель розрахунку параметрів телекомунікаційної системи	140
2.2.5. Тензорний аналіз для дослідження багатошляхової маршрутизації	142
2.3. Метод діакоптики для аналізу мереж великих розмірів	143
2.3.1. Алгоритм аналізу параметрів телекомунікаційних мереж з багатошляховою маршрутизацією	143

2.3.2. Алгоритм розрахунку параметрів телекомунікаційної мережі методом лінійного програмування на основі транспортної задачі.....	146
2.4. Теорія масового обслуговування.....	151
2.4.1. Одноканальні системи масового обслуговування.....	151
2.4.2. Багатоканальні системи масового обслуговування.....	153
2.5. Модель дослідження просторової анізотропії параметрів кристалофізики для пристроїв фотонної транспортної мережі	154
Висновки до розділу 2	157
РОЗДІЛ 3. ТЕНЗОРНИЙ АНАЛІЗ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ	159
3.1. Практична реалізація криволінійної системи координат в телекомунікаційній мережі	159
3.2. Удосконалена тензорна модель багатошляхової маршрутизації для фотонної транспортної мережі	163
3.3. Дослідження фотонної транспортної мережі методом діакоптики	165
3.3.1. Фотонна транспортна мережа з перерозподілом навантаження....	165
3.3.2. Алгоритм дослідження багаточислової структури транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM.....	173
3.3.3. Апробація методу лінійного програмування на основі транспортної задачі	177
3.4. Дослідження 3D-аналізу просторової анізотропії кристалофізичних параметрів	187
3.4.1. Побудова вказівних поверхонь коефіцієнта електромеханічного зв'язку	187
3.4.2. Побудова вказівних поверхонь коефіцієнта акустооптичної якості в фотонних кристалах.....	192
Висновки до розділу 3	195
РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ.....	197

4.1. Розробка методики визначення енергоспоживання оптичної транспортної мережі	197
4.1.1. Загальний принцип визначення параметру енергоефективності...	197
4.1.2. Математична модель визначення параметру енергоефективності	199
4.1.3. Визначення енергоефективності мережі	204
4.1.4. Визначення параметру енергоефективності на прикладі електро- та акустооптичних пристроїв	207
4.2. Визначення параметру енергоефективності для маршрутизатора транспортної оптичної мережі.....	210
4.3. Визначення параметру енергоефективності для акустооптичного комутатора	213
4.3.1. Визначення параметру енергоефективності при зміні швидкості передачі даних.....	214
4.3.2. Параметр енергоефективності комутатора в залежності від кількості наскрізних каналів	216
4.3.3. Вплив кільцевої топології транспортної мережі на енергетичне споживання акустооптичного комутатора	218
4.4. Визначення параметру енергоефективності для електрооптичного модулятора.....	221
4.5. Вплив типу модуляції на енергетичне споживання фотонних транспортних мереж	224
4.5.1. Вплив ймовірності відмови пристроїв на енергоефективність мережі.....	227
4.5.2. Вплив часу безвідмовної роботи на енергоефективність мережі ..	232
4.6. Енергоефективність мережі при використанні фотоннокристалічних волокон.....	234
4.7. Дослідження енергоефективності транспортних оптичних мереж на основі технологій GMPLS.....	236
4.7.1. Оцінка енергоефективності GMPLS мережі на основі технології об'єднання міток	236

4.7.2. Визначення енергоефективності з використанням технології комутації різних об'єктів	242
Висновки до розділу 4	244
РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ ВИПАДКОВИХ ГРАФІВ	248
5.1. Моделі фотонної транспортної мережі на основі теорії випадкових графів.....	248
5.1.1. Модель Уотса- Строгатса для аналізу середньої довжини шляху та коефіцієнта кластеризації.....	248
5.1.2. Модель Барабаші-Альберта для аналізу фотонної транспортної мережі.....	258
5.1.3. Модель Ердос-Ренеі для аналізу фотонної транспортної мережі..	262
5.1.4. Використання моделі узагальнених випадкових графів для аналізу фотонної транспортної мережі	264
5.2. Завантаженість фотонної транспортної мережі на основі теорії випадкових графів.....	268
5.2.1. Модель Ердос-Ренеі для аналізу завантаженості мережі	268
5.2.2. Модель Уотса-Строгатса для аналізу завантаженості фотонних транспортних мереж	272
5.2.3. Завантаженість в моделі безмасштабних мереж	276
5.2.4. Завантаженість фотонної транспортної мережі в класі моделей узагальнених випадкових графів.....	279
5.3. Дослідження фотонної транспортної мережі з кільцевою топологією на основі теорії перколяції.....	282
Висновки до розділу 5	286
РОЗДІЛ 6. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНОЇ КОМУТАЦІЇ БЛОКІВ У ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ.....	289

6.1. Модель оптичного комутатора на основі акустооптичних комірок....	290
6.2. Ймовірності блокування в оптичному комутаторі блоків.....	293
6.3. Математичний опис оптичної комутації блоків	297
6.4. Використання буфера в оптичному блоці комутації.....	300
6.5. Алгоритм імітаційної моделі оптичної комутації блоків у фотонній транспортній мережі	303
6.6. Аналіз ефективності протоколів TAW та JET в залежності від завантаження мережі	307
6.7. Дослідження ефективності технології OBS при використанні гібридних протоколів сигналізації.....	311
6.8. Дослідження протоколів комутації блоків з використанням теорії перколяції.....	319
6.9. Дослідження енергоефективності оптичного блоку комутації.....	323
Висновки до розділу 6	326
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....	329
ЛІТЕРАТУРА	334
ДОДАТОК.....	372
А. Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень	372
Б. Список публікацій здобувача	375

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ATM – Asynchronous Transfer Mode – асинхронний спосіб передачі даних;

BHP – Burst Header Packet – пакет заголовков блоку;

DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing – щільне хвильове мультиплексування;

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

FGN – Future Generation Network – мережа майбутнього покоління;

GMPLS – Generalized MPLS – узагальнена багатопроTOCOLьна комутація за мітками;

HDWDM – High-Dense Wavelength Division Multiplexing – високощільне хвильове мультиплексування;

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 телекомунікації;

LER – Label Edge Routers – граничний маршрутизатор міток;

LSP – Label Switch Path – шляхи комутації міток;

LSR – Label Switching Routers – мітка комутуючого маршрутизаторів;

MPLS – Multiprotocol Label Switching – багатопроTOCOLьна комутація за мітками;

OADM – Optical Add/Drop Multiplexer – оптичний мультиплексор;

OBS – Optical Burst Switching – оптичний блок комутації;

OLA – Optical Line Amplifier – оптичний лінійний підсилювач;

OOK – on-off keying – включено-виключено (*вид модуляції оптичним сигналом*);

OTN – Optical transport network – оптична транспортна мережа;
OXC – Optical Cross Connect – оптичні кросс-коммутатори;
PM-*i* QAM – Polmultiplexing-*i* Quadrature Amplitude Modulation – поляризаційне мультиплексування - *i* квадратурної амплітудної модуляції (*i*=16 та 32);
PM-QPSK – Polmultiplexing- Quadruple Phase Shifted Keying – поляризаційне мультиплексування- квадратичної фазової модуляції;
PLP – Photon Line Path – фотонний лінійний тракт;
PLT – Photon Line Terminal – фотонний лінійний термінал;
PTN – Photonic Transport Network – фотонна транспортна мережа;
PTS – Photonic Transport System – фотонна транспортна система;
QoS – Quality of Service – якість обслуговування;
SDH - Synchronous Digital Hierarchy – синхронна цифрова ієрархія
SOA – Semiconductor optical amplifier – напівпровідниковий оптичний підсилювач;
TAW - Tell and Wait – відправити і чекати;
АО – акустооптичний;
д.п.в. – довгі пари вузлів;
ЕО – електрооптичний;
ЕОК – електрооптична комірка;
к.п.в. – короткі пари вузлів;
ОЕО – оптоелектрооптичний;
ООВ – одномодове оптичне волокно;
ООО – повністю оптичний, фотонний;
СЄН – сукупна ємність навантаження;
ФКВ – фотонно-кристалічне волокно;
ФК – фотонний кристал.

ВСТУП

Актуальність теми.

Сучасний етап суспільного розвитку нерозривно пов'язаний з 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 передачі особливого значення набувають енергоефективні технології. При цьому виникає сукупність завдань технічного, фізичного та математичного характеру, зокрема побудова ефективних мережних структур на основі новітніх елементів мережної архітектури (засобів та протоколів). Необхідно також впроваджувати мережеві засоби з найбільш ефективним використанням матеріалів для 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 пропускної здатності OTN розробляються та розвиваються технології швидкої комутації. Зокрема, використовують комутацію за мітками – MPLS або GMPLS, а також реалізовується технологія OBS, 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 ФКВ, а також об'єднання існуючих технологій, наприклад IP/MPLS/DWDM.

Завантаженість PTN 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: Стеклов 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 ІТУ-Т 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 PTN.

З метою проведення досліджень існує необхідність у використанні теорій випадкових графів, перколяції та масового обслуговування, що дає змогу визначити параметри PTN 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., Пасечніков І.І., Лебедянцев В.В. Значний доробок зробили і українські вчені Лемешко О.В., Стрелковська І.В., Євсеева 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 PTN. 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 PTN з метою мінімізації енергоспоживання, часових параметрів та ймовірності втрат даних.

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

Отже, **науково-прикладною проблемою** є підвищення ефективності PTN 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 рр.), № 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 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 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 PTN.

Предмет дослідження – моделі функціонування та елементів мережної архітектури PTN.

Методи дослідження. В процесі досліджень використані: теорія масового обслуговування (при дослідженні топологічних властивостей

мережі та протоколів сигналізації технології OBS в залежності від завантаженості мережі), теорія випадкових графів (при дослідженні топологічних властивостей мережі), теорія перколяції (при дослідженні протоколів сигналізації технології OBS), тензорний аналіз (при 3D-аналізі коефіцієнта електромеханічного зв'язку; при використанні методу діакоптики; при дослідженні багатошляхової маршрутизації та протоколів сигналізації технології OBS), теорія ймовірності (при дослідженні протоколів сигналізації технології OBS, зокрема ймовірності втрат; в межах теорії випадкового графа; при дослідженні ефективного використання пристроїв, зокрема при визначенні експлуатаційних характеристик, таких як ймовірність їх відмови).

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 напряму 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 класичними 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 самотійно. У працях, опублікованих у співавторстві, авторові належать: у роботі [1] – отримані результати на основі теорії графів, ймовірності та системи масового обслуговування; у [2] – отримані результати на основі моделей випадкових графів, моделювання і аналізу оптичних мереж; у [3] – отримано співвідношення, запропоновано та описано буферизацію в OBS; у [4]-представлено ймовірність втрат OBS в оптичній мережі; у [5] – розроблено і описано представлену математичну модель; [6-8] – побудовані поверхні та проведено оцінку екстремальних значень; [9] – проведено та описано

теоретичні розрахунки; [10] – вдосконалено модель визначення параметра енергоефективності для OTN; [11] – представлено технічні і архітектурні підходи щодо підвищення енергоефективності телекомунікаційних мереж; [12] – визначено параметр енергоефективності в залежності від зміни швидкості передачі даних для маршрутизатора, АО комутатора і електрооптичного модулятора; [13] – розроблено алгоритм функціонування оптимізаційної моделі багат шарових телекомунікаційних структур за допомогою лінійного програмування методом діакоптики; [14] – розглянуто вплив факторів завантаження на живучість складної мережі; [15] – оцінено параметр енергоефективності для технологій GMPLS; [16] – розроблено та проведено дослідження за допомогою методу діакоптики; [17] – запропоновано структурну схему оптичного комутатора на основі АО комірки; [18, 19] – розроблено тензорну модель дослідження телекомунікаційної мережі кільцевої топології; [20] – запропоновано тензорну модель при дослідженні багатовимірної мережі; [21] – проведено дослідження системи в околі точки, близької до граничного стану; [22-26] – вдосконалено тензорну модель; [27] – розроблено алгоритм дослідження багат шарової транспортної мережі з IP/MPLS/DWDM; [28] – проведено оцінку підвищення ефективності АО модуляторів як компонентів оптичної мережі; [29-32] – проведено теоретичні розрахунки та аналіз отриманих результати; [33] – проведено дослідження енергоефективності телекомунікаційних мережі в залежності від швидкості передачі даних та з використанням фотонно-кристалічних волокон; [34] – розроблено представлену тензорну модель; [35] – проведено аналіз ефективності різних протоколів OBS в залежності від завантаження мережі; [36, 37] – проведено теоретичні розрахунки для тензорної моделі при К - шляхової маршрутизації; [38] – розроблено методи аналізу PTN різної топології; [39] – здійснено постановку задачі та розроблено модель дослідження багат шарової структури транспортної мережі; [40] – проведено дослідження оптичної мережі з маршрутизацією довжин хвиль; [41-50] – постановка задач,

проведено теоретичні розрахунки та аналіз отриманих результатів; [51] – розроблено модель перколяції для PTN; [52, 53] – проведено дослідження енергоефективності мережі для протоколів сигналізації OBS; [54] – визначено енергоефективність ЕО пристроїв в PTN; [55] – вдосконалено модель розрахунку; [56, 57] – проведення теоретичних розрахунків та аналіз ефективного використання модуляторів в волоконнооптичних системах; [58] – аналіз отриманих результатів для АО пристроїв; [59] – запропоновано модель багатоканального комутатора; [60] – запропоновано алгоритм розрахунку; [61-63] – проведено аналіз отриманих результатів для транспортних мереж; [64] – проведено аналіз для багаторівневої мережі; [65-67] – запропоновано структуру оптичного комутатора, здійснено постановку задачі та оцінку розробленої математичної моделі; [68, 69] – проаналізовано використання фотонних кристалів в оптичних транспортних системах; [70, 71] – розроблено модель оптимізації багат шарових телекомунікаційних мереж та проведено розрахунки на основі методу діакоптики; [72-74] – проведено моделювання та оцінка отриманих результатів.

На основі зазначених праць окремі результати увійшли в дисертаційні роботи докторських дисертацій Андрущака А.С., Бурого О.А., Стрихалюка Б.М. та кандидатських дисертацій Думича С.С., Стрихалюка Б.М., Юркевича О.В., Максимюка Т.А.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідалися і обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях:

- Proceeding of IEEE East-West Design & Test Workshop (EWDWTW'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, Україн, 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. – Львів (Україна). – 5-7 квітня 2011.
- 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 (м.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. –м. Київ, Україна

•2016 IEEE Міжнародна конференція з інформаційно-телекомунікаційних технологій та раіоелектроніки (UkrMico'2016/UkrMiso'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 [3–35, 75], з них в журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз – 17 [3–18, 75], у збірниках матеріалів і тез доповідей міжнародних та всеукраїнських конференцій – 40 [36–74, 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.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПОБУДОВИ ТА ТЕНДЕНЦІЙ РОЗВИТКУ ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

На сьогоднішній день попит на телекомунікаційні послуги постійно зростає, що приводить до пошуку нових можливостей збільшення пропускної здатності, які зможуть без проблем впоратися зі зростаючим навантаженням. Для збільшення пропускної здатності використовуються у повній мірі всі можливі сучасні засоби. Яскравим прикладом є один з колишніх рекордів світу з швидкості передачі по одному волокну, який отриманий в лабораторних умовах датськими вченими [77, 78]. У досліді, представленому на рис. 1.1, конвертували швидкість поширення сигналу з 10 Гбіт/с в сигнал 43 Тбіт/с, використовуючи диференціальну квадратурну фазову модуляцію, мультиплексування за часом, поляризаційне мультиплексування та передачу у волокно з декількома сердечниками. Втрати волокна складають 0,2 дБ/км.

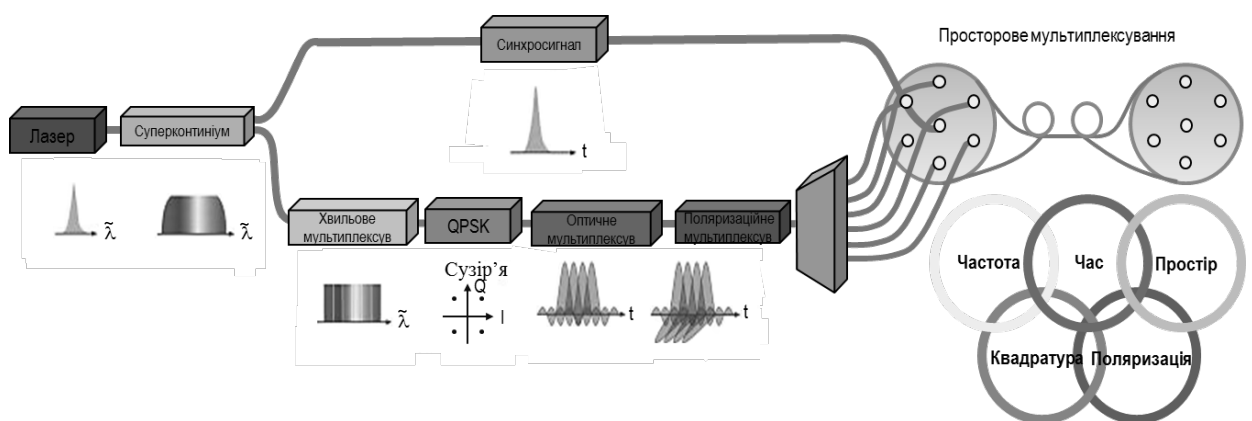


Рис. 1.1. Конвертування сигналу лазера з 10 Гбіт/с в сигнал 43 Тбіт/с [78]

Зростання швидкостей спричинило проблему розподілу інформаційних каналів із забезпеченням вимог до параметрів якості обслуговування. Варто зауважити, що кількісні параметри якості обслуговування в оптичних мережах на даний момент задовольняють всім вимогам, оскільки коефіцієнт появи бітових помилок в каналі дуже низький. Однак, виникає проблема забезпечення часових параметрів, а саме – затримки. Ця проблема зумовлена

тим, що швидкість інформаційних потоків в ООВ (одномодовому оптичному волокні) настільки велика, що існуючі системи комутації не встигають їх обробити, оскільки значний час витрачається на етапі ОЕО перетворення. Зменшення таких перетворень можливе шляхом переходу до фотонних мереж. Повністю оптичні мережі AON (All Optical Networks) або PTN представляють собою клас мереж [79], у функціонуванні яких при обробці (перетворенні, мультиплексуванні, підсиленні) сигналів не використовуються оптично-електронні і електронно-оптичні пристрої, наприклад, регенератори, а застосовуються тільки оптичні технології: оптичні мультиплексори, оптичні лінійні повторювачі, фотонні крос-конектори.

OTN призначені для високошвидкісної передачі інформації в мережах передавання даних, мультисервісних мережах, мережах зберігання на відстані порядку десятків і сотень кілометрів.

OTN використовуються для:

- об'єднання мереж зберігання та / або центрів обробки даних різних організацій;
- побудови транспортної системи операторів зв'язку міського та регіонального масштабу.

Побудова PTN дозволяє істотно знизити витрати на експлуатацію мережевої інфраструктури, мінімізувати інвестиції на модернізацію, а також дозволяє підвищити ефективність роботи мережі.

1.1. Фотонні транспортні мережі та їх різновиди

Мережі PTN можуть будуватися будь-якого масштабу: від локальної мережі до всеосяжних структур, таких як глобальна мережа зв'язку Землі (проект OXYGEN), мережа OPEN, яка об'єднує національні мережі зв'язку практично всіх європейських країн [79].

Загальна структура глобальної інформаційної мережі може бути різноманітна. PTN в узагальненому випадку має ієрархічну структуру, в якій

може бути декілька рівнів: магістральний, регіональний, місцевий (міський) і локальний.

Першим і визначним в цій мережі є магістральний рівень. Це повністю прозора мережа з активною хвильовою маршрутизацією. Характерними пристроями мереж PTN першого рівня є оптичні мультиплексори-демультиплексори, фотонні крос-конектори, транспондери передачі ТЕТ.

Другим за призначенням є регіональний або зоновий рівень мережі PTN. Це також повністю прозора мережа з активною хвильовою маршрутизацією. Зонова мережа, як правило, має кільцеву топологію, основними елементами такої мережі є мультиплексори виділення/введення оптичних трактів.

Третій рівень мережі PTN утворює місцева (міська) повністю прозора мережа з активною або пасивною хвильовою маршрутизацією. Основними компонентами мережі з пасивною хвильовою маршрутизацією є оптичні мультиплексори і демультиплексори. На мережі третього рівня з активною хвильовою маршрутизацією використовуються мультиплексори OADM (Optical Add/Drop Multiplexer – оптичний мультиплексор).

Четвертим рівнем мережі PTN є локальний рівень, основними елементами якого є оптичні термінали. Оптичні термінали мають клієнтські інтерфейси або інтерфейси доступу стандартних додатків. Передавальні електричні сигнали клієнтів, які поступають на ці інтерфейси, перетворюються в оптичні сигнали, що поступають на взаємодіючі пристрої елементів мережі PTN другого або третього рівня.

Архітектура мережі PTN визначена в рекомендації ITU-T G.872 [80]. Вона наслідує ідеї рекомендації ITU-T G.805: «Загальна функціональна архітектура транспортних мереж». Витримуючи принцип незалежності різних ієрархічних рівнів мережі, в рекомендації ITU-T G.872 приводиться чіткий розподіл між магістральною PTN і побудованою клієнтською мережею або мережею доступу. На фотонному рівні здійснюється динамічна реконфігурація транспортної мережі, встановлення мережі на фізичному

рівні, хвильове мультиплексування сигналів, їх передача по ООВ, підсилення в оптичному виді і т.д.

Перевагами даної мережі є [79]:

- велика пропускна здатність, яка надається кожній парі взаємодіючих між собою клієнтів;
- висока надійність зв'язку внаслідок гарантованої смуги пропускання (на кожний оптичний тракт відводиться визначена довжина хвилі);
- прозорість кожного оптичного тракту даної мережі по відношенню до вибору мережевого додатку між терміналами пунктів доступу.

Недоліком PTN є наявність щільно зафіксованих з'єднань по оптичних трактах.

Топологія PTN є: кільцева, коміркова, деревоподібна [79]. У більшості випадків використовується кільцева топологія. Серед переваг кільцевої топології можна виділити:

- практично рівномірне навантаження на вузлах;
- передача даних можлива завжди у двох напрямках і при виникненні проблем в одному з них завжди можна передавати дані в іншому напрямку.

Враховуючи все це, в даній роботі основна увага зосереджена на мережах з кільцевою топологією.

1.1.1. Основні поняття фотонних транспортних систем і мереж

Приклад мережі PTN показаний на рис. 1.2. Елементи мережі PTN можуть містити пасивні оптичні компоненти (регулятори рівня, мультиплексори, розгалужувачі) і активні пристрої (оптичні бустери, оптичні лінійні повторювачі, хвильові конвертори). Навіть якщо управління деякими елементами мережі і окремими пристроями електронне, весь тракт проходження сигналів навантаження залишається оптичним.

Вимога для мереж PTN з комутацією пакетів оптичних трактів обмежується, в основному, наявністю єдиного плану частот лінійного тракту.

Цей план частот повинен відповідати вимогам рекомендації ITU-T G.692, G.694.1, G.694.2 [81-83].

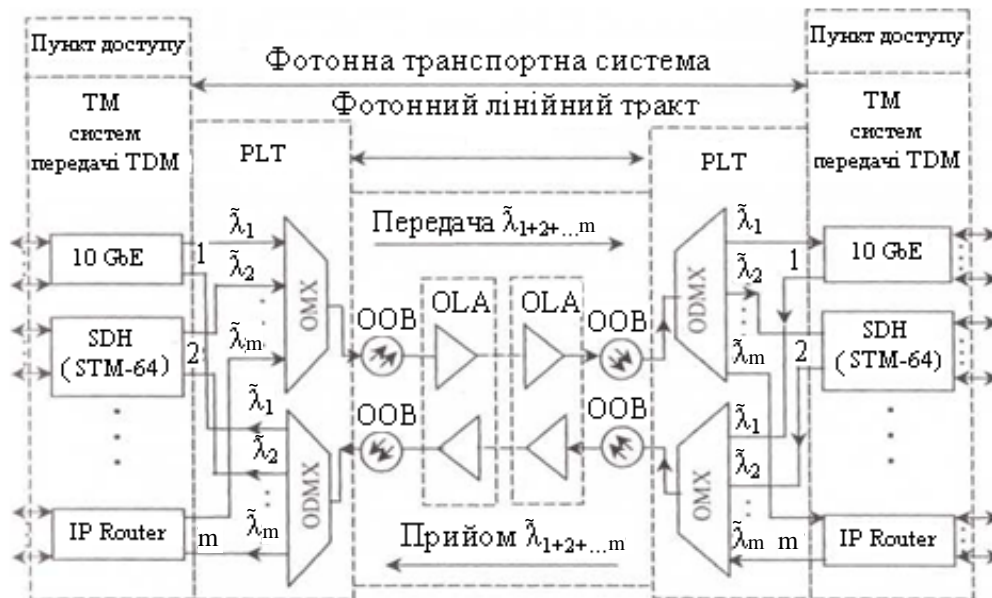


Рис. 1.2. Фрагмент мережі PTN [79]

PTS (Photonic Transport System – фотонна транспортна система) технології хвильового мультиплексування – це комплекс волоконно-оптичних засобів, що забезпечує виникнення в одному ООВ заданого числа оптичних трактів, кожному з яких в робочому діапазоні довжин хвиль (частот) волокна відводиться визначена смуга частот (визначений діапазон довжин хвиль) [79].

PTS може складатися з двох PLT (Photon Line Terminal – фотонний лінійний термінал) і волоконно-оптичного або фотонного лінійного тракту, що їх з'єднує.

PLP (Photon Line Path – фотонний лінійний тракт) – це сукупність оптичних компонентів (ООВ, OLA (Optical Line Amplifier – оптичний лінійний підсилювач), компенсаторів хроматичної дисперсії), які забезпечують передачу оптичних сигналів в межах однієї PTS в діапазоні довжин хвиль, що визначається номінальним (заданим) числом оптичних трактів [79].

PLT PTS технологій хвильового мультиплексування – це сукупність пристроїв, що забезпечують в тракті передачі прийом від абонентів і обробку

передавальних оптичних сигналів, мультиплексування, отриманих в результаті обробки сигналів $\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2, \dots, \tilde{\lambda}_m$, в оптичний сигнал виду $\tilde{\lambda}_{1+2+\dots+m}$, нормування параметрів (підсилення) цього сигналу і ввід його в ООВ лінійного тракту, а в тракці прийому – підсилення прийнятого лінійного сигналу $\tilde{\lambda}_{1+2+\dots+m}$, його демультимплексування на окремі оптичні сигнали $\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2, \dots, \tilde{\lambda}_m$, доведення параметрів цих сигналів до встановлених норм і передача їх клієнтам.

Мультиплексор – пристрій, що забезпечує об'єднання декількох незалежних каналів на передачу і їх поділ на прийомі [84]. Мультиплексор OADM являє собою комплекс пристроїв, який забезпечує виділення/введення заданого числа оптичних трактів в проміжному пункті доступу PLP і транзит решти оптичних трактів в обох напрямках передачі.

Основним елементом в оптичних мережах є оптичний крос-комутатор [85, 86]. Оптичний крос-комутатор або апаратура оперативного перемикання оптичних трактів - це комплекс пристроїв, який забезпечує маршрутизацію і взаємний обмін сигналами різних довжин хвиль між трактами в оптичному вигляді в пункті розгалуження PTN (рис. 1.3). Комутуючи довжини хвиль з вхідних волокон на вихідні, оптичний крос-комутатор вносить гомодинні перехідні перешкоди, які мають ту ж саму довжину хвилі, як і сигнал, і серйозно погіршують характеристики передачі [87, 88].

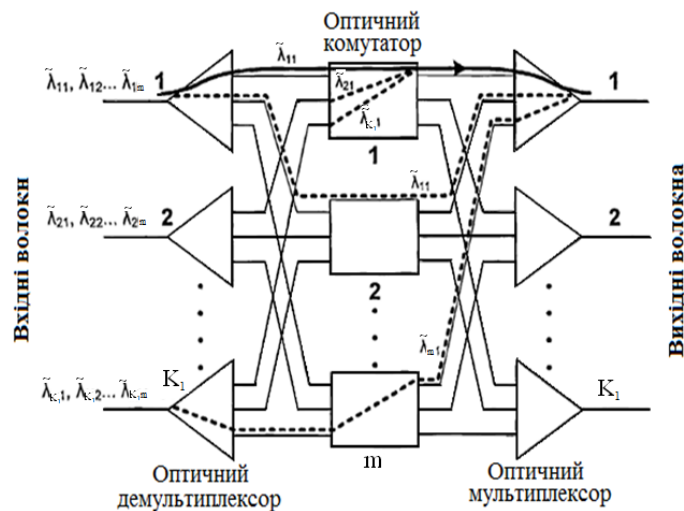


Рис. 1.3. Типова структура оптичного крос-комутатора [62]

У процесі проходження через ООВ сигнал поступово загасає. Для того, щоб його підсилити, використовуються OLA або OLR (Optical Line Repeater- оптичний лінійний повторювач). OAS (Optical Amplifier Section- оптична підсилювальна секція) - це частина лінійного тракту між двома будь-якими сусідніми пунктами або елементами мережі (PLT, OADM, крос-конектор), в яких PLP розділяється на оптичні тракти. Секції OAS можуть бути короткими, середніми і довгими. Поняття “секція OAS”, введене в Рек. ІТУ-Т G.681 [89], еквівалентно поняттю “оптична секція передачі” OTS, визначеному в Рек. ІТУ-Т G.872 [80]. На дальність зв'язку також впливає дисперсія, нелінійні ефекти та інші явища в ООВ. В сучасних оптичних мережах допускається використання так званих 3R електричних регенераторів, але важливо мінімізувати їх кількість [90].

1.1.2. Основні підходи до забезпечення енергоефективності оптичних транспортних мереж

Сучасні телекомунікаційні пристрої споживають приблизно 5% електроенергії із загальної виробленої потужності [91]. Цей параметр буде збільшуватись, враховуючи зростаючий попит на інфокомунікаційні послуги. Тому оператор намагається максимально ефективно використовувати свої ресурси. Власне параметр енергоефективності показує витрати електроенергії на передачу одного біта інформації між двома вузлами. Для зменшення цього параметра оператору слід впроваджувати новітні технології і перш за все позбуватись проміжного ОЕО перетворення.

Центр енергоефективності телекомунікацій в Мельбурні виділяє чотири підходи до вдосконалення мережевої енергоефективності: технологічний, архітектурний, протокольний, хмарковий [92].

В дисертації зосереджено увагу на перших двох підходах і наведено основні принципи зменшення енергоспоживання (рис. 1.4). Ці принципи безпосередньо залежать один від одного (рис. 1.5) і в комплексі впливають на енергоефективність телекомунікаційних мереж.



Рис. 1.4. Принципи підвищення енергоефективності для технологічних і архітектурних підходів

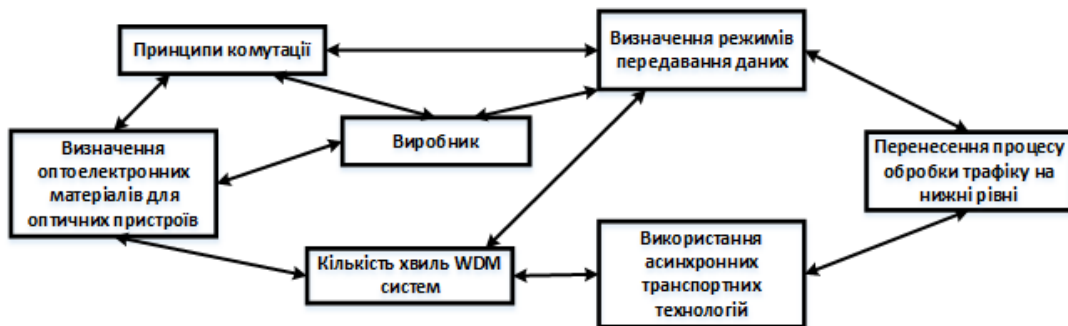


Рис. 1.5. Взаємозалежність підходів підвищення енергоефективності транспортної мережі

1.1.3. Класифікація фотонних транспортних систем

На сьогоднішній день є два основних режими передачі даних. Це режим із ОЕО перетворенням і прозорий режим, де немає проміжного ОЕО перетворення, тобто ООО (повністю оптичний, фотонний). Перший режим характеризується зручністю керування мережею, сумісністю обладнання від різних виробників і здатністю до хвильової конвертації, але вимагає використання енергозатратного ОЕО перетворення на кожному із проміжних вузлів [93]. Головною особливістю прозорості мережі PTN є гнучкість по відношенню до додатків, що використовуються в пунктах доступу (GbE, IP, SDH (Synchronous Digital Hierarchy – синхронна цифрова ієрархія)).

На вищій рівні відбуватиметься передача виключно службових даних або кінцевих даних. Слід зазначити, що прозорий режим передбачає відкриття наскрізного каналу між двома кінцевими вузлами, тобто відбувається резервування часових і спектральних мережевих ресурсів на проміжних вузлах шляху. При комутації каналів у мережі створюється наскрізний канал передачі даних. Наскрізний канал передачі передбачає резервування часових і спектральних ресурсів для передачі певного об'єму даних між двома вузлами транспортної мережі. Такий підхід вимагає розробки методів, які дозволяють максимально завантажувати кожен доступний довжину хвилі. Отже, використання прозорого режиму передавання даних підвищує енергоефективність OTN за рахунок усунення дорогого і енергозатратного ОЕО перетворення, а також розвантажує пристрої верхніх рівнів ієрархії.

PTS класифікують за такими характеристиками [79]:

- за шириною смуги частот, яка відводиться кожному оптичному тракту в робочому діапазоні частот (довжин хвиль) волокна або за відстанню;
- за поколінням або за часом початку виробництва і появи на ринку PTS різних технологій хвильового мультиплексування;
- за призначенням PTS різних технологій хвильового мультиплексування і застосуванням в різних мережах;
- за робочим діапазоном довжин хвиль (частот).

Спектральне ущільнення – це технологія для первинної інфраструктури мультисервісних та мобільних мереж, яка забезпечує суттєве підвищення пропускної здатності мережі та дозволяє практично реалізувати широкий асортимент принципово нових послуг зв'язку.

Існує кілька PTS технологій зі спектральним ущільненням:

1. CWDM (Coarse Wavelength Division Multiplexing – грубе хвильове мультиплексування), у яких відстань по довжині хвилі (по частоті) між сусідніми оптичними трактами складає не менше 10 нм (1250 ГГц) [94]. Такі PTS в сумарному (S+C+L)-діапазоні довжин хвиль 1460...1625 нм одного ООВ дозволяють утворити 8 оптичних трактів.

2. WDM (Wavelength Division Multiplexing –хвильове мультиплексування), де рознос по довжині хвилі – 1,6;3,2;4 або 8 нм, а робочий діапазон довжин хвиль – 1528...1561 нм (діапазон частот 192...196 ТГц). Одне ООВ утворює 4, 8, 10 або 20 оптичних трактів [95].

3. DWDM, у яких рознос по частоті у відповідності з рекомендацією ІТУ-Т G.692 складає 100 ГГц, в сумарному (C+L)-діапазоні довжин хвиль. Одне ООВ утворює 64 або 80 оптичних трактів [96, 97].

4. HDWDM (High-Dense Wavelength Division Multiplexing – високощільне хвильове мультиплексування) мають рознос по частоті (довжині хвилі) у відповідності з рекомендацією ІТУ-Т G.692 50 ГГц (0,4 нм). Сучасні PTS технології HDWDM працюють в сумарному (C+L)-діапазоні довжин хвиль. Одне ООВ утворює 160 або 192 оптичних тракти. Також PTS технології HDWDM утворюють в сумарному (S+C+L)-діапазоні довжин хвиль 1476,81...1619,06 нм одного ООВ утворювати 273 оптичних тракта [98].

5. NWDM (Narrowband Wavelength Division Multiplexing - вузькосмугове хвильове мультиплексування), рознос по частоті (довжині хвилі) складає 25 ГГц (0,2 нм), що дозволяє в С-діапазоні довжин хвиль із смугою 1530...1570 нм одного ООВ утворювати 160 оптичних трактів.

6. UNWDM (Ultra Narrowband Wavelength Division Multiplexing - надвузькосмугове хвильове мультиплексування), рознос по частоті (довжині хвилі) складає від 12,5 ГГц (0,1 нм) до 5 ГГц (0,04 нм).

Загалом сумарна потужність в ООВ не може перевищувати 100мВт (20дБ) [99]. При збільшенні кількості хвиль за рахунок спектрального ущільнення системи треба зменшити потужності кожної хвилі для уникнення нелінійних оптичних ефектів [100]. Це приводить до зменшення довжини регенераційної ділянки і частішого використання регенераторів. Використання додаткової кількості хвиль викликає додаткові капітальні і експлуатаційні витрати. Витрата електроенергії на одну довжину хвилі становить порядку 1,2 кВт [90]. Отже, для підвищення енергетичної

ефективності DWDM мереж треба максимально завантажувати кожен доступну хвилю.

За призначенням PTS технології WDM, DWDM, HDWDM діляться на три великі групи [79].

1. До першої групи відносяться PTN, які використовуються для побудови глобальних підводних (океанських і морських) волоконно-оптичних ліній передачі.

2. До другої групи відносяться PTS, які використовуються на магістральних транспортних мережах окремих країн або між країнами, наприклад, оптична мережа OPEN.

3. До третьої групи відносяться PTS для місцевих (міських) оптичних мереж доступу. Представниками таких систем є PTS OPTera Metro компанії Nortel, Metro і Sentry 4000 компанії Ciena, PPM Metro компаній Ericsson і Marconi.

Діапазони довжин хвиль (частот), призначених для побудови фотонних лінійних трактів, є наступні [79].

1. Перший вид складають PTS, які використовують довгохвильову частину С-діапазона довжин хвиль в межах 1546...1561 нм. Розроблені PTS технології WDM і DWDM, які утворюють 8 і 16 оптичних трактів відповідно. Наприклад, PTS типу TransXpress Infinity WL- 8/16 компаній Siemens в діапазоні довжин хвиль 1548,51...1561,42 нм утворює або 8 оптичних трактів з розносом 1,6 нм (200 ГГц), або 16 оптичних трактів з розносом 0,8 нм (100 ГГц) [101]. Компанією Ericsson розроблено PTS технології DWDM, яка в діапазоні довжин хвиль 1546,92...1558,98 нм утворює 16 оптичних трактів [102].

2. Другий вид утворюють PTS технології DWDM і HDWDM, які займають практично весь С-діапазон довжин хвиль 1528...1561 нм, в якому вони утворюють або 40 оптичних трактів з розносом 0,8 нм (100 ГГц), або 80 оптичних трактів з розносом 0,4 нм (50 ГГц). Типовим представником таких PTS є оптична лінійна система WaveStar OLS-400G компанії Lucent [103].

3. Третім видом є PTS технологій DWDM і HDWDM, які працюють в L-діапазоні довжин хвиль 1570...1625 нм. В L-діапазоні довжин хвиль можна утворити або 64 оптичних тракти з розносом 0,8 нм (100 ГГц), або 128 оптичних тракти з розносом 0,4 нм (50 ГГц).

4. Четвертий вид PTS технологій DWDM і HDWDM, які працюють в сумарному (C+L)-діапазоні довжин хвиль 1528...1613 нм і утворюють 80 оптичних трактів з розносом 0,8 нм (100 ГГц), або 160 оптичних трактів з розносом 0,4 нм (50 ГГц). В якості прикладу можна назвати PTS технологію NWDM, яка в сумарному (C+L)-діапазоні довжин хвиль одного волокна утворює 320 оптичних трактів з розносом 0,2 нм (25 ГГц). Така PTS розроблена компанією Alcatel [98].

5. До п'ятого виду відносяться PTS технології HDWDM і CWDM, які працюють в сумарному (S+C+L)-діапазоні довжин хвиль 1477...1619 нм. Перша з них у вказаному діапазоні довжин хвиль утворює 273 оптичних трактів з розносом 0,4 нм (50 ГГц). Така PTS розроблена компанією NEC [98]. Крім того, в сумарному (S+C+L)-діапазоні довжин хвиль може працювати PTS технології CWDM. Вона утворює 8 оптичних трактів з розносом 20 нм (2500 ГГц) [94, 104].

Приведена класифікація є умовною, межі між різноманітними системами PTS є не завжди визначеними [79].

1.2. Моделі транспортної багаторівневої мережі

Телекомунікаційні мережі постійно розвиваються і перед ними ставляться нові вимоги. Згідно рекомендацій ІТУ-Т – Y.3000-3499 сучасні мережі до 2020 р. мають бути розроблені з багаторівневою архітектурою.

В оглядах [105, 106] розглядають чотири фактори-сегменти, які впливають на створення такої FGN (Future Generation Network – мережа майбутнього покоління).

Сегмент послуг [105, 106] характеризується тим, що в FGN надаватиметься величезна кількість послуг/додатків для задоволення

практично будь-яких запитів споживачів. Як очікується, в FGN число послуг і їх обсяг будуть збільшуватись лавиноподібно. Разом з тим введення нових послуг не вимагатиме істотних капіталовкладень і збільшення експлуатаційних витрат, забезпечуючи при цьому високу надійність і безпеку FGN.

Сегмент даних [105, 106] передбачає оптимізацію FGN у зв'язку з великими обсягами інформації, що передається та обробляється. Під даними розуміється вся інформація, доступна в FGN. Також передбачається, що доступ до послуг FGN буде легким, швидким і якісним незалежно від місця перебування користувача. Кожен користувач FGN отримає свою унікальну адресу, за якою зможе авторизуватися в будь-якій точці світу і отримувати всі необхідні йому послуги.

Екологічний сегмент [105, 106] означає, що FGN будуть екологічно безпечні для навколишнього середовища. Їх технічні рішення повинні мінімізувати вплив на екосистему, скоротити споживання матеріалів і енергії.

Соціально-економічний [105, 106] сегмент передбачає вирішення цілого ряду завдань, пов'язаних зі зниженням витрат на забезпечення життєвого циклу послуг і уніфікацією надання широкосмугового доступу до ресурсів FGN широким верствам населення, що, в свою чергу, послужить стимулом для розвитку світової економіки.

Як було зазначено раніше, сама PTN в узагальненому випадку має ієрархічну структуру, в якій може бути декілька рівнів.

Багатовимірність мережі розглядається, як конструктивний спосіб об'єднання розрізнених структур в єдине ціле. Багатовимірні FGN не обов'язково повинні мати чітко виражене ділення на мережі або підмережі транспорту, доступу і згадані мережі підтримки і сервісу. В FGN стане можливим за рахунок використання багатовимірної структури мережі забезпечувати обмін інформацією і надання різноманітних послуг споживачам [20]. Отже виникає необхідність пошуку нових методів розподілу і комутації потоків.

При такому підході доступ, транспорт, сервіс, підтримка (синхронізація, сигналізація і т.д.) – це внутрішня справа мережі FGN, багатовимірною архітектурою якої надає можливість сумісного вирішення завдань, покладених на складові мережі [107].

Наприклад, IP/MPLS/DWDM мережу можна розглядати як багатовимірну, де є різні вимірювання в транспорті, доступі та різні мережі підтримки і сервісу [27].

Отже, FGN є багатовимірною і, як правило, багаторівневою мережею, в яку інтегрована транспортна мережа, мережа синхронізації, мережа сигналізації і інші мережі підтримки транспорту і доступу, а також сервісні мережі для сумісного надання споживачам (користувачам) надійних, якісних і різноманітних послуг.

Одним з прикладів використання багаторівневої мережі є Grid-технологія. Виконання завдання в Grid-середовищі, побудованому на основі P2P мережі, є трирівневим ієрархічним процесом, на верхньому рівні якого знаходиться метапланувальник, на середньому - локальні планувальники, а на нижньому – фізичні обчислювальні ресурси. Завдання користувачів поступають до черги метапланувальника, розміщеного в середовищі P2P. Цей компонент, використовуючи інформацію від інформаційних сервісів Grid- системи і віддаючи команди сервісам передачі даних P2P мережі і управління завданнями, розподіляє завдання по ресурсах Grid-системи, реалізуючи алгоритм планування з використанням локального планувальника та з урахуванням статистики, що надається інформаційним сервісом MDS – (Metacomputing Directory Service - сервіс метакомп'ютерної директорії).

Для PTN використовується і надалі буде використовуватися маршрутизація довжин хвиль [84, 108, 109]. Це пояснюється декількома особливостями: масштабованістю [95, 110]; просторовим багатократним використанням довжин хвиль; прозорістю послуг. Масштабованість означає

здатність до розширення кількості вхідних і вихідних портів для того, щоб можна було збільшувати розмірність мережі.

Класифікація алгоритмів, які використовуються в оптичних мережах для вирішення задач маршрутизації і розподілу довжин хвиль, наведена на рис. 1.6.

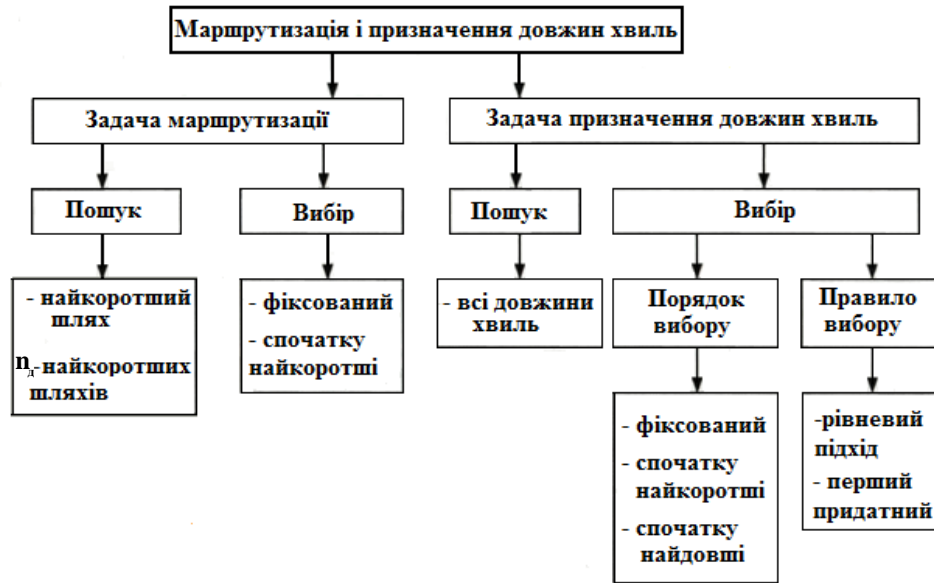


Рис. 1.6. Класифікація вживаних алгоритмів [62]

Для досягнення максимальної ефективності передачі даних по каналах, що мають значно більшу пропускну здатність, ніж канали 100G з фіксованою сіткою частот, необхідна архітектура, в якій використовується багаторівнева комутація. Ця архітектура підвищує ефективність використання смуги пропускання каналу, забезпечуючи агрегацію низькошвидкісних сервісів в OTN як в межах одного каналу, так і між ними, і оптимізує маршрутизацію каналу між кінцевими пунктами маршруту за допомогою оптичної комутації на базі гнучкої сітки частот. Отриманий в результаті «оптичний рівень даних» також ідеально підходить для використання інтегрованого рівня управління, зокрема технологій MPLS, GMPLS та OBS.

1.2.1. Моделі оптичних транспортних мереж

Враховуючи динамічне зростання потреб у передачі інформації, ІТУ-Т розробляє і вдосконалює стандарти на передачу інформації в оптичних

системах [84]. Одним з основних напрямків діяльності ІТУ-Т стало прийняття концепції побудови транспортних мереж, опублікованій у вигляді рекомендації G.805, і розробки моделей транспортних мереж, що базуються на волоконно-оптичних і радіорелейних системах передачі. При цьому основна роль відводиться волоконно-оптичним системам.

В даний час транспортні мережі будуються відповідно до наступних моделей (рис. 1.7) [84]:

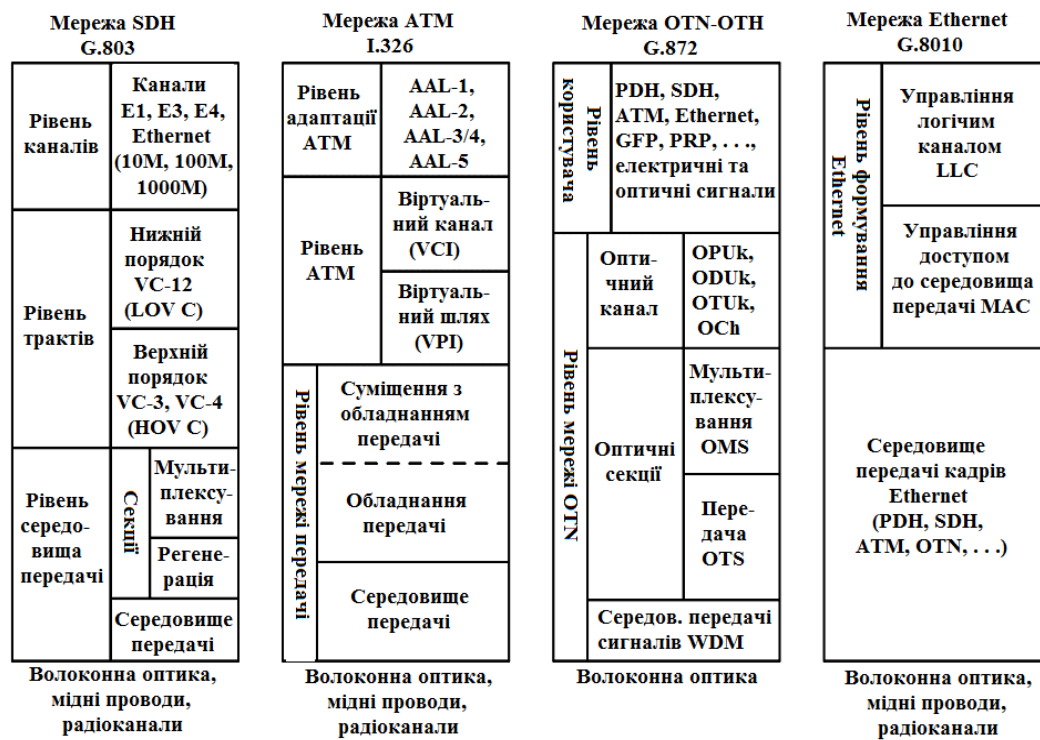


Рис. 1.7. Моделі транспортних мереж зв'язку, визначення ІТУ-Т [84]

- транспортна мережа SDH, рекомендації G.707, G.783, G.803 та ін.;
- транспортна мережа ATM (Asynchronous Transfer Mode — асинхронний спосіб передачі даних), рекомендації I.311, I.326 та ін.;
- транспортна мережа OTN-OTN, рекомендації ІТУ-Т G.709, G.798, G.872 та ін.;
- транспортна мережа Ethernet, рекомендації G.8010, G.8011, G.8012.

Зазначені моделі мають спільні риси [84]:

- ієрархічна побудова, де кожен рівень має самостійний і незалежний від інших рівнів набір функцій;

- наявність фізичного рівня, що представляється системою передачі з організацією секцій;

- утворення трактів (маршрутів) фізичного і віртуального характерів;

- рівні взаємодії з користувачем транспортної мережі.

Багаторівнева побудова транспортних мереж дає чітке уявлення про апаратні, алгоритмічні і мережеві можливості щодо організації взаємодій при передачі інформації.

1.2.1.1. Модель транспортної мережі SDH

Модель транспортної мережі SDH представлена трьома самостійними за своєю організацією рівнями: середовища передачі, трактів (маршрутів передачі інформації), каналів.

Рівень середовища передачі базується переважно на оптоволоконних лініях, в яких створюються секції регенерації лінійних сигналів та секції мультиплексування даних.

Рівень трактів волоконно-оптичної системи передачі починається і закінчується секцією мультиплексування, що може містити від однієї до декількох ділянок регенерації, які необхідні для усунення спотворень лінійних імпульсних сигналів та відновлення їх форми і потужності.

Рівень каналів мережі SDH забезпечує інтерфейси для користувачів транспортної мережі. Враховуючи, що транспортна мережа SDH є частиною первинної мережі зв'язку, на рівні каналів проводиться узгодження з вторинними мережами (користувачами).

Створення та підтримка всіх з'єднань в мережі SDH і контроль всіх функцій забезпечується системою управління, що має мережу виділених каналів зв'язку і засоби протокольної взаємодії через ці канали.

1.2.1.2. Модель транспортної мережі АТМ

Модель транспортної мережі АТМ представлена трьома самостійними за своєю організацією рівнями: середовища передачі, асинхронного режиму передачі, адаптації АТМ.

Поняття «асинхронний» режим означає, що інформація передається

фреймами фіксованої довжини (53 байта), які появляються в довільний інтервал часу. Рівень середовища передачі в моделі транспортної мережі АТМ може бути реалізований, згідно стандартів АТМ, будь-якою системою передачі. При цьому допускається використання будь-якого середовища і устаткування передачі. Рівень АТМ розбитий на підрівні віртуального каналу і віртуального шляху.

Принципова відмінність моделей транспортних мереж SDH і АТМ полягає в наступному:

- транспортний ресурс мережі SDH – тракт високого чи низького порядку – надається в розпорядження користувача постійно, незалежно від інформаційного потоку і з фіксованою швидкістю передачі, що часто є причиною низької ефективності використання з'єднань, наприклад, в телефонії з комутацією каналів при завантаженості каналу від 0,1 до 1,0;

- транспортні ресурси мережі АТМ – віртуальний канал, що підтримується комутаторами з маршрутними таблицями кожного з'єднання, надається тільки при наявності інформаційного навантаження, тобто, коли фрейм АТМ формується і слідує через фізичне середовище. В іншому випадку середовище передачі надається потокам фреймів інших джерел завдяки статистичному мультиплексуванню на рівні АТМ. Це дозволяє в кілька разів підвищити ефективність використання фізичного з'єднання, наприклад, тракту SDH.

1.2.1.3. Модель транспортної мережі OTN-OTN

Модель транспортної мережі OTN-OTN (Optical Transport Network – Optical Transport Hier-archy, оптична транспортна мережа – оптична транспортна ієрархія) має два, самостійні за своєю організацією, рівні: рівень мережі OTN і рівень користувача.

Рівень мережі OTN складається з трьох фізично і логічно пов'язаних підрівнів: середовища передачі сигналів з поділом за довжиною хвилі при спектральному ущільненні (WDM, DWDM та інші); OTS (Optical Transmission Section - оптична секція ретрансляції) і секції OADM; OCh

(Optical Channel - оптичний канал) з навантаженням у вигляді оптичних транспортних блоків OTUk (Optical Transport Unit-k) з включенням до них блоків даних оптичних каналів ODUk (Optical channel Data Unit-k), які, в свою чергу, включають блоки корисного навантаження оптичних каналів OPUk (Optical Channel Payload Unit-k). Індекс k відповідає ієрархічному ступеню OTN ($k = 1,2,3$) і вказує на різні за тривалістю, ємністю та швидкістю передачі циклів.

Рівень користувача OTN OTM-OTN виконує функції інтерфейсу між транспортною мережею та мережами користувачів транспортних послуг, до яких відносяться мережі SDH, ATM, Ethernet та ін. Для ефективного узгодження між мережами застосовуються різні протокольні рішення по розміщенню даних користувачів в оптичних каналах. До таких протоколів можна віднести: загальну процедуру формування кадру GFP (Generic Framing Procedure), протокол захисного пакетного кільця або пакетного кільця з самовідновленням RPR (Resilient Packet Ring) та ін. Протоколи дозволяють узгодити циклічну передачу даних в оптичних каналах з випадковою в часі передачею пакетів даних різної ємності від користувачів, наприклад, пакетів IP, MPLS або Ethernet.

Якщо порівняти три розглянуті моделі транспортних мереж, то можна відзначити, що найбільший транспортний ресурс може забезпечити тільки модель мережі OTN-OTN. При цьому вона підтримує трансляцію даних мереж SDH і ATM. Модель мережі OTN-OTN призначена для мереж зв'язку з великим об'ємом трафіку.

Рівень середовища передачі мережі Ethernet характерний для локальних і міських мереж зв'язку. При організації зв'язку на великі відстані (наприклад, більше 100 км) рівень середовища передачі може бути представлений транспортними мережами SDH, ATM, OTN.

Логічним розвитком моделі мережі Ethernet стала модель транспортної мережі з комутацією по мітках MPLS.

Транспортна технологія SDH, яка ще активно використовується різними

операторами зв'язку, неефективно використовує пропускну здатність каналів і погано адаптується під вибухове зростання IP трафіку [111]. На противагу SDH активно впроваджуються технології OTN та Gigabit Ethernet. Використання цих технологій дозволяє ефективніше використовувати доступну пропускну здатність оптичного середовища, оскільки час відправлення транспортного модуля чи фрейму не є строго визначений і доступна смуга може використовуватись іншим абонентом. Однією із головних переваг технології OTN є використання механізмів корекції помилок FEC (Forward Error Correction), що дозволяє отримати додатково бдБ до оптичного бюджету лінії [112], що є важливим параметром для збільшення довжини регенераційної ділянки. Оптичний бюджет лінії - це прогнозована сума втрат оптичного сигналу на всіх компонентах лінії. Використання асинхронних транспортних технологій разом із розробкою методів перегруповання потоків дозволить зменшити необхідну кількість робочих хвиль, що підвищить енергоефективність транспортних мереж, оскільки витрата електроенергії на одну довжину хвилі (несучу) становить порядку 1,2 кВт.

1.2.2. Багаторівнева комутація

В оптичній мережі існує архітектура багаторівневої комутації, що інтегрує електричну і оптичну комутацію з можливістю переконфігурації [84].

За допомогою багаторівневої комутації можна ефективно агрегувати трафік в канали з боку магістралі для підвищення ефективності використання пропускну здатності, і ці канали потім можна безпосередньо направити по оптичному з'єднанню на вузли, де відбувається введення/виведення трафіку з/в мережу доступу. Таким чином, у двох екстремальних сценаріях можна задовольнитися мінімальною кількістю каналів: у разі недостатнього заповнення каналів при низькій потребі в пропускну здатності, або у випадку дуже високої потреби в пропускну здатності, при якій можна

ефективно заповнити всю смугу пропускання.

Загальна архітектура сучасних телекомунікацій представлена на рис. 1.8, де показано місце OTN.

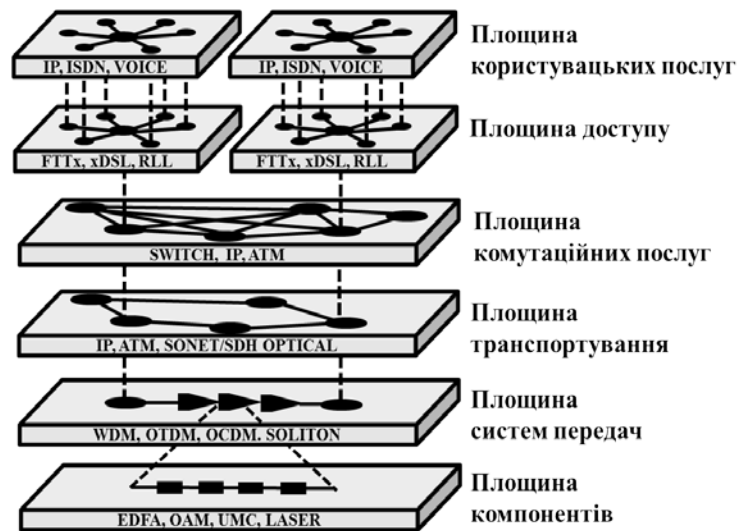


Рис. 1.8. Архітектура телекомунікаційних систем [84]

Площина комутаційних послуг є базовою для створення FGN з їх технічної та економічної доступності для користувачів. Функціонування комутаційних вузлів визначає навантаження (трафік) для транспортних мереж і їх відповідний розвиток.

1.2.3. Багатопротокольна комутація по мітках

Метою механізму багатопротокольної комутації за мітками MPLS є пришвидшення процесу обробки пакетів і забезпечення traffic engineering в IP мережах. Узагальнена багатопротокольна комутація за мітками GMPLS розширює MPLS для забезпечення спільної площини управління (сигналізації і маршрутизації) для пристроїв, що комутують в будь-яких доменах (пакети, блоки даних, хвилі і волокна).

MPLS – це технологія швидкої комутації пакетів у багатопротокольних мережах, заснована на використанні міток [113]. В основі MPLS лежить принцип обміну міток. Будь-який переданий пакет асоціюється з тим або іншим FEC (Forwarding Equivalence Class - клас мережного рівня), кожний з

яких ідентифікується певною міткою [113, 114].

Для явного представлення проходження навантаження через транспортну мережу MPLS потрібно кожен з її вузлів умовно розділяти не лише на вхідний (Ingress LSR (Label Switching Routers – мітка комутуючого маршрутизаторів)) та вихідний (Egress LSR), як в IP, але й на транзитні вузли (Intermediate LSR). Транзитні вузли відповідають ядру мережі MPLS, а саме – IP-маршрутизаторам (LSR), на яких аналіз заголовка мережевого рівня не відбувається, а рішення про передавання пакета наступного маршрутизатора здійснюється тільки на підставі порівняння значення MPLS-мітки з наперед розрахованими значеннями в таблицях маршрутизації. Вхідні та вихідні вузли на рівні відповідають крайовим PE-маршрутизаторам LER (Label Edge Routers – граничний маршрутизатор міток), які присвоюють початкову MPLS-мітку пакетам до їх відправки на IP-маршрутизатори опорної мережі, і видаляють цю MPLS-мітку, коли пакет покидає мережу (рис.1.9).

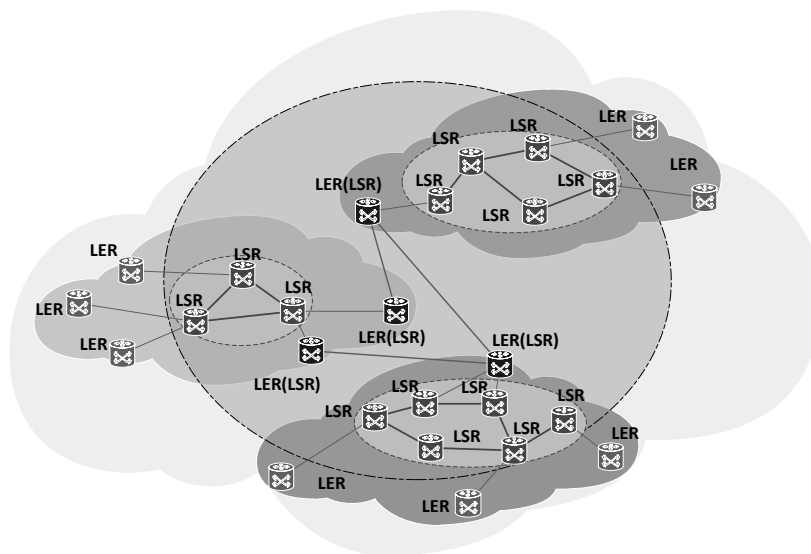


Рис. 1.9. Структура транспортної мережі MPLS

Розподіл міток між LSR приводить до встановлення усередині домену MPLS шляхів з комутацією по мітках LSP. LSR, отримавши пакет за номером інтерфейсу, визначає за значенням прив'язаної до пакету мітки вихідний інтерфейс для нього. Старе значення мітки замінюється новим, що трималося у полі “вихідна мітка” таблиці, і пакет відправляється до наступного

пристрою на шляху LSP [115].

Механізм стека міток дозволяє здійснювати ієрархічне функціонування в мережі MPLS [116]. Розташування технології MPLS в семирівневій моделі ВВС (взаємодії відкритих систем) показано на рис. 1.10 [115].



Рис. 1.10. Площини MPLS

Детальний опис парадигм, механізмів і особливостей роботи GMPLS описано в роботах [117-119].

1.2.4. Основний принцип роботи вузла на базі оптичного комутатора

Для уникнення перетворення оптичного сигналу в електричний і навпаки [79] в сучасній телекомунікаційній мережі розглядається впровадження OBS, яка об'єднала переваги двох технологій DWDM/OCS (Optical Circuit Switching- оптична комутація каналів) та OPS (Optical Packet Switching - оптична пакетна комутація) [120-122].

В якості досліджуваного OBS комутатора використано структуру пристрою, запропоновану в роботі [3] (див. рис. 1.11).

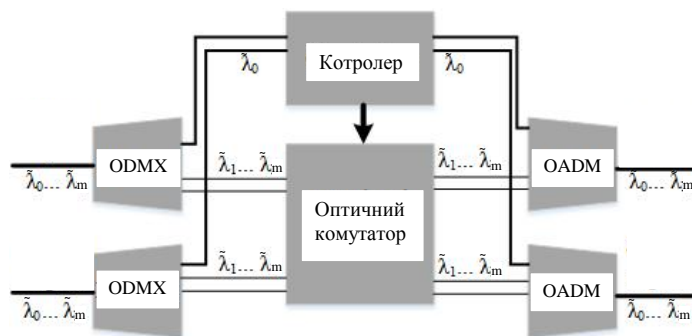


Рис. 1.11. Спрощена структура досліджуваного OBS комутатора

Основний принцип, на якому базується мережа з оптичною комутацією блоків, є розділення інформаційних та службових каналів. Інформаційні канали є ООО і відповідають за комутацію блоків з одного із вхідних каналів на один з вихідних (див. рис.1.11 – передаються від ODMX (Optical Demultiplexer – оптичний демультіплексор) на оптичний комутатор, а потім на OADM), а службові – здійснюють обробку пакетів ВНР (Burst Header Packet - пакет заголовків блоку) з ОЕО перетворенням (див. рис. 1.11 – передаються від ODMX на Controller -контролер, а потім –на OADM).

Канал сигналізації в ВНР відповідає за наступні операції:

- обробка вхідних контрольних пакетів ВНР;
- аналіз класу QoS кожного оптичного блоку, який необхідно передати;
- вибір віртуального каналу за алгоритмом маршрутизації блоків;
- формування комутаційної матриці перемикачів оптичного комутатора;
- перерахунок часу затримки для блоків;
- генерація та передавання контрольних пакетів до наступних вузлів згідно попередньо визначених маршрутів.

Перша ланка є повністю прозорою і відповідає за комутацію блоків з одного із вхідних портів на один з вихідних.

Алгоритм функціонування мережі OBS розроблений з урахуванням того, що вузол побудований за суміщеною архітектурою. Він може бути крайовим і проміжним вузлом в залежності від того, які дані приходять на вхід.

Процес передавання даних в мережі з використанням технології OBS реалізується методом формування віртуального каналу від вузла передачі до вузла прийому. Відповідно пакет ВНР передається по мережі через всі вузли, і кожен вузол формує свою частину каналу до наступного вузла, створюючи в мережі прозорий оптичний канал.

Випадки виникнення колізій та неточностей мають бути враховані в алгоритмах програмованих логічних інтегральних схем (ПЛІС) [123-125]. За рахунок паралельності ПЛІС всі блоки передаються на обробку одночасно, без черг.

В основі роботи OBS лежить застосування часової оптичної комутації, як тільки сформується відповідний блок даних. OBS використовує принцип резервування оптичного каналу для передачі певного об'єму даних. На сьогодні сформовані три основні протоколи сигналізації OBS: TAW, JET і INI [126, 127].

При передачі даних протоколом TAW сигнал "SETUP" відправляється у ВНР для збору інформації про доступність каналу в кожному вузлі уздовж шляху [121]. Блок підтвердження відправляється в зворотному напрямку та резервує канал на певний час (залежно від розміру блоку). Після отримання вихідним вузлом інформації, всі проміжні вузли будуть проінформовані про бажання здійснити послугу з вихідними умовами. Кожен з вузлів визначає як і коли може задовольнити встановлені вимоги.

Така схема сигналізації оптимальна для TCP-данограм (Transmission Control Protocol – протокол управління пересиланням), які вимагають гарантованої доставки (e-mail, uTorrent, Skype). Протокольна діаграма схеми TAW зображена на рис. 1.12.

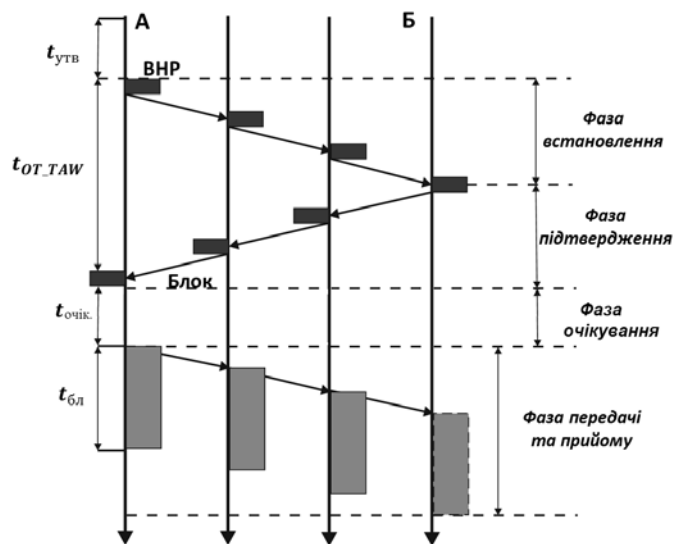


Рис. 1.12. Протокольна діаграма сигналізаційної схеми TAW [3]

Для даного випадку фактично зникає можливість блокування оптичного сигналу, але витрачається час на поширення сигналізації. Коли проміжний вузол не задовольняє необхідні потреби та вимоги, або час передачі в різних

проміжних вузлів не узгоджується, тоді повторно здійснюється зв'язок сигналізації з можливим пошуком альтернативних шляхів. Отже, розглянутий випадок не завжди може бути вдалим, наприклад, для передачі голосових та відео даних.

Необхідно зауважити, що час очікування звільнення всього шляху для передачі інформації між двома віддаленими вузлами може бути значним. Окремі ділянки можуть працювати на холостому ході, очікуючи поки інші комутатори звільняться. У такому випадку мережа на транзитних вузлах може систематично простоювати і неефективно використовуватися. Більш доцільно такі транзитні вузли в проміжку очікування використовувати для передачі інформації для інших маршрутів. Водночас передача даних має бути виконана до початку передачі даних для резервованого раніше маршруту.

Розглянемо роботу сигналізаційної схеми JET [121]. Вузол А відсилає ВНР по контрольному каналу до вузла призначення Б. ВНР обробляється на кожному проміжному вузлі для встановлення повністю оптичного шляху для блоку. Після часу очікування блок відправляється за встановленим шляхом.

Дана схема оптимально підходить для мультимедійного трафіку, для якого мінімальний час затримки важливіший, ніж гарантована доставка. Найчастіше використовується для передавання UDP-данограм (User Datagramm Protocol – протокол данограм користувача). Протокольна діаграма схеми сигналізації JET зображена на рис. 1.13.

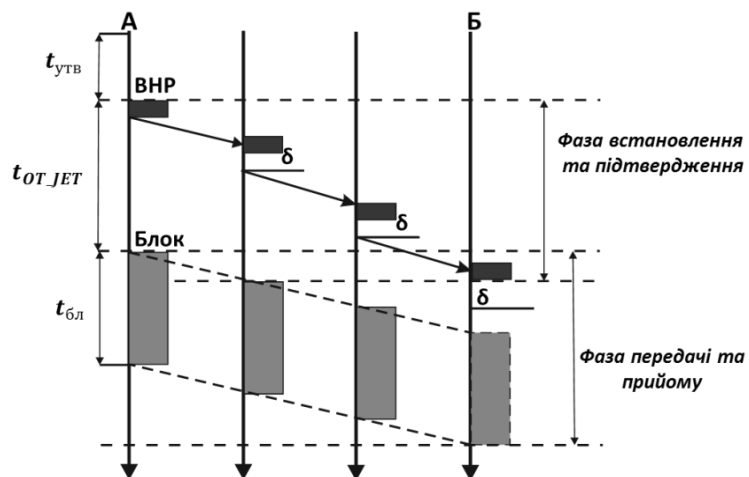


Рис. 1.13. Протокольна діаграма сигналізаційної схеми JET [3]

Альтернативним методом побудови сигналізаційної схеми, на протипагу схемам JET та TAW, виступає рішення, яке поєднує переваги обох методів та дозволяє підлаштовуватись під різні класи трафіку рівня агрегації [121]. Вузол А надсилає ВНР до певного проміжного вузла, який одночасно здійснює резервування каналу в обох напрямках та надсилає блок підтвердження.

Протокольна діаграма схеми INI зображена на рис. 1.14.

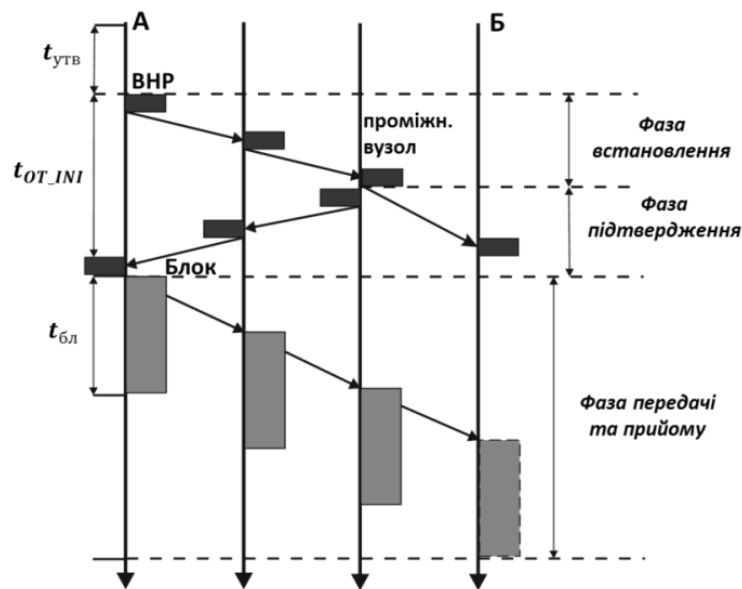


Рис. 1.14. Протокольна діаграма сигналізаційної схеми INI [3]

1.3. Математичні моделі для аналізу оптичної транспортної мережі

Телекомунікаційна мережа розвивається швидкоплинно, що приводить до систематичного ускладнення її аналізу та математичного апарату. Для якісної оцінки дослідженої PTN в роботі було використані системи масового обслуговування, теорія графів і випадкових графів з перколяцією та тензорний аналіз.

При дослідженні телекомунікаційної мережі важливим є визначення якості надання послуг при передачі даних. Важливим моментом є стан мережі, який і впливає на можливість втрат при передачі інформації. Найбільш повно оцінити стан мережі дозволяє теорія масового обслуговування [1, 2]. Система масового обслуговування [1, 2, 128-130] і

теорія графів [2, 131-136] є розробленими методиками і часто використовуються для аналізу телекомунікаційних мереж

Крім того, важливі науково-практичні результати можна отримати за допомогою теорії випадкових графів, тобто графів, в яких ребра розподілені випадковим чином [2, 136]. Телекомунікаційні мережі з різною топологією при дослідженні завантаженості мережі часто є випадковими.

Теорія випадкових графів була представлена [137, 138] після того, як Ердос відкрив, що імовірнісні методи часто виявляються корисними в проблемах із засобами в теорії графів. Теорія випадкових графів аналогічна нескінченномірній перколяції [136].

Математичною основою досліджень багатовимірних та багаторівневих мережевих структур можуть служити багатовимірні матриці [139] та тензорна модель [140-145].

Стан або структура телекомунікаційної мережі може розглядатися як система координат в межах тензорного аналізу [141-144, 146-148], тоді будь-які зміни в мережі відповідають різним системам координат.

Ідея тензорного підходу полягає в тому, що всі вимірювані фізичні величини можна описати тензорами [148].

1.3.1. Теорія графів

Дослідження різних мережевих структур традиційно здійснюється за допомогою теорії графів [2, 132, 133, 149-152].

Для побудови моделей локальних систем зв'язку знайшли застосування методи теорії випадкових графів [136]. Згідно моделей, розроблених з використанням теорії випадкових графів, множина вузлів мережі $\{V\}$ і множина ребер $\{E\}$ утворюють граф G . Відмінними особливостями моделей, побудованих з використанням випадкових графів, є залежності ймовірності появи ребра між парою вершин від умов розповсюдження пакетів.

В теорії випадкового графа та перколяції важливим параметром є p , який визначає ймовірність появи ребра між парою вершин і є відношенням

кількості існуючих ребер n до кількості ребер повного графа $(N(N-1)/2)$, де N – кількість вершим.

Чисельне моделювання випадкових графів [153] підтвердило, що критичні показники перехідної фази рівні критичним показникам в нескінченно вимірній перколяції. Еквівалентність цих двох теорій дуже важлива, тому що це дає можливість поглянути на одну і ту ж задачу по-різному.

Для дослідження випадкового навантаження з неоднорідною зайнятістю в телекомунікаційній мережі доцільним є використання теорії перколяції.

Теорія перколяції – це математична теорія, яка використовується для опису виникнення зв'язних структур в випадкових середовищах (кластерах), що складаються з окремих елементів. В літературі часто вживають терміни теорія протікання і теорія просочування [154].

Теорія перколяції вивчає виникнення шляхів передачі даних в залежності від p [2, 136, 154]. Для малих значень p завантаженість каналів є малою і зв'язок між вузлами може відбуватися без втрат.

Теорія перколяції зручна для аналізу та математичного опису різних критичних явищ [154]. В [154, 155] зазначено, що більшість результатів в теорії перколяції отримані на основі комп'ютерного моделювання і лише з часом окремі результати були доведені. За допомогою перколяційних моделей можна проводити ефективні розрахунки, досліджувати ймовірність відмови в мережі і визначати ступень захищеності та багатозв'язності вузла в телекомунікаційній мережі [154, 156, 157]. Мережеві структури і інформаційні потоки мають пряму аналогію з фізичними процесами, що вивчаються в рамках теорії перколяції [158].

З точки зору теорії перколяції, в певний момент часу параметр p_s – ймовірність зайнятих каналів (зв'язна перколяція) або p_s – вузлів (позиційна перколяція), а $1-p_s$ або $1-p_n$ відповідає ймовірності вільних каналів або вузлів.

В роботі при позиційній перколяції параметр p_c розглядається як ймовірність зайнятості комутаційного з'єднання між різними каналами, тобто ймовірність зайнятості комутаторів на вузлах.

При передачі даних з одного вузла в інший існує велика кількість різних комбінацій можливих шляхів маршрутизації. У певний момент часу кількість шляхів може значно зменшуватися, оскільки окремі канали та вузли в певний момент часу є зайняті. Можлива ситуація, коли мережа є перевантажена і передача між певними вузлами є неможлива. Очевидно, існує критична ймовірність p_c , коли мережа стає квазіперевантажена.

Таким чином, важливою проблемою транспортної мережі є вивчення механізму контролю і керування квазіперевантаженої мережі.

В теорії перколяції важливу роль відіграє виникнення кластерів [136, 154, 159]. Якщо завантаженість мережі в певних ділянках є досить великою, то в певний момент часу можливе виникнення груп сусідніх завантажених вузлів або каналів. Таку цілісну групу називають кластером.

Кластер - об'єднання декількох однорідних елементів, яке може розглядатися як самостійна одиниця, що володіє певними властивостями.

Досліджуються особливості виникнення різних кластерів, визначення розмірів та кількості, а також поява нескінченного кластера. Кластер, в якому є шлях від передавача до приймача, називається перколяційним [154, 155], стягуючим, з'єднувальним [154]. У нескінченній мережі перколяційний кластер нескінченний і єдиний (гігантська компонента). Основні наукові праці з теорії перколяції важливу роль виділяють у дослідженні єдиного кластера.

1.3.2. Тензорний аналіз

В роботах [19, 21, 142-144, 147, 160] дослідження телекомунікаційних мереж за допомогою тензорного аналізу проводиться по аналогії з електричними мережами [140, 161].

Тензор – це математичний об'єкт, представлений набором компонент

(проекцій тензора), який не залежить від зміни системи координат, але його компоненти при зміні системи координат перетворюються по визначеному математичному закону. Тензор можна представляти в координатній і безкоординатній формі [162].

В координатній формі тензор – це математичний об’єкт з верхніми (контраваріантними) та нижніми (коваріантними) індексами, який перетворюється по закону:

$$\mathbf{T}_{m'n'...}^{k'l'...} = \mathbf{T}_{mn...}^{kl...} \frac{\partial x^{k'}}{\partial x^k} \frac{\partial x^{l'}}{\partial x^l} \cdots \frac{\partial x^m}{\partial x^{m'}} \frac{\partial x^n}{\partial x^{n'}} \cdots \quad (1.1)$$

де $\partial x^{k'}/\partial x^k, \dots$ - є частинними похідними функцій, що задають нові координати відносно старих та навпаки.

В безкоординатному визначенні, тензор це полілінійна форма на векторах $(\mathbf{v}, \mathbf{w}, \dots)$ і ковекторах $(\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{r}}, \dots)$ тобто:

$$\mathbf{T}[\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{r}}, \dots, \mathbf{v}, \mathbf{w}, \dots] \in \mathbb{R}, \quad (1.2)$$

яка є лінійна по всім аргументам.

Зв'язок між безкоординатною та координатною формою визначення тензора можна представити як:

$$\mathbf{T}[\tilde{\mathbf{u}}, \tilde{\mathbf{r}}, \dots, \mathbf{v}, \mathbf{w}, \dots] = \mathbf{T}_{mn...}^{kl...} u_k r_l \dots v^m w^n \dots,$$

і навпаки:

$$\mathbf{T}_{mn...}^{kl...} = \mathbf{T}[\mathbf{e}^k, \mathbf{e}^l, \dots, \mathbf{e}_m, \mathbf{e}_n, \dots].$$

Зауважимо, що ковектори визначаються:

$$\tilde{\mathbf{u}} = u_k \mathbf{e}^k, \quad (1.3)$$

а вектори:

$$\mathbf{v} = v^m \mathbf{e}_m, \quad (1.4)$$

де u_k – контраваріантна, v^m – коваріантна компоненти (проекції тензора), а \mathbf{e}^k та \mathbf{e}_m – базиси відповідних систем координат у просторі.

В [162, 163] при безкоординатній формі запису тензора не записують вектори та ковектори, наприклад, для (1.2) записують лише \mathbf{T} .

В тензорному аналізі для електричних мереж [140] Г. Крон використовував для побудови теорії тільки вимірювані, фізично існуючі величини – напругу і струм. Аналогічні величини існують і в телекомунікаційній мережі [142].

Методологія тензорного підходу до аналізу телекомунікаційної мережі полягає в наступному [21, 142, 144, 148]:

1. Геометризація системи: введення понять простору, систем координат і правил їх перетворення.

2. Інваріантне представлення рівнянь поведінки системи, її основних властивостей і характеристик. Визначення інваріантів, коваріантних і конраваріантних величин.

3. Обґрунтування і вибір множини систем координат, у рамках яких можливо здійснити розрахунок шуканих параметрів телекомунікаційної системи.

За допомогою тензорних методів можна обчислювати характеристики системи зв'язку при зміні навантаження в мережі. Адекватно математично такі мережі можна описати за допомогою тензорного аналізу з використанням диференціальної геометрії. Представлення передачі даних у вигляді мережі простору з розглядом криволінійного підпростору шляхів дає можливість описувати поведінку різних параметрів, наприклад, навантаження досліджуваної мережі [23, 142]. Диференціальна залежність стану мережі від кількості даних на шляхах дозволяє дослідити її динамічну поведінку у будь-якому випадку [164]. В певний момент часу стану мережі відповідає певна точка в досліджуваному геометричному просторі. Всі зміни стану телекомунікаційної мережі, які можуть спостерігатися, попадають в окіл навколо цієї точки. Очевидно, що з часом навантаження у мережі буде змінюватися, отже, буде змінюватися і стан мережі.

В даній роботі також використовується тензорний аналіз для опису кристалофізичних ефектів та явищ. Необхідно зазначити, що в кристалофізиці орієнтація досліджуваних зразків здійснюється таким чином,

що трійка системи координат є ортогональна [162, 165]. Триplet базисних векторів вибираються нормованими по довжині. В такому випадку коваріантні і контрваріантні базисні вектори геометрично суміщаються. При цьому майже всі роботи пов'язані з кристалофізикою та кристалооптикою не розрізняють коваріантні та контрваріантні представлення, і всі індекси тензорів, які відповідають за базис системи координат, є нижніми [162, 163, 165-168]. В існуючих [169, 170] довідниках індекси кристалофізичних тензорів також є всі нижніми. Хоча є теоретичні роботи, наприклад [162, 171], які розрізняють коваріантні та контрваріантні представлення. В роботі [163] також їх розрізняють як в (1.3) та (1.4), де зазначається, що в загальному це зводиться до формального признаку. Враховуюче це, в даній роботі для кристалофізичних тензорів індекси будуть лише нижніми. Крім того, кристалофізичні тензори часто записують для зручності у матричній формі [166, 167, 169-172]. Важливо зазначити, що перехід між тензорним записом і матричною формою відрізняється в залежності від симетрії тензора, особливості переходу представлені в [162].

1.4. Елементи та пристрої в фотонній транспортній мережі

У розвитку сучасних технологій важливу роль відіграють оптоволоконні технології, зокрема, зв'язані з використанням нових типів волокон з унікальними характеристиками.

1.4.1. Властивості і застосування фотонно-кристалічних волокон

Структура ФК (фотонного кристалу) має просторово – модульовану діелектричну постійну середовища, період модуляції якої співмірний з довжиною хвилі, що поширюється. За характером зміни показника заломлення ФК можна розділити на три основні класи: одномірні, двовимірні і тривимірні (рис. 1.15). В кожному випадку в одному, двох і трьох просторових напрямках змінюється періодично показник заломлення [173].

Освоєння ФК структур пов'язано з можливістю отримання лазерів нового типу, оптичних комп'ютерів, зберігання і передачі інформації, що дозволяє побудувати мережі повністю без ОЕО перетворення, тобто РТН. ФК використовуються при створенні різних пристроїв: дефлекторів, фільтрів, лазерів, хвилеводів, приймачів випромінювання. Волокна на основі ФК стійкі до втрат на згинах, їх використовують у ролі ОLA, перемикачів та компенсаторів дисперсії.

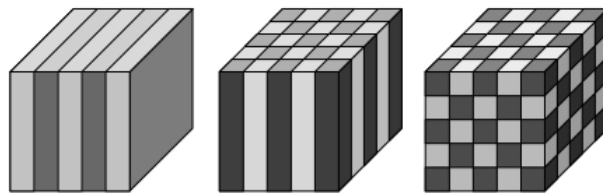


Рис. 1.15. Типи ФК

ФКВ (фотонно-кристалічне волокно) представляють собою мікроструктуру зі скла або кварцу з періодичною системою циліндричних повітряних отворів, орієнтованих уздовж осі волокна [174]. Дефект структури, що полягає у відсутності одного чи кількох повітряних отворів, є серцевиною ФКВ, а періодична структура - оболонкою (рис. 1.16).

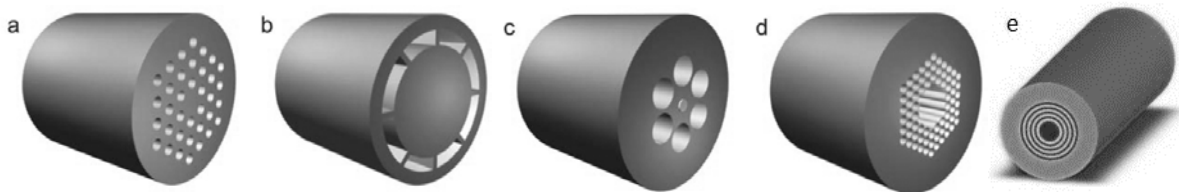


Рис. 1.16. Різні типи ФКВ: (а) одномодове порожнинне волокно; (b) багатомодове волокно; (c) активне створюване волокно; (d) порожнисте волокно з ФК із забороненою зоною; (e) бреггівське волокно

Недоліком ФКВ є більші втрати у порівнянні зі звичайними волокнами [69], а також складність при з'єднуванні. Це пов'язано із складністю технологічного процесу виготовлення, яка разом із вартістю ФКВ стримує впровадження і розповсюдження таких волокон. Водночас ФКВ з пустою

серцевиною теоретично можуть мати втрати на рівні 0,0005 дБ/км.

У ФКВ можна спостерігати негативну рефракцію [175], при якій вектор групової швидкості заломленої хвилі утворює гострий кут з тангенціальною компонентою хвильового вектора падаючої хвилі. Негативна рефракція дає додаткові можливості маніпулювання променями.

Дисперсійні властивості ФК відкривають можливості для виготовлення суперпризм [176]. Явище від'ємного заломлення [177] дозволяє подолати дифракційну межу і фокусувати світло в точку, розмірами менше довжини хвилі (суперлінзи).

ФК також можна розділити на провідники, ізолятори, напівпровідники і мультиплексори [173]. Фотонні ізолятори володіють широкими забороненими зонами. На відміну від звичайних непрозорих середовищ, в яких світло швидко згасає, перетворюючись на тепло, фотонні ізолятори світло не поглинають.

На рис. 1.1 було використано за допомогою ФК явище суперконтинуум. Суперконтинуум — це когерентне електромагнітне випромінювання з надшироким спектром [178]. Генерація суперконтинуума може мати досить різноманітні застосування, наприклад в якості ширококутового джерела для розділення довжин хвиль у мультиплексних системах зв'язку. У системах телекомунікаційного мультиплексування високої щільності по довжинах хвиль замість численних джерел спектральних каналів може використовуватися суперконтинуум з генеруванням понад 1000 каналів [179].

Аномальна дисперсія ФК приводить до ефекту, названого надпризмивим. Цей ефект використовується в демультимплексорах по довжині хвилі [180]. Високий ступінь локалізації фотонів всередині ФК відкриває можливість вирішення проблем створення квантових комп'ютерів [181].

На даний час вдалося продемонстрували роботу фотонного маршрутизатора [182].

1.4.2. Анізотропні оптичні волокна

Для зберігання в оптичному волокні деякого виділеного стану поляризації світла використовуються виготовлені за спеціальною технологією анізотропні волокна. В даному випадку використовують ефект фотопружності для штучної підтримки поляризації світлового сигналу в волокні, шляхом введення в конструкцію спеціальних силових елементів з відмінним від решти матеріалу коефіцієнтом термічного розширення, що сприяє створенню поля внутрішньої напруги. Ця напруга, з одного боку, повинна бути певного рівня для забезпечення необхідних оптичних характеристик волокна, а з іншого боку не повинна порушувати міцність волокна.

Такі волокна створюють певні проблеми при стиковці в оптичних роз'ємах. Інтерес до анізотропних оптичних волокон обумовлений можливістю створювати розгалужувачі сигналів, самофокусуючі оптичні волокна, а також істотно зменшити поляризаційну модову дисперсію [183].

В основу реалізації даних пристроїв покладено властивості анізотропного середовища: подвійне променезаломлювання, тензорний характер діелектричної проникливості, поляризаційна дисперсія [76].

В РТН з високою інтенсивністю електромагнітних хвиль істотного значення набувають нелінійні оптичні ефекти [184, 185]. Водночас нелінійна крос-модуляція виникає між “швидкою” і “повільною” хвилями, змінює поляризацію у волокні і формує нові двозаломлюючі властивості.

В таких умовах відбувається зміна постійних поширення мод і дисперсійна затримка між ортогональними оптичними модами.

1.4.3. Оптичні модулятори в мережах зв'язку

Згідно ГОСТ 24375-80, термін «модуляція» трактується як процес зміни одного або декількох параметрів несучої хвилі відповідно до змін параметрів переданого сигналу. ГОСТ 15093-75 трактує термін «лазерний модуляційний пристрій» як пристрій управління лазерним випромінюванням, призначеного

для зміни за заданим законом в часі t (чи) в просторі одного або декількох параметрів лазерного випромінювання або його положення.

Параметри лазерного випромінювання, які змінюються в процесі його модуляції, називаються інформаційними.

Інформаційними параметрами когерентного оптичного випромінювання є незалежні параметри плоскої монохроматичної хвилі [186]: амплітуда напруженості поля, частота зміни поля в часі, вид поляризації, направлене обертання поляризації, початкова фаза коливань, напрям поширення хвилі. Тоді, очевидно, за типом змінюваного інформаційного параметра модулятори когерентного випромінювання оптичного діапазону можуть бути амплітудні, частотні, фазові, поляризаційні, просторові [187].

В системах передачі даних із швидкістю до 1 Гбіт/с використовуються лазери із внутрішньою модуляцією. При високих швидкостях передачі даних такий тип модуляції приводить до нестійкості лазера, що негативно позначається на передачі даних. Тому в високошвидкісних лініях передачі використовують напівпровідникові лазери із зовнішньою модуляцією [188], принцип роботи яких базується на ЕО ефекті чи АО взаємодії.

1.4.4. Оптичні комутатори в мережах зв'язку

Електричні комутатори повільні і тому не здатні працювати із великими пропускними здатностями. Існує широкий вибір повністю оптичних комутаторів, який представлений в табл.1.1, і були зібрані з технічних характеристик реальних пристроїв, а також сучасних наукових досліджень в напрямку фотонних комутаторів.

MEMS комутатори, хоч і характеризуються низькими втратами, але мають низький час комутації [189], що не відповідає сучасним вимогам. Недоліками термооптичних комутаторів є низький час комутації і великі втрати [190]. За технічними характеристиками комутатори на магнітооптичній [191] та рідкокристалічній [192] структурі відстають від пристроїв, які базуються на АО [193] та ЕО основі [189], що на сьогоднішній

день має практичне значення. Комутатори на основі цих оптичних ефектів характеризуються високим часом комутації, а також низьким енергоспоживанням.

Таблиця 1.1.

Порівняльна характеристика видів повністю оптичних комутацій

Тип комутації	Час комутації	Втрати, дБ	Споживання, мВт	Виробник
Механікооптична	<20мс	<1.15	420	LightBend
	<4мс	<0.6	230	JDSU
	<10мс	<1.3	420	LightBend
MEMS	<10мс	<1.8	325	JDSU
	<30мс	<2.4	500	DiCon
	<10мс	<1.3	170	Agiltron
	<20мс	<1.1	40	Sercalo
ЕО	<10нс	<4	9,4	EOspace
магнітооптична	<200мкс	<1.2	30	Gigalight
рідкокристалічна	<100нс	<3	-	Fraunhofer
термооптична	<22мс	<7.5	11	[190]
АО	<10мкс	<1	-	[193]

1.4.5. Аналіз використання електро- та акустооптичних комутаторів і модуляторів

Вище були наведені переваги використання ЕО та АО пристроїв, проте дані пристрої мають ряд відмінних технічних характеристик, які в цілому впливають на роботу мережі. До цих характеристик належать: масштабованість, швидкість комутації та втрати, що вносяться.

ЕО комутатори в порівнянні із АО є менш зручні, оскільки мають лише два входи та два виходи (система 2x2). Для створення комутатора mxm за схемою Бенеша необхідно $m(2\log_2 m - 1)/2$ ЕО комутаторів 2x2, де m –

необхідна кількість входів/виходів [194]. Наприклад, для комутатора 8x8 необхідно 20 ЕО комутаторів 2x2 за за схемою Бенеша.

Враховуючи сьогоденні масштаби волоконно-оптичних систем передачі даних, кількість хвиль і волокон, реалізація таких комутаторів для великих мереж є складною технічною задачею. Крім складної системи управління, слід зауважити, що ланка комутатора 2x2 в середньому вносить a власних втрат, значення яких на сьогоднішній день коливається від 2,5 до 5дБ [195]. При багатоланковій побудові (наприклад, за схемою Бенеша) кожна хвиля має пройти $2\log_2 m - 1$ ланок 2x2. Отже, втрати для кожної хвилі: $a_z(2 \log_2 m - 1)$, де a_z – затухання кожної із ланок. Це в свою чергу приводить до використання додаткових оптичних підсилювачів, внаслідок чого є зростання як капітальних, так операційних затрат оператора, в тому числі і витрат на електроспоживання. Однак суттєвою перевагою ЕО комутаторів є швидкий час комутації – близько 10нс [195].

При використанні АО комутаторів проблема масштабованості та втрат вирішується відносно простіше і фактично зникає необхідність створювати багатоланкові структури. Це також впливає на втрати такого комутатора, які приблизно становлять 2дБ для пристрою на основі кристалу TeO_2 [196]. Швидкість комутації для цього пристрою становить приблизно 10мкс [192], що є гіршим на порядок від ЕО комутаторів, однак відповідає сучасним вимогам до параметру затримки. Звідси можна зробити висновок, що використання АО комутаторів в OTN має переваги над ЕО [73].

На відміну від комутаторів, характеристики параметрів АО та ЕО модуляторів, а саме: робочий діапазон довжин хвиль, ширина смуги модулюючих частот, втрати, інерційність та ін. є приблизно однаковими. Проте важливим параметром, який розділяє два види оптичних модуляторів, є фактор якості, що є відношенням потужності збудження до одиниці частот при еквівалентній 84% модуляції інтенсивності. Для ЕО модулятора на основі кристалу ніобату літію параметр фактору якості становить 7мкВт/МГц [197], а для АО – наприклад на основі $\text{As}_{40}\text{S}_{60}$, становить 1,75мВт/МГц. Для

інших акустичних матеріалів фактор якості коливається від 0,78 до 1,75мВт/МГц. На основі цих даних можна зробити висновок, що ЕО модулятори є кращими, оскільки забезпечують необхідну модуляційну ефективність при менших енергетичних витратах [73].

1.4.6. Електрооптичний ефект в оптоелектронних пристроях

В основі ЕО ефекту лежить зміна оптичних характеристик твердого тіла (монокристалів) під дією електричного поля [167, 198].

Для опису оптичних характеристик в анізотропних середовищах використовується тензор діелектричної непроникливості a_{js} ($j, s = 1, 2, 3$), який ще називають тензором поляризаційних констант. Тензор a_{js} є матеріальним симетричним тензором другого рангу. В головній кристалооптичній системі координат тензор поляризаційних констант складається лише з діагональних компонент a_{ii}^o , які пов'язані з показником заломлення n_i співвідношенням [165, 167, 198]:

$$a_{ii}^o = 1/n_i^2. \quad (1.8)$$

Під час дії електричного поля тензор поляризаційних констант a_{ii}^o змінюється на a_{js} . Отриману зміну поляризаційних констант представляють у вигляді [162, 198, 165]:

$$\Delta a_{js} = a_{js} - a_{ii}^o = r_{jsn} E_n, \quad (1.9)$$

де r_{jsn} – ЕО коефіцієнт, симетричний по першій та другій парі індексів, розмірність якого м/В.

Як було зазначено, для зручності використовується матрична форма запису. Можливість такого представлення виникає, коли тензор симетричний по деяким парам індексів. По цим індексам робиться згортка: якщо $j = s$, тоді індекси $i, m = 1, 2, 3$; якщо $j \neq s$, тоді $i = 9 - j - s$. Тензор Δa_{js} є симетричний, отже, $\Delta a_i = \Delta a_{js}$ [162, 167]. Враховуючи це, можна записати перехід до скороченого запису індексів для тензорів ЕО ефекту в матричному вигляді: $r_{j\text{spc}} = r_{iw}$ [162, 198]. Враховуючи останнє, (1.8) і (1.9) перепишемо в

матричному вигляді:

$$\Delta a_i = r_{im} E_m. \quad (1.10)$$

Показник заломлення n знаходимо на основі формули [163]:

$$n_{\alpha}^{-2} = \mathbf{i}_{\alpha} \boldsymbol{\eta} \mathbf{i}_{\alpha}. \quad (1.11)$$

де \mathbf{i}_{α} - одиничні вектори напрямку поляризації світла; $\boldsymbol{\eta}$ - тензор діелектричної проникливості, причому компоненти цього тензора зв'язані з відповідними коефіцієнтами діелектричної непроникливості в матричному вигляді: $\eta_i = 1/a_i$.

PTN із швидкістю вище 10 Гбіт/с вимагають використання зовнішніх модуляторів [188, 199]. Об'єктом дослідження стали зовнішні ЕО модулятори згідно рис. 1.17. Досліджуваний ЕО модулятор складається з контролера, генератора напруги і електрооптичної комірки (ЕОК). ЕОК – це кристал з електродами. Контролер здійснює управління модулятором і керує генератором напруги.

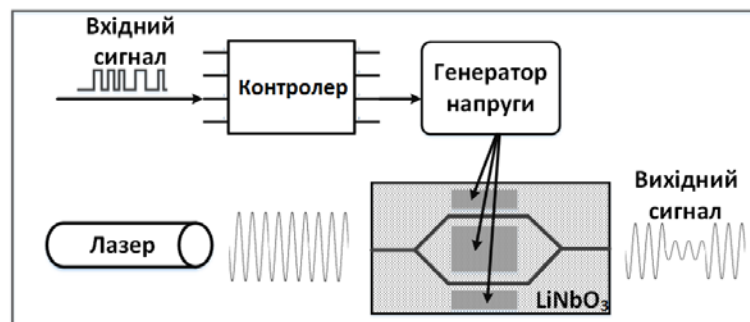


Рис.1.17. Структурна схема досліджуваного ЕО модулятора

1.4.7. Акустооптична взаємодія в пристроях зв'язку

Акустична хвиля при поширенні в середовищі утворює локальні стискування. Внаслідок ефекту фотопружності виникає зміна діелектричної проникливості зі створенням періодичних шарів, які рухаються з швидкістю звуку. При проходженні світла через таку шарову структуру виникає АО дифракція [200].

Розрізняють три основні випадки дифракції [201, 202]: режим Рамана - Ната, режим Брегга та перехідна область. Випадки розрізняють безрозмірним

параметром $Q_a=2\pi L_a \tilde{\lambda}/\Lambda^2$, де L_a - довжина АО взаємодії; $\tilde{\lambda}$ - довжина світлової хвилі; Λ - довжина звукової хвилі [203]. Отже, для режиму Рамана - Ната $Q_a \ll 1$, для режиму Брегга - $Q_a \gg 1$, а для перехідної області - $Q_a \approx 1$. В роботах [201, 204] зазначається, що на практиці режим Рамана - Ната можна спостерігати при $Q_a \leq 0,3$, а дифракцію Брегга - при $Q_a \geq 4\pi$.

В АО найбільше прикладне значення має режим Брегга, оскільки він дозволяє досягти найбільш ефективних характеристик [205]. Для режиму Брегга закони збереження енергії та імпульсу при взаємодії акустичної та світлової хвилі через фотон - фононне розсіяння записуються у вигляді [206, 207]:

$$\omega' = \omega \pm \Omega, \quad \mathbf{k}_o' = \mathbf{k}_o \pm \mathbf{K}_a, \quad (1.12)$$

де ω , ω' та Ω - циклічні частоти падаючої, дифрагованої світлової хвилі та акустичної хвилі відповідно, \mathbf{k}_o , \mathbf{k}_o' та \mathbf{K}_a - їх хвильові вектори. Знак плюс відповідає поглинанню фонона, мінус - виникненню.

В анізотропному середовищі можливі ізотропна та анізотропна дифракції. Ізотропна дифракція реалізується, коли хвильовий вектор падаючої та дифрагованої хвиль скалярно рівні ($|\mathbf{k}_o'| = |\mathbf{k}_o|$) із забезпеченням умови [207, 208]:

$$K_a = 2k_o \sin\theta_B. \quad (1.13)$$

Якщо скалярні величини хвильового вектора відрізняються ($|\mathbf{k}_o'| \neq |\mathbf{k}_o|$) [209], то дифракцію називають анізотропною. Можна визначити кути падіння θ_B і дифракції θ_D світлової хвилі, як функції акустичної частоти [207, 208]:

$$\begin{aligned} \sin\theta_B &= [(\tilde{\lambda} f)/(2n_\mu v)] [1 + (n_\mu^2 - n_v^2) v^2 / (f_a^2 \tilde{\lambda}^2)], \\ \sin\theta_D &= [(\tilde{\lambda} f)/(2n_v v)] [1 - (n_\mu^2 - n_v^2) v^2 / (f_a^2 \tilde{\lambda}^2)], \end{aligned} \quad (1.14)$$

де $f_a = v/\Lambda$ - частота акустичної хвилі; v - швидкість акустичної хвилі; n_μ , n_v - показник заломлення для падаючої та дифрагованої хвилі, відповідно.

Ефективність дифракції - це відношення інтенсивності дифрагованого I_1

до інтенсивності падаючого I^0 світла: $\chi = I_1/I^0$ [200]. Ефективність дифракції при падінні світла під кутом Брега приймає вигляд [200, 210]:

$$\chi = \frac{I_1}{I^0} = \sin^2 \left(\frac{\pi L_a n}{2\tilde{\lambda} \cos \theta_B} \frac{\Delta \eta}{\eta} \right). \quad (1.15)$$

Залежність між відносною зміною тензора діелектричної проникливості і акустичною потужністю P_a при ізотропній АО дифракції [200]:

$$\Delta \eta / \eta = -n^2 p_{\text{еф.}} [2P_a / (\rho_m v^3 L_a H_{\Pi})]^{0,5}, \quad (1.16)$$

де $P_a = (1/2) \rho_m v^3 e e^* L_a H_{\Pi}$; H_{Π} – ширина п'єзоперетворювача; e^* – спряжене до e п'єзопостійна; $p_{\text{еф.}}$ – ефективна пружнооптична постійна [211, 163]:

$$p_{\text{еф.}} = \mathbf{i}_{\mu} \mathbf{i}_{\nu} p \mathbf{a} \mathbf{f}(q_a), \quad (1.17)$$

де \mathbf{i}_{μ} , \mathbf{i}_{ν} – одиничні вектори напрямів поляризації падаючої та дифрагрованої світлових хвиль, відповідно; \mathbf{a} – одиничний вектор вздовж напрямку поширення акустичної хвилі, $\mathbf{f}(q_a)$ – вектор поляризації акустичної хвилі; p – тензор пружнооптичних коефіцієнтів.

Тут q_a визначає, яка з трьох поляризацій акустичної хвилі розглядається [9, 30]: при $q_a=1$ – поперечна хвиля з меншою швидкістю, $q_a=2$ – поперечна хвиля з більшою швидкістю, $q_a=3$ – поздовжня акустична хвиля. Вектори $\mathbf{f}(1)$, $\mathbf{f}(2)$ і $\mathbf{f}(3)$ є взаємноперпендикулярні.

Підставляючи (1.16) у (1.15), знаходимо ефективність дифракції:

$$\chi = \sin^2 \left\{ \pi / (\tilde{\lambda} \cos \theta_B [(P_a L_a M_2) / (2H_{\Pi})]^{0,5}) \right\}, \quad (1.18)$$

де M_2 – коефіцієнт АО якості визначається згідно формули [206, 212]:

$$M_2 = \frac{n_i^3 n_d^3 p_{\text{еф.}}^2}{\rho_m v^3} \cos \psi_{\mu} \cos \psi_{\nu} \cos \gamma. \quad (1.19)$$

де M_2 – коефіцієнт АО якості, ρ_m – густина кристалу, кут відхилення акустичної хвилі γ і кути зсуву ψ_{μ} та ψ_{ν} світлової хвилі.

Швидкість звуку знаходять з рівняння Гріна-Кристофеля для випадку без врахування п'єзоелектричного зв'язку у вигляді [162, 163, 213]:

$$\det | \rho_m v^2 \delta_{ik} - c_{ilk m} a_l a_m | = 0, \quad (1.20)$$

а з врахуванням п'єзоелектричного зв'язку у вигляді [30, 213]:

$$\det \left| \rho_M v^2 \delta_{ik} - c_{ilk} a_l a_m - \frac{(e_{lmi} a_l a_m)(e_{pqk} a_p a_q)}{\epsilon_{rs} a_r a_s} \right| = 0. \quad (1.21)$$

де δ_{ik} – символ Кронекера, e_{lmi} – п'єзоелектричний тензор, ϵ_{rs} – тензор діелектричної проникливості, C_{ijkl} – тензор пружної жорсткості.

Рівняння (1.20) і (1.21) має три розв'язки, пов'язані зі швидкостями трьох хвиль, кожна з яких має власний вектор $\mathbf{f}(q_a)$ [162, 163]. Найменша швидкість відповідає $q_a=1$, найбільша (поздовжня акустична поляризація) – зазвичай $q_a=3$. Кут відхилення потоку енергії цих хвиль γ_a визначається згідно [162, 163]:

$$\cos \gamma_a = \rho_M v_q^2 (a_i (f_i f_k c_{ilk}) (c_{mrst} f_r f_s) a_t)^{-1/2}. \quad (1.22)$$

З (1.18) знаходимо, що повна дифракція спостерігається, коли [200]:

$$P_a = [\tilde{\lambda}^2 \cos^2 \theta_B / (2M_2)] [H_p / L_a]. \quad (1.23)$$

З останнього співвідношення бачимо, що для використання меншої акустичної потужності в АО пристроях вибирають матеріали з великим коефіцієнтом АО якості.

АО поле називається слабким, коли акустична потужність є такою, що $I_1 \ll I^0$ або $\chi \ll 1$ [200]. Для слабого поля (1.18) записують у вигляді [205]:

$$\chi = (\pi^2 P_a L_a M_2) / (2 \tilde{\lambda}^2 \cos^2 \theta_B H_p). \quad (1.24)$$

Єдиним базовим елементом будь-якого АО пристрою є АО комірка, що складається з електроакустичного перетворювача (п'єзоперетворювач), середовища АО взаємодії - світлозвукопроводу і поглинача пружних коливань - акустичного навантаження (рис. 1.18).

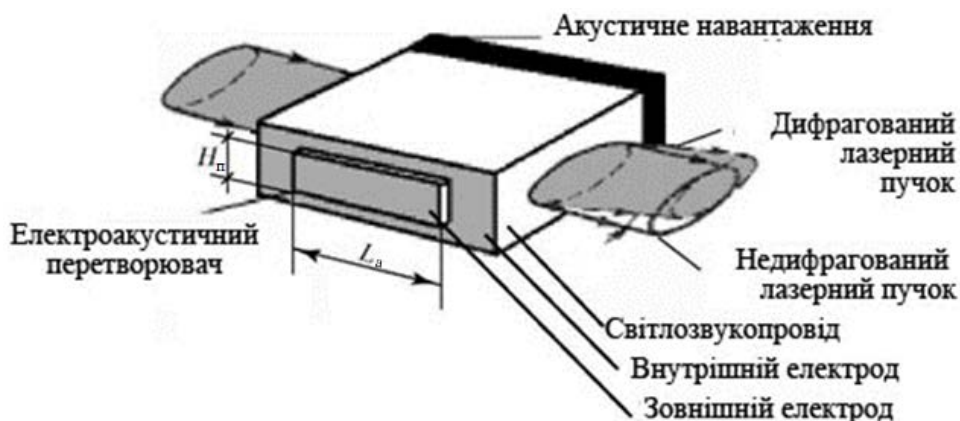


Рис. 1.18. Структура АО комірки [187]

1.5. Енергетичний баланс оптичної транспортної мережі

1.5.1. Технологічні принципи підвищення енергоефективності оптичних транспортних мереж

З енергетичної точки зору ООО комутатори в порівнянні із ОЕО витрачають до 96% менше електроенергії [214]. Крім того використання ООО приведе до економії витрат на енергетичному і розподільчому обладнанні. Слід зазначити, що при витраті телекомунікаційним пристроєм 1 Вт електроенергії потрібно витратити 1 Вт енергії для його охолодження [90].

Для правильної та ефективної оцінки енергоефективності оптичних комутаторів слід виділити наступні технічні елементи та параметри: вхідна потужність оптичного сигналу, використання ОЕО, використання хвильових конверторів, вносимі втрати, рівень вихідного сигналу.

Для проведення процесу комутації необхідний достатній рівень оптичного сигналу, оскільки пристрій вносить вносимі втрати. Так, наприклад, при ЕО комутації вносимі втрати можуть сягати 5 дБ [215].

Підвищення енергоефективності для оптичних модуляторів необхідно здійснювати шляхом пошуку орієнтації оптоелектронних матеріалів, які є ключовими елементами такого пристрою [216, 217].

Використання ОЕО перетворення є визначальним для параметру енергоспоживання оптичного комутатора, що використовується для введення/виведення трафіку з/в мережу доступу, проведення хвильової конвертації та процесу комутації. Слід зазначити, що введення/виведення трафіку з/в мережу доступу на проміжних вузлах та використання хвильових конверторів з ОЕО перетворенням приводить до споживання до 85% електроенергії [216, 218]. На сьогоднішній день є заміна дорогому і енергозатратному ОЕО перетворенню. Наприклад, введення/виведення трафіку з/в мережу доступу без використання проміжного ОЕО перетворення може здійснюватися за допомогою статичних чи реконфігурованих оптичних мультиплексорів вводу/виводу [219], а ОЕО хвильові конвертори можуть

бути замінені на оптичні, які розроблені на основі нелінійних ефектів [220].

Основні параметри, які визначають енергоспоживання оптичних конверторів: вхідна потужність оптичного сигналу, вхідна потужність допоміжних оптичних сигналів, використання SOA (Semiconductor optical amplifier - напівпровідниковий оптичний підсилювач), вибір нелінійних матеріалів, вихідна потужність оптичного сигналу.

Вхідна потужність оптичного сигналу є визначальним параметром роботи оптичних хвильових конверторів, оскільки конвертори, які розроблені на основі нелінійних ефектів, дозволяють отримати вихідні сигнали порядку 0,1 % від амплітуди основного вхідного сигналу [220]. Це приводить до використання попередніх і кінцевих підсилювачів, що підвищують енергоспоживання такого пристрою. Виходом із цієї ситуації є використання нелінійнооптичних матеріалів [221].

Робочим елементом в таких пристроях є SOA. Конвертор, який базується на крос-фазовій модуляції, використовує два SOA підсилювачі, проте потребує меншу потужність вхідного сигналу, а конвертор на основі крос модуляції інтенсивності передбачає використання лише одного такого підсилювача [222]. Підтримка оптимального значення вхідної потужності оптичного сигналу і кількості підсилювачів SOA підвищить енергоефективність таких пристроїв.

Сучасний телекомунікаційний ринок представлений Lucent, Nortel, Alcatel, Cisco, Ericsson та іншими компаніями, які забезпечують широкий вибір телекомунікаційного обладнання. На сьогоднішній день найбільш енергоефективним обладнанням є обладнання компанії Juniper [90]. Ядровий маршрутизатор Juniper T1600 є рекордсменом енергоефективності в IP/MPLS маршрутизації в 2008 році. Проте обладнання компанії Juniper не забезпечує такої високої продуктивності як CISCO CRS-1 (рис. 1.19). При виборі оператором телекомунікаційного обладнання недоцільно спиратись виключно на параметр енергоефективності, потрібно шукати компроміс між усіма технічними параметрами пристрою.

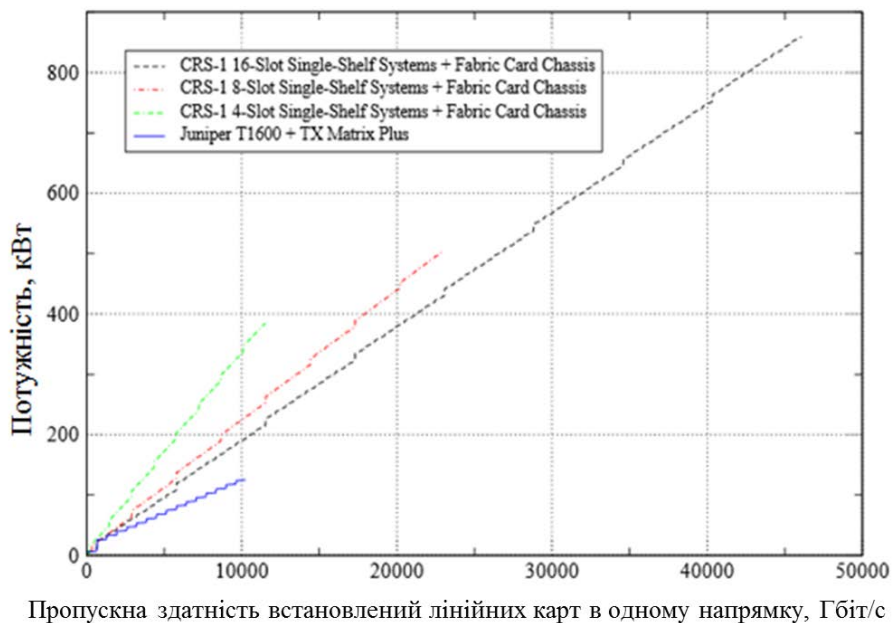


Рис.1.19 Порівняльний графік обладнання компаній Cisco і Juniper

1.5.2. Аналіз архітектурних рішень для підвищення енергоефективності

Ядровий IP маршрутизатор споживає найбільше енергії порівняно з іншими пристроями [92] (рис. 1.20,а). Відомо, що електроспоживання IP маршрутизатора визначають наступні складові: живлення і охолодження (PS&C), робота пристрою (FE), комутаційна фабрика (SF), площина управління (CP), вхідні/вихідні карти (I/O), буфери (B). На рис. 1.20,б представлено відсоткове співвідношення споживання енергії цими елементами.

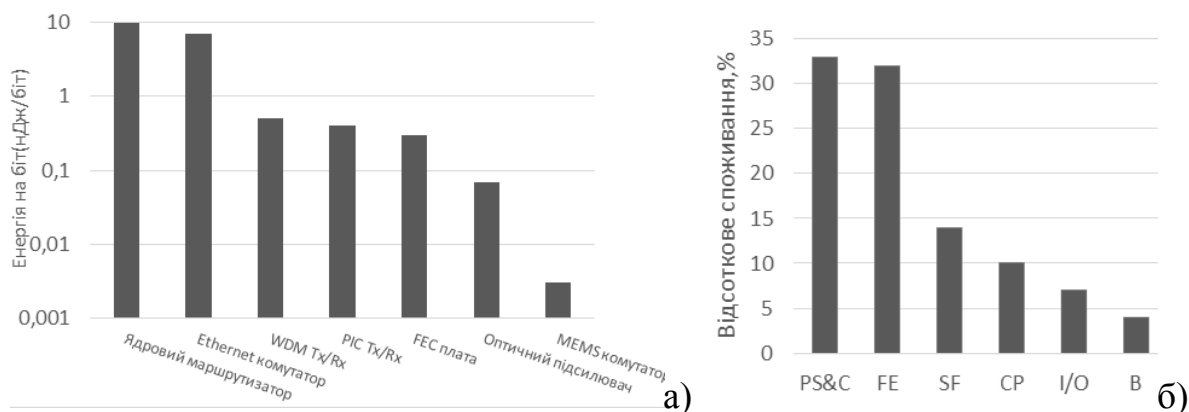


Рис. 1.20. Енергоспоживання: а) пристроїв транспортної мережі [92]; б) елементів ядрового маршрутизатора) [223]

Так IP маршрутизатор для обробки одного біта інформації споживає приблизно 10 нДж електроенергії [92]. Відповідно другий рівень, на якому працюють такі технології SDH, OTN, Gigabit Ethernet, для обробки одного біта інформації споживають порядку 1 нДж. Для трафіку, комутованого виключно на DWDM рівні, для обробки 1 біта потрібно лише 0,1 нДж. Тому усунення обробки службової інформації на ядрових маршрутизаторах проміжних вузлів дозволить суттєво підвищити енергоефективність транспортної мережі. Ці маршрутизатори будуть використовуватись лише на кінцевих вузлах передавання даних. Перший рівень, де працює технологія DWDM, є найбільш енергоефективним з точки зору обробки службової інформації, проте реалізація комутації виключно на DWDM рівні є складною технічною задачею. Тому оптимальним рішенням є впровадження процесу обробки на другому рівні, який буде узгоджено працювати із першим і третім рівнем. Такі рішення потребують розроблення методів, які дозволять усувати від процесу обробки проміжні ядрові маршрутизатори. Відкриття наскрізних каналів передбачає процес комутації виключно на DWDM рівні із резервуванням необхідних часових і спектральних ресурсів, що також в свою чергу підвищує енергоефективність мережі.

1.5.3. Коефіцієнт електромеханічного зв'язку

Важливою частиною акустичних пристроїв є п'єзоперетворювач. П'єзоперетворювач – це пристрій, який за допомогою п'єзоелектричного ефекту перетворює механічну енергію в електричну і навпаки [165, 224, 225]. Важливим параметром, що характеризує енергоефективність таких пристроїв, є коефіцієнт електромеханічного зв'язку.

Коефіцієнт електромеханічного зв'язку характеризує здатність матеріалу перетворювати електричну енергію в механічну і навпаки [213, 226]:

$$\kappa_M^2 = P_a / P_e, \quad (1.25)$$

де P_a – потужність акустичних коливань, що розвивається п'єзоелектриком в результаті п'єзоефекту; P_e – електрична потужність, споживана п'єзоелектриком від джерела напруги збудження.

В [162] коефіцієнт електромеханічного зв'язку визначають:

$$\kappa_M = \sqrt{\frac{W_{\text{ел}}}{W_{\text{ел}} + W_{\text{пр}}}}, \quad (1.26)$$

де $W_{\text{ел}}$ – електрична енергія, $W_{\text{пр}}$ – пружна енергія.

В [227] коефіцієнт електромеханічного зв'язку визначається як відношення густини взаємної пружної та електричної енергій (або енергії електромеханічної взаємодії) U_m до середнього геометричного значення густини пружної U_1 і електричної енергії U_d :

$$\kappa_M = \frac{U_m}{\sqrt{U_1 U_d}}. \quad (1.27)$$

З (1.27) в [227, 228] коефіцієнт електромеханічного зв'язку отримують як:

$$\kappa_M = \frac{e_{mij}}{\sqrt{C_{ijkl} \varepsilon_{mk}}}.$$

Коли коефіцієнт електромеханічного зв'язку менше 0,2, то на практиці його визначають у вигляді [229, 228]:

$$\kappa_M = \left(\frac{v^2}{v_0^2} - 1 \right)^{1/2}, \quad (1.28)$$

де v_0 та v – швидкість акустичної хвилі без врахування та з врахуванням п'єзоелектричного зв'язку, відповідно.

В [213] коефіцієнт електромеханічного зв'язку записують як:

$$\kappa_M = \frac{e_{ia}}{\sqrt{\varepsilon_{jg} C_{ba} + e_{ig}^2}}. \quad (1.29)$$

1.6. Вибір матеріалу із заданими властивостями для апробації досліджень в пристроях фотонної транспортної мережі

В якості матеріалів для оптоелектронних пристроїв використовується низка доступних кристалів, зокрема ніобат літію (LiNbO_3). Ніобат літію широко використовується для модуляторів, комутаторів та інших оптичних пристроїв. Він широко використовуються як п'єзоперетворювач для АО

пристроїв [213]. Ніобат літію є добре дослідженим і часто використовується для перевірки запропонованих нових вимірювань та досліджень.

Ніобат літію має ромбоєдричну кристалічну структуру (точкова група симетрії $3m$) [230] з параметрами $a_k=0,54944$ нм та $\alpha=55^\circ 52'$; відповідні постійні гексагональної елементарної комірки становлять $a_k=0,51483$ нм, $c_k=1,3863$ нм, $c_k/a_k=2,693$ (на елементарну комірку припадає шість молекул) [231]. Орієнтація зразка вибирається згідно рис. 1.21. Слід зауважити неоднозначності у виборі кристалофізичної системи координат при вивченні п'єзооптичного ефекту [232]. Кристал є широкозонним діелектриком [233].

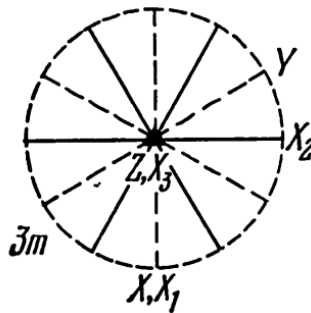


Рис. 1.21. Стереографічна проекція вибору кристалофізичних та кристалографічних осей координат в кристалах $3m$ [162]

Кристали ніобату літію зазвичай отримують із розплаву методом Чохральського [234, 235] або модифікованим методом Бріджмена [236]. Кристали прозорі, можуть не мати забарвлення взагалі або змінювати колір від світло-жовтого до темно-коричневого.

Ніобат літію є оптично одновісним ($n_e < n_o$ – оптично негативним) кристалом. Він вважається добрим АО та ЕО матеріалом. Пружні п'єзоелектричні АО властивості LiNbO_3 визначені в [237-242]. Значення пружних та п'єзоелектричних констант отримані різними методами [243-246]. У порівнянні з використовуваними електрооптичними кристалами KDP в кристалах ніобату літію у декілька разів перевищує коефіцієнти ЕО ефекту [240] і слабо залежить від частоти [241].

Зауважимо, що хоча кристал ніобат літію є одним з найбільш досліджуваних матеріалів [247], але у роботах точний склад кристалів ніобату літію не фіксувався, що ускладнює й інколи унеможлиблює коректне порівняння відповідних даних різних авторів.

1.7. Основні невирішені проблеми у фотонних транспортних мережах

Основними вимогами, які ставляться до мереж, є мінімімальні значення часу затримки, втрат даних та низькі витрати на енергоспоживання. Зазначені вимоги в першу чергу стосуються функціонування транспортної телекомунікаційної мережі.

В технічних засобах необхідно зменшувати використання дорогого і енергозатратного ОЕО перетворення, що дозволяє зменшити час затримки. Подальше зменшення часу затримки здійснюється на основі технологій OBS та MPLS або GMPLS.

Трафік мережі збільшується в цілому лавиноподібно, але в певні моменти часу може змінюватися стрибкоподібно, що може перевантажити мережу. Тому існує проблема визначення умови доцільного використання кожного з протоколів оптичного блоку комутації в залежності від завантаженості мережі із забезпеченням мінімального часу затримки та втрат.

Існуюча проблема в забезпеченні необхідної якості і кількості наданих послуг зв'язку привели до ускладнення структури телекомунікаційної мережі, зокрема у поєднанні технологій IP/MPLS/DWDM. Таким чином, необхідно вдосконалювати та впроваджувати математичні моделі та методики, зокрема теорії випадкових графів, перколяції, тензорного аналізу з різними підходами, зокрема діакоптикою, для проведення досліджень PTN з врахуванням складності та багатовимірності мережі.

Разом з тим математично такі мережі можна описати за допомогою тензорного аналізу з використанням диференціальної геометрії.

Представлення передачі даних у вигляді мережі простору з розглядом криволінійного підпростору шляхів дає можливість описувати поведінку різних параметрів, наприклад навантаження в досліджуваній мережі. За допомогою диференціальної геометрії можна визначати динамічну поведінку зміну стану телекомунікаційної мережі.

Для FGN доцільно зменшувати використання енергоресурсів, тому є необхідність у розробці та вдосконаленні існуючих моделей енергоспоживання мережі.

Разом з тим розвиваються та з'являються нові технології та принципи передавання інформації, що вдосконалює мережні вузли та компоненти мереж, у тому числі на основі ФК пристроїв. В роботі не розглядаються солітонні лінії. Оскільки, в перспективі можна вважати, що у PTN швидкості передачі даних будуть далеко за 10 Гбіт/с, а в [248] обґрунтовано, що солітонні лінії недоцільно використовувати для швидкостей вище 10 Гбіт/с.

В PTN використовуються оптичні модулятори і комутатори. Як було встановлено в роботах [10, 73], використання ЕО ефекту є кращим для оптичних модуляторів, а для оптичних комутаторів – АО взаємодія. Доцільним є визначення ефективного енергоспоживання ЕО модулятора та АО комутатора. Для акустичних пристроїв важливим є також коефіцієнт електромеханічного зв'язку. Тому користуючись тензорною моделлю, є необхідність в розробці 3D- аналізу для коефіцієнту електромеханічного зв'язку.

Отже, доцільним є визначення можливостей підвищення ефективності функціонування PTN шляхом зменшення енергоефективності, часових параметрів і втрат при передачі даних.

Висновки до розділу 1

В розділі проведено аналіз PTN та представлено основні визначення, які використовуються у роботі. Розглянуто стан проблеми і обґрунтована необхідність у проведенні дослідження PTN.

Представлено концептуальну модель та приведено класифікацію PTN. Розглянуто основні технології, компоненти та моделі, які використовуються при передачі даних у PTN.

Описано основні характеристики та вимоги, що ставляться до телекомунікаційних мереж згідно рекомендацій ITU-T – Y.3000-3499 до 2020 р. Згідно існуючих вимог необхідно надавати швидко та якісно різноманітні послуги в FGN, які, в свою чергу, повинні також скоротити витрати матеріалів і енергії.

Проведено аналіз комутації PTN, представлено класифікацію використовуваних алгоритмів, розглянута багатопротокольна 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 ФК 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, а саме: технологічних, архітектурних, протокольних і хмаркових.

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, де лідером у цьому сегменті є компанія Juniper.

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

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

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

РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ ПРЕДСТАВЛЕННЯ ТА МОДЕЛІ ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

2.1. Моделі випадкових графів

Топологічна модель транспортної мережі може бути представлена у вигляді графа, елементами якого є вершини та ребра. У загальному випадку існують різні комбінації шляхів для проходження навантаження між абонентами в мережі, серед яких важливо визначити найбільш ефективні.

Граф – пара множин [1, 2]:

$$G=(V, E), \quad (2.1)$$

де V – множина N вузлів (вершин або точок) та E – множина ребер (з'єднань або ліній), які з'єднують вузли, тобто елементи множин V .

Якщо протягом певного часу змінюється склад множини вузлів, то отримуємо нову множину:

$$\{V^1\} \neq \{V\}.$$

2.1.1. Модель Ердос-Ренеі

Згідно моделі Ердос-Ренеі граф визначають як N помічених вершин, з'єднаних p ребрами, які обрані випадковим чином з $N(N-1)/2$ можливих ребер (див. рис. 2.1) [249]. Загалом існує $C_{[N(N-1)/2]}^n$ графів з N вершинами і p ребрами, які формують імовірнісний простір, в якому кожна реалізація рівноймовірна [136].

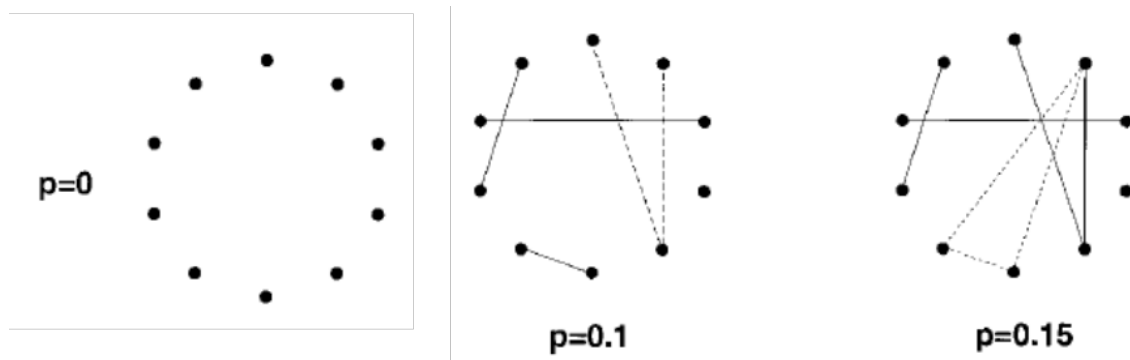


Рис. 2.1. Ілюстрація процесу зміни графа в моделі Ердос-Ренеі

Отже, загальна кількість ребер є випадкова величина з очікуваним значенням $E(n) = p[N(N-1)/2]$. Якщо G_0 граф з вершинами V_1, V_2, \dots, V_N і з n ребрами, то ймовірність отримання такого графа в процесі побудови є [136]:

$$P(G_0) = p^n (1-p)^{\frac{N(N-1)}{2} - n}.$$

В [249, 250] виявили, що часто деякі властивості випадкових графів з'являються досить несподівано. При заданій імовірності здебільшого всі графи або володіють, або не володіють деякими властивостями Q_1 . Перехід між областю існування і неіснування властивості є критична ймовірність p_c .

Порівнюючи графи різних розмірів з однаковим значенням p , очевидно, що більші графи мають більшу кількість ребер. Отже, така властивість, як наявність циклів, буде частіше зустрічатись при малих значеннях p в більших графах. Це означає, що для багатьох властивостей Q_1 для випадкових графів немає незалежної від N межі, але можна визначити граничну функцію, яка залежить від розміру системи. Тим не менш, середня ступінь графа, тобто середня кількість ребер графа G , інцидентних вершині:

$$k = 2n / N = p(N-1) \cong pN, \quad (2.3)$$

має критичне значення, яке незалежне від розміру системи.

Розглянемо випадковий граф $G = G_{N,p}$ і підграф F з k_N вершинами та l^* ребрами. У загальному випадку випадковий граф G може містити кілька таких підграфів F . Певна кількість k_N вершин може бути обрана з усіх N вершин $C_N^{k_N}$ способами, а l^* ребер формуються з імовірністю p^{l^*} . Зауважимо, що підграфи не повинні бути ізольованими.

Критична ймовірність, при якій кожен граф містить підграф з k_N вершинами і l^* ребрами, рівна [136]

$$p_c(N) = c_1 N^{-k_N/l^*}. \quad (2.4)$$

Крім того, критична ймовірність наявності дерева порядку k_N

$$p_c(N) = c_1 N^{-k_N / (k_N - 1)}, \quad (2.5)$$

а наявності циклу порядку $k_N \in$

$$p_c(N) = c_1 N^{-1}. \quad (2.6)$$

Якщо ймовірність з'єднання $p(N)$ змінюється як N^z , де z – перестроюваний параметр, то z може приймати значення між 0 і ∞ (рис. 2.2). Якщо $z < -3/2$, то майже всі графи містять ізольовані вершини та ребра [136]. При $z \geq -3/2$ починають з'являтися дерева порядку третього [136]. Якщо $-4/3 < z < -1$, то з'являються дерева порядку від 4 до N [136].

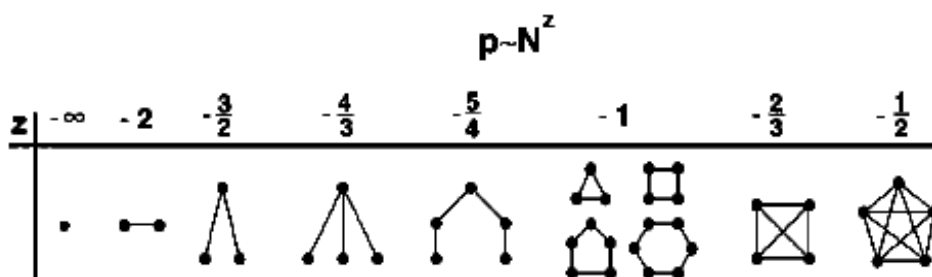


Рис. 2.2. Приклади виникнення підграфів у випадкових графах, коли ймовірність з'єднання $p(N) = N^z$ [136].

При $z = -1$ маємо $p \propto N^{-1}$, тоді середня ступінь вузлів $\langle k \rangle = \text{const}$. Для $p \sim N^{-1}$ випадковий граф містить цикли і дерева всіх порядків. В структурі кластера [250] випадкового графа є зміна, коли $\langle k \rangle$ наближається до 1.

Якщо $0 < k < 1$, то всі кластери ймовірно є деревами або містять рівно один цикл. Незважаючи на наявність циклів, майже всі вершини належать деревам. Середня кількість кластерів є число порядку $N - n$, де n – кількість ребер, тобто при додаванні нового ребра кількість кластерів зменшується на 1. Найбільший кластер – це дерево, розмір якого пропорційний до $\ln N$ [136].

Зі збільшенням $\langle k \rangle$ маленькі кластери зливаються і з'єднуються до гігантського (єдиного) кластера, причому чим менший кластер, тим більша ймовірність того, що він не з'єднується.

У випадковому графі з імовірністю з'єднання p і ступіню вершин k_i , ймовірна кількість способів, якими k ребер можуть виходити з певної вершини:

$$P(k_i = k) = C_{N-1}^k p^k (1-p)^{N-1-k} \quad (2.7)$$

де C_{N-1}^k – кількість способів вибору k вершин на кінцях ребер; k ребра формуються з ймовірністю p^k ; ймовірність відсутності додаткових ребер є $(1-p)^{N-1-k}$.

Згідно рівності (2.7), очікувана кількість вершин зі ступенем k є

$$E(X_k) = NP(k_i = k) = \hat{\lambda}_k, \quad (2.8)$$

де X_k – кількість вершин зі ступенем k ,

$$\hat{\lambda}_k = NC_{N-1}^k p^k (1-p)^{N-1-k}. \quad (2.9)$$

Розподіл величин X_k , ймовірності того, що X_k буде мати задане значення $P(X_k = r)$, наближається до пуассонівського розподілу :

$$P(X_k = r) = e^{-\hat{\lambda}_k} \frac{\hat{\lambda}_k^r}{r!} \quad (2.10)$$

У випадковому графі ребра розподілені випадковим чином і коефіцієнт кластеризації має величину $C=p$. Загалом коефіцієнт кластеризації є мірою ступеня, в якій вузли в графі мають тенденцію групуватися разом, тобто появи кластера.

В моделі Ердос-Ренеї графи з однаковими значеннями N і p мають приблизно однаковий діаметр. Діаметр графа – максимальна відстань між парою вершин [136], яка визначається формулою

$$d = \frac{\ln(N)}{\ln(pN)} = \frac{\ln(N)}{\ln(k)}. \quad (2.11)$$

2.1.2. Узагальнені випадкові графи

Реальні телекомунікаційні мережі відрізняються від випадкових графів степеневим законом розподілу ступенів вершин

$$p_S(k) \sim k^{-\gamma}. \quad (2.12)$$

де γ спадає від ∞ до 0.

Ці мережі описуються за допомогою узагальнених випадкових графів і деколи називають, як "мережі без масштабу" [251, 252].

Середня ступінь мережі зростає із спаданням γ , тому $k \sim k_{max}^{-\gamma+2}$, [136], де $k_{max} < N$ – максимальна ступінь графа. При великому γ мережа складається з ізольованих маленьких кластерів [136], при малому γ мережа стає повністю зв'язаною [136]. Існує критичне значення γ_c , при якому формується гігантський кластер.

Загальний опис випадкових графів із заданим розподілом ступенів розроблений у [253] з використанням функції генерації розподілу ступенів [254]:

$$G_0(x) = \sum_{k=0}^{\infty} p_s(k) x^k, \quad (2.13)$$

де:

$$p_s(k) = \frac{1}{k!} \left. \frac{d^k G_0}{dx^k} \right|_{x=0}. \quad (2.14)$$

Для вивчення структури кластеру досліджують функцію генерації розподілу ступенів найближчих сусідів випадково вибраної вершини:

$$G_1(x) = \frac{\sum_k k p_s(k) x^{k-1}}{\sum_k k p_s(k)} = \frac{1}{k} G_0'(x). \quad (2.15)$$

Середня кількість перших сусідів дорівнює середній ступені графа:

$$z_1 = k = \sum_k k p_s(k) = G_0'(1). \quad (2.16)$$

Визначення кластера здійснюється за алгоритмом пошуку в ширину, тобто починають з довільної вершини, яку позначають як частину кластера і відносять до множини пройдених. В першому кроці позначають вершини, що з'єднані за допомогою ребра з даною вершиною безпосередньо, які відносяться до множини «непроедених». На наступному кроці розглядається помічена вершина, яка відноситься до множини «непроедених». Дану вершину переносять до множини «пройдених» і шукають вершини, які не

помічені і з'єднані з даною вершиною безпосередньо. Знайдені вершини помічають і відносять до множини «непройдених». Процес продовжується до того часу, поки нові вершини не знаходяться. Множина відмічених вершин становить ізольований кластер.

Функція генерації $H_1(x)$ розподілу розміру кластерів [136]

$$H_1(x) = \frac{\sum_k k p_s(k) [H_1(x)]^k}{\sum_k k p_s(k)} = x G_1 [H_1(x)].$$

Функція генерації розміру всього кластера визначається як:

$$H_0(x) = x \sum_k p_s(k) [H_1(x)]^k = x G_0 [H_1(x)].$$

Коли в графі немає гігантського кластера, середній розмір кластерів представляється [136]:

$$s = H_0'(1) = 1 + \frac{G_0'(1)}{1 - G_1'(1)}.$$

При $G_1'(1) = 1$ вираз (2.19) є розбіжний.

Розширюючи метод обчислення середньої кількості найближчих сусідів, через модель узагальненого випадкового графу, визначаємо середню кількість m -тих сусідів,

$$z_m = [G_1'(1)]^{m-1} G_0'(1) = \left[\frac{z_2}{z_1} \right]^{m-1} z_1, \quad (2.17)$$

де z_1 і z_2 – кількість найближчих і других по близькості сусідів. Використовуючи цей вираз, можна отримати приблизне співвідношення для середньої довжини шляху в графі.

Розглядаючи певну вершину, всі вершини графа можуть бути досягнуті через l кроків. Враховуючи це, отримаємо:

$$1 + \sum_{m=1}^l z_m = N,$$

де z_m – кількість m -тих сусідів початкової вершини.

Для графів з

$$N \gg z_1, \quad z_2 \gg z_1, \quad (2.18)$$

середня довжина шляху, тобто середнє число ребер цього шляху [136]:

$$l = \frac{\ln(N / z_1)}{\ln(z_2 / z_1)} + 1. \quad (2.19)$$

У випадку зв'язних дерев існує більш точний метод [255], згідно з яким середня довжина оцінюється як

$$l = N^{(\gamma-2)/(\gamma-1)}. \quad (2.20)$$

2.1.3. Модель Уотса-Строгатса

Модель Уотса-Строгатса враховує, що в більшості мереж великих розмірів шлях від одного вузла до іншого порівняно невеликий. Відстань між вузлами дорівнює кількості ребер найкоротшого шляху.

В [256] запропоновано модель, в якій граф пов'язаний із кінцевомірною решіткою. У моделі наступний алгоритм (рис. 2.3):

1) Розпочати з порядку. На початку розглядається коло з N вузлами, в якому кожен вузол з'єднаний зі своїми K сусідами порівно з кожної сторони. Припускається, що $N \gg K \gg \ln(N) \gg 1$.

2) Рандомізувати. Кожне ребро решітки існує з імовірністю p та виключаються подвійні ребра і перенесення ребер. Граф згідно моделі Уотса-Строгатса має $pNK/2$ ребер.

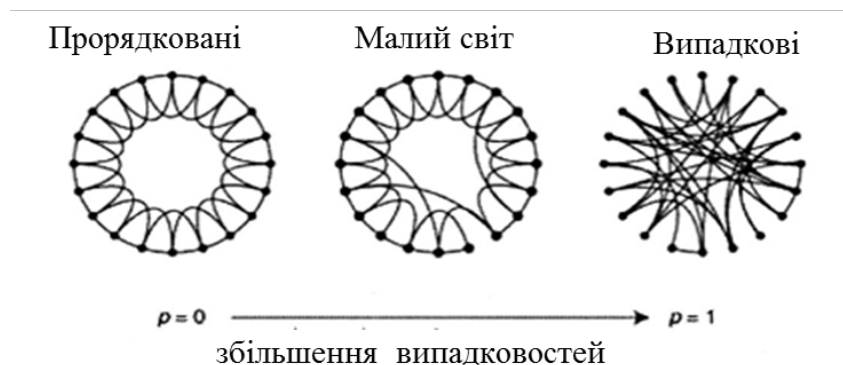


Рис. 2.3. Модель Уотса -Строгатса

Модель Уотса -Строгатса відповідає одновимірній решітці, коли кожен вузол пов'язаний з K близькими вузлами (рис. 2.3), причому більшість

найближчих сусідів також є сусідами між собою, тобто решітка кластеризована.

Згідно теорії топології мереж, одновимірна решітка складається із двох зовнішніх вузлів (які мають лише одного сусіда) і деяку кількість внутрішніх (в яких по два сусідніх вузла). При з'єднанні обох зовнішніх вузлів отримується кільцева топологія. В багатовимірній решітці кожне ребро паралельне певній осі і з'єднує два суміжних вузла вздовж цієї осі.

Середня довжина шляху l залежить від розміру системи. Зокрема середня довжина шляху не зменшується, поки $p \geq 2/NK$ [135]. Це означає, що існує p -залежний перехідний розмір N^* . Коли $N < N^*$, то $l \sim N$, але якщо $N > N^*$, то $l \sim \ln(N)$. Таким чином, згідно [135] середня довжина шляху дорівнює

$$l(N,p) \sim N^* F\left(\frac{N}{N^*}\right), \quad (2.21)$$

де

$$F(u) = \begin{cases} u, & \text{якщо } u \ll 1, \\ \ln(u), & \text{якщо } u \gg 1. \end{cases}$$

Перехідний розмір N^* залежить як $N^* \sim (p)^{-\tau^*}$ [136], де $\tau^* = 1/d^*$, де d^* – розмірність початкових решіток, до яких випадковим чином додаються ребра.

Досить часто середню довжину шляху визначають [257]:

$$l \sim \frac{\ln N}{\ln K}. \quad (2.22)$$

Середня довжина шляху може бути визначена із співвідношення [135]

$$l \sim \frac{N^{1/d^*}}{K} f(pKN), \quad (2.23)$$

де $f(u)$ – універсальна функція масштабування, яка визначається

$$f(u) = \begin{cases} \text{const}, & \text{якщо } u \ll 1, \\ \frac{4}{\sqrt{u^2 + 4u}} \tanh^{-1} \frac{u}{\sqrt{u^2 + 4u}}, & \text{якщо } u \cong 1, \\ \ln(u)/u, & \text{якщо } u \gg 1. \end{cases}$$

Співвідношення (2.23), показує що середня довжина шляху в моделі Уотса- Строгатса залежить від трьох параметрів - p , K і N .

У моделі Уотса-Строгатса при $K > 2$ немає ізольованих вершин і мережа зв'язна, на відміну від моделі Ердос-Ренеі, в якій ізольовані кластери існують для широкого діапазону ймовірностей з'єднань.

2.1.4. Безмасштабні мережі та модель Барабаші-Альберта

Розглянуті раніше моделі випадкового графа припускали, що ймовірність, з якою дві вершини з'єднуються, не залежить від ступеня вершин, а нові ребра розташовані випадковим чином. У більшості реальних мереж нова вершина найбільш ймовірно приєднається до вершини із більшим ступенем. Тому при появі нових вузлів транспортну мережу доцільно розглядати за допомогою моделі Барабаші-Альберта [251, 252]. Алгоритм побудови моделі Барабаші-Альберта наступний:

1. Ріст. На кожному часовому кроці додається m_1 нових вузлів, які з'єднуються з k_{m_1} іншими вузлами.

2. Переважне приєднання. Вибір вузла, з яким новий вузол буде з'єднуватися, залежить від його ступеня. Тобто ймовірність Π з якою новий вузол буде з'єднуватися з вже існуючим вузлом i , залежить від числа зв'язків k_i вузла i :

$$\Pi(k_i) = \frac{k_i}{\sum_j k_j} . \quad (2.24)$$

В такій моделі степені вершин розподілені по степеневому закону (2.12) [257].

При визначенні середньої довжини шляху на основі моделі Барабаші - Альберта [257] користуються співвідношеннями:

$$\text{для } m_1=1 \quad l \approx \ln N, \quad (2.25)$$

$$\text{для } m_1 \geq 2 \quad l = \begin{cases} l^{\gamma > 3} \approx \ln N, \\ l^{\gamma = 3} \approx \ln N / \ln \ln N, \\ l^{2 < \gamma < 3} \approx \ln \ln N. \end{cases} \quad (2.26)$$

Отже, середня довжина шляху змінюється логарифмічно. Водночас реальна топологія такої мережі – зірка, тобто вузли зі ступенем $\sim N$ з'єднані з рештою вузлів.

2.1.5. Теорія перколяції

За умови $d \rightarrow \infty$ перколяція розглядається як частковий випадок теорії випадкових графів [136].

У роботах [258, 136] при розгляді з теорії перколяції, параметр p_c ототожнюють з появою нескінченного кластера. Водночас, з точки зору забезпечення повного зв'язку між усіма вузлами мережі необхідно враховувати кількість кластерів різних розмірів.

Загалом розглядають чорні та білі кластери. Зазвичай до чорних відносять канали або вузли, які є вільними, до білих – зайняті [259]. Отже, існує зворотнє завдання: визначити частку вузлів (або каналів), які треба зайняти (блокувати), щоб перколяційний кластер розпався на незв'язні частини.

Необхідно враховувати в яких цілях теорія перколяції використовується. Оскільки при визначенні поширення хвороб між деревами [258] або при надзвичайній ситуації, таких як поширення вогню на складі, параметр p_c дійсно пов'язаний з існуванням кластера. Позначимо через p_{ck} параметр, який називається порогом перколяції, що відповідає частці зайнятих вузлів, при якій виникає перколяційний кластер, і є границею між субкритичною фазою ($p < p_{ck}$) та надкритичною фазою ($p > p_{ck}$) [136]. В надкритичній фазі існує тільки один нескінчений кластер [260].

В основному теорія перколяції використовується для аналізу завантаженості мережі між двома вузлами. В представлений роботі проведено дослідження в мережі при встановленні зв'язку між кількома вузлами одночасно.

Зазначимо, що існують роботи, які присвячені впровадженню методів перколяції для мережевих алгоритмів [158].

1) Лавинна маршрутизація на основі перколяції для сенсорних мереж [261]. Передбачається зменшувати ймовірність пересилання повідомлення в міру віддалення від джерела. Спостерігається різке зменшення числа копій повідомлень, а ймовірність досягнення адресата зменшується незначно.

2) Перколяційна маршрутизація для оптичної кластерної мережі [262]. Пропонується використовувати явища перколяції для запобігання утворенню «вузьких місць» в комунікаційній мережі, що зв'язує вузли кластера (як топологія кластера розглядається 3D-решітка).

3) Перколяційний пошук в мережах зі степеневим розподілом зв'язності [263]. Пропонується алгоритм пошуку для РТН, що використовує зустрічні процеси впровадження та запиту контенту, і заснований на властивості «накопичення» інформації в «ключових» вузлах з великим ступенем зв'язності.

Ймовірність того, що вибраний випадковим чином канал або вузол належить нескінченному кластеру, визначають [154, 155, 258]

$$P_{\infty}(p) = N_{\infty} / \sum_{s=1}^{\infty} s n_s(p), \quad (2.27)$$

де N_{∞} – кількість каналів, що відносяться до безмежного кластера, $s n_s(p)$ – кількість зайнятих каналів, що належать кластерам розміром s , n_s – розподіл кластерів по розмірам визначається, як

$$n_s(p) = \frac{N_s}{N},$$

де N – повна кількість каналів; N_s – середня кількість кластерів розміром s . Очевидно, що [251]

$$P_{\infty}(p) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } p < p_{ck}, \\ > 0, & \text{якщо } p > p_{ck}. \end{cases}$$

Середній розмір кластера:

$$S = \sum_{s=1}^{\infty} s w_s,$$

де w_s – ймовірність того, що зайнятий канал належить кластеру розміром s і визначається:

$$w_s = \frac{sn_s(p)}{\sum_{s=1}^{\infty} n_s(p)}.$$

Залежно від величини p розглядаються загалом дві фази: субкритична та надкритична [136].

Мірою середнього радіусу кластерів є кореляційна довжина [136], яка визначається як квадратний корінь з середнього квадрата відстаней між зайнятими вузлами (каналами) [264], що належать одному і тому ж кластеру [136]:

$$\xi(p)^2 = \frac{2 \sum_{s=1}^{\infty} R_s^2 s^2 n_s}{\sum_{s=1}^{\infty} s^2 n_s},$$

де R_s – радіус циркуляції [154] або радіус гірації (гірорадіус) [264]. Радіус гірації є середньоквадратичним радіусом кластера, який визначається від його центра маси і визначається [264]:

$$R_s^2 = \frac{1}{2s^2} \sum_i \sum_j (r_i - r_j)^2.$$

При субкритичній фазі ($p < p_{\text{ск}}$) в системі присутні тільки маленькі кластери з'єднаних ребер. В [136, 265] показано, що ймовірність з'єднання двох випадкових вузлів: $\sim \exp(-r/\xi)$. Отже, радіус кінцевих кластерів в субкритичній фазі має експоненціально спадаючий хвіст, а кореляційна довжина ξ становить середній радіус кінцевого кластера. Встановлено [266], що $\xi=0$, при $p = 0$ і $\xi \rightarrow \infty$ при $p \rightarrow p_{\text{ск}}$.

При надкритичній фазі ($p > p_{\text{ск}}$) точно існує один нескінченний кластер [260].

2.2. Тензорний аналіз при дослідженні телекомунікаційної мережі

Для демонстрації ефективного використання тензорного аналізу використаємо опис, представлений в роботі [148]. Розглянемо для прикладу

систему координат $x = (x^1, x^2, x^3, x^4)$, що описується графом з п'ятьма вершинами та чотирма гілками згідно рис. 2.4. Далі замість термінології, що відповідає теорії графа, тобто ребра та вершини, будемо використовувати терміни гілка та вузол.

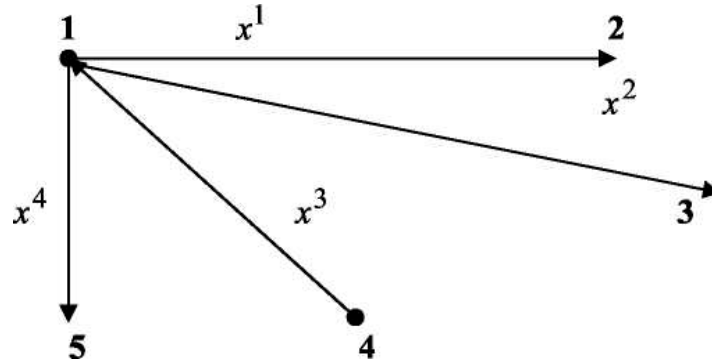


Рис. 2.4. Структура системи координат (x)

Нехай відбулася зміна системи координат, що можна трактувати як перехід від старої до нової системи координат: $(y) = (y^1, y^2, \dots, y^n)$, що описується графом з п'ятьма вузлами та шістьма гілками (рис. 2.5). В новій системі координат, на відміну від старої, положення вузлів та їхня кількість залишиться однаковою, а кількість гілок і їхні напрямлення можуть змінюватися.

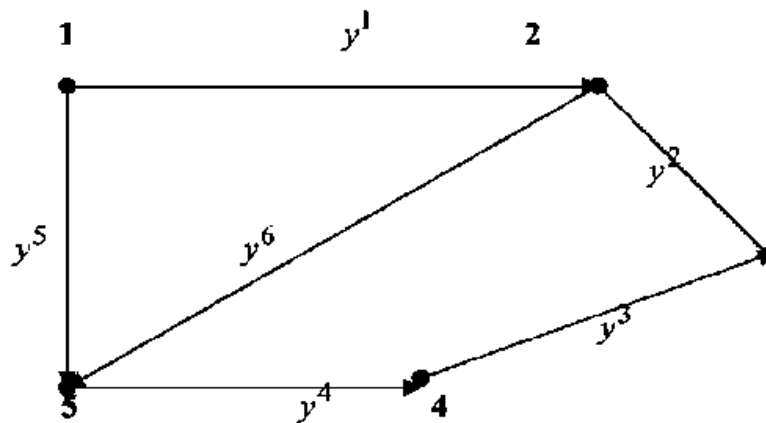


Рис. 2.5. Структура системи координат (y)

Дані системи координат можуть відповідати топології мережі чи розподілу інформаційних потоків, а також різним параметрам, наприклад, навантаженню [19, 21].

Для розглянутих випадків згідно рис. 2.4 та рис. 2.5 матрицю переходу від нової до старої системи координат можна записати як:

$$x(y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix},$$

а матрицю переходу від старої до нової системи координат як:

$$y(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & -0,5 & 0,5 & 0,5 & 0 & 0,5 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Далі на основі відомостей про тензори в одній системі координат, можна визначити тензори в іншій системі координат, використовуючи співвідношення (1.1).

2.2.1. Основні параметри тензорного представлення в мережі для різних систем координат

Нехай стан мережі в певний момент часу являє собою певну точку в досліджуваному геометричному просторі. В наступний момент часу стан телекомунікаційної мережі, який може спостерігатися, відповідає околу цієї точки. Очевидно, що з часом навантаження у мережі буде змінюватися, отже, буде змінюватися і стан мережі.

Введемо систему координат, що відображає n -мірне поле, де кожна точка відповідає певному стану телекомунікаційної мережі. Навантаження, що передається в кожному i -му каналі, позначимо 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 одиничну довжину, яка може служити загальноприйнятою, 1 біт або 1 байт, або відповідати мінімальному значенню обміну даними в системі, що здійснюється при вказаній дискретності [34].

Розглянемо радіус-вектор \mathbf{r} , який проведений від центру системи координат до заданої точки, що відповідає стану мережі, та визначається як

$$\mathbf{r} = x^i \mathbf{e}_i. \quad (2.28)$$

Стан мережі є незалежним від вибору системи координат, тому радіус-вектор \mathbf{r} є інваріантним для коваріантної та контраваріантної системи телекомунікаційної мережі. Отже, коваріантні складові x_i визначають як

$$x_i = \mathbf{r} \mathbf{e}_i. \quad (2.29)$$

Зв'язок коваріантних x_i і контраваріантних x^i компонентів має вигляд [146]

$$x_i = \mathbf{e}_i \mathbf{e}_j x^j = g_{ij} x^j, \quad (2.30)$$

де g_{ij} – метричний коваріантний тензор. Крім репера $\{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n\}$ має місце ортогональний йому репер $\{\mathbf{e}^1, \dots, \mathbf{e}^n\}$.

Метричний контраваріантний тензор визначається

$$g^{ij} = \mathbf{e}^i \mathbf{e}^j, \quad (2.31)$$

який, на відміну від (2.30), піднімає індекс:

$$x^i = g^{ij} x_j. \quad (2.32)$$

Загалом стан мережі представляється довжиною радіус-вектора і може бути визначений одночасно в коваріантній і контраваріантній системі координат в квадратичній формі:

$$\mathbf{r}^2 = x^i x_j = g_{ij} x^i x^j = g^{ij} x_i x_j. \quad (2.33)$$

Враховуючи (2.33), зміну стану представляють у вигляді :

$$(d\mathbf{r})^2 = dx^i dx_j = g_{ij} dx^i dx^j = g^{ij} dx_i dx_j. \quad (2.34)$$

Одночасно доцільно розглядати різні системи координат, наприклад, в новій системі координат навантаження в i -му каналі позначимо компонентою q^i . Нехай стан мережі можна визначати за допомогою компонент x^i і q^i , які пов'язані один з одним і в загальному випадку можна представити як

$$x^i(\mathbf{r}) = x^i(q^1, \dots, q^n), \quad \text{або} \quad q^i(\mathbf{r}) = q^i(x^1, \dots, x^n).$$

Останні функції мають однакову кількість компонент, тому є взаємнообернені і визначаються якобіаном перетворення

$$\det \left| \frac{\partial x^i}{\partial q^j} \right| \neq 0, \quad \det \left| \frac{\partial q^i}{\partial x^j} \right| \neq 0, \quad (2.35)$$

які є оберненими. Будемо вважати, що розглянуті функції в роботі мають достатній клас гладкості. Таким чином, всі диференційовані функції не рівні нулю, зокрема $\partial \mathbf{r} / \partial x^i \neq 0$ і $\partial \mathbf{r} / \partial q^i \neq 0$.

Прикладами, коли необхідно розглядати одночасно різні системи координат, є випадки [34]:

1) одна система складена з вхідних і вихідних навантажень на вузли (нехай це компонента для розглянутого випадку x^i), інша система координат є, коли q^i відповідає навантаженню на гілках або транзитних вузлах;

2) координати x^i відповідають навантаженню на каналах, q^i координати – навантаженню на вузлах і контурах;

3) навантаження віртуальних каналів у системи координат x^i , а q^i відповідає каналам фізичного рівня;

4) для координати x^i навантаження у розмірностях в байтах або бітах, тоді як q^i може розглядатися кількість пакетів або кількість блоків для OBS [3].

Крім навантаження, компонентами (x та q) різних систем координат можуть розглядатися також час передачі даних між вузлами, пропускна здатність в каналі та інше.

Можна розглядати системи координат з іншим центром системи координат O' . Нехай точка O' відповідає стану мережі, коли почались проводитись спостереження за мережею в певний момент часу τ_0 . Для такої системи координат радіус–вектор є \mathbf{r}' , який проведений від O' до точки, що відповідає стану мережі. Очевидно, що з геометричної точки зору радіуси векторів пов'язані: $\mathbf{r} = \mathbf{r}' + \overrightarrow{OO'}$.

Взаємозв'язок між реперами для різних систем координат визначається за допомогою якобіанів перетворення, таких як (2.35), або для коваріантних реперів представимо перехід від системи координат (x) до (q):

$$\mathbf{e}_i(\mathbf{x}) = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial x^i} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial q^j} \frac{\partial q^j}{\partial x^i} = \mathbf{e}_j(\mathbf{q}) \frac{\partial q^j}{\partial x^i}, \quad (2.36)$$

де орти $\mathbf{e}_i(\mathbf{x})$ та $\mathbf{e}_i(\mathbf{q})$ відповідають системам координат, в яких навантаження складене з компонент x та q , відповідно. Водночас метричний тензор з врахуванням (2.36) визначається як :

$$g^{ij}(\mathbf{x}) = \mathbf{e}^i(\mathbf{x}) \mathbf{e}^j(\mathbf{x}) = \mathbf{e}^s(\mathbf{q}) \mathbf{e}^k(\mathbf{q}) \frac{\partial q^s}{\partial x^i} \frac{\partial q^k}{\partial x^j} = g^{sk}(\mathbf{q}) \frac{\partial q^s}{\partial x^i} \frac{\partial q^k}{\partial x^j}, \quad (2.37)$$

де розглянуті параметри відповідають системам координат позначених як (x) і (q) .

Очевидно, що (2.33) і (2.34) для іншої системи координат будуть мати наступний вигляд:

$$\mathbf{r}^2 = q^i q_j = g_{ij}(\mathbf{q}) q^i q^j = g^{ij}(\mathbf{q}) q_i q_j. \quad (2.38)$$

$$(d\mathbf{r})^2 = dq^i dq_j = g_{ij}(\mathbf{q}) dq^i dq^j = g^{ij}(\mathbf{q}) dq_i dq_j. \quad (2.39)$$

Далі x^i і q^i будемо позначати як r^i , x_i і q_i - r_i , а часткові похідні $\partial/\partial x^i$ і $\partial/\partial q^i$ - як ∂/∂_i .

Введемо додатковий параметр – лінійна зміна навантаження протягом часу відносно всіх каналів в точці стану мережі:

$$\mathbf{u} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial \tau} = \frac{\partial (r^i \mathbf{e}_i)}{\partial \tau} = \frac{\partial r^i}{\partial \tau} \mathbf{e}_i + \frac{\partial \mathbf{e}_i}{\partial \tau} r^i = u^i \mathbf{e}_i, \quad (2.40)$$

де модуль зміни навантаження вздовж осі \mathbf{e}^i визначається:

$$u_i = \frac{\partial r^i}{\partial \tau} + \frac{\partial \mathbf{e}_i}{\partial \tau} \mathbf{r} = \left(\frac{\partial r^i}{\partial r^k} + \frac{\partial \mathbf{e}_i}{\partial r^k} \mathbf{r} \right) \frac{\partial r^k}{\partial \tau}.$$

Для випадку, коли орти систем координат не залежать від часу, тобто $\partial \mathbf{e}^i / \partial \tau = 0$, (2.40) спрощується [34]:

$$\mathbf{u} = \frac{\partial (r^i \mathbf{e}_i)}{\partial \tau} = \frac{\partial r^i}{\partial \tau} \mathbf{e}_i = u^i \mathbf{e}_i.$$

2.2.2. Незвідні представлення тензорів

Кожен тензор можна розкласти на незвідні представлення [267, 268]. В [269] проводився аналіз трафіка, де симетричний тензор розкладається на

кульове (скалярне) та девіаторне представлення. Згідно [26, 37, 267] в загальному випадку тензор другого рангу e_{ij} можна розкласти на симетричний b_{ij} та антисиметричний w_{ij} :

$$\begin{aligned} e_{ij} &= e_{(ij)} + e_{[ij]} = b_{ij} + w_{ij}, \\ b_{ij} &= 1/2 (e_{ij} + e_{ji}), & w_{ij} &= 1/2 (e_{ij} - e_{ji}). \end{aligned} \quad (2.41)$$

З точки зору мережі, симетричний тензор b_{ij} характеризує наскільки досліджувані параметри є незалежними від напрямку між вузлами (ij):

$$b_{ij} = \Gamma^{(b)} \delta_{ij} + D_{ij}^{(b)}, \quad \Gamma^{(b)} = 1/3 b_{ii}, \quad D_{ij}^{(b)} = b_{ii} - \Gamma^{(b)}. \quad (2.42)$$

де δ_{ij} – символ Кронекера. З (2.42) бачимо, що коли скаляр $\Gamma^{(b)} = 0$, то в мережі відсутні цикли між вузлами. Девіатор $D_{ij}^{(b)}$ подібний за своєю суттю до тензора b_{ij} , але вже без можливих петель в мережі.

Антисиметричний тензор другого роду w_{ij} відносно мережі можна розглядати як характеристику того, наскільки досліджувані параметри відрізняються від напрямку гілки (ij) та (ji).

При розгляді в трьохвимірній системі координат антисиметричний тензор w_{ij} представляють через псевдовектор V_k [24, 26, 268]:

$$w_{ij} = \varepsilon_{ijk} V_k, \quad (2.43)$$

де ε_{ijk} – символ Леві -Чівіта.

В n-мірній системі координат над антисиметричним тензором w типу (0, n-s) здійснюється операція дуалізації, в результаті якої отримується дульний тензор $*w$ типу (k, 0):

$$*w_{i_1 \dots i_n} = \frac{1}{s!} E_{i_1 \dots i_s i_{s+1} \dots i_n} w^{i_1 \dots i_s}. \quad (2.44)$$

де $E_{ij\dots} = \sqrt{|g|} \varepsilon_{ij\dots}$ – тензор Леві -Чівіта, g – визначник метричного тензора, $\varepsilon_{ij\dots}$ – символ Леві -Чівіта для n-мірної системи координат, $*$ – оператор Ходжа.

При дуалізації симетричного тензора згортка антисиметричного символу Леві - Чівіта дає нуль.

2.2.3. Похідні та диференціювання в тензорному аналізі для телекомунікаційної мережі

Диференціальна залежність стану мережі від кількості даних на шляхах дозволяє дослідити її динамічну поведінку [270]. Співвідношення (2.34), (2.39) та (2.40) відповідають за зміну стану мережі. У загальному випадку така зміна відбувається систематично і повинна здійснювати зміну перерозподілу навантаження у каналах. В новому стані мережі внаслідок зміни потоків виникає взаємний вплив між каналами та перерозподіл навантаження між ними. В [146] пропонується використовувати другі часткові похідні \mathbf{r} для відображення зміни системи координат:

$$\frac{\partial \mathbf{e}_i}{\partial r^j} = \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial r^i \partial r^j} = \mathbf{r}_{ij}. \quad (2.45)$$

Величини \mathbf{r}_{ij} можуть бути розкладені на всі існуючі компоненти $k=1, \dots, n$, що визначають вплив одночасної взаємодії каналів через зміну кількості навантаження у мережі. Отже, \mathbf{r}_{ij} можна розкласти по векторам локального репера \mathbf{e}_k :

$$\mathbf{r}_{ij} = \Gamma_{ij}^k \mathbf{e}_k, \quad (2.46)$$

де Γ_{ij}^k – коефіцієнти зв'язності або символи Крістофеля.

При зміні навантаження у мережі саме коефіцієнт зв'язності дозволяє описати оптимальний перерозподіл навантаження в каналах.

Враховуючи, що

$$\mathbf{e}^k \mathbf{e}_m = \delta_m^k, \quad (2.47)$$

де δ – символ (тензор) Кронекера, тоді помноживши \mathbf{e}^k на (2.46), отримаємо символ Крістофеля другого роду:

$$\Gamma_{ij}^k = \mathbf{e}^k \mathbf{r}_{ij} = \mathbf{e}^k \frac{\partial \mathbf{e}_i}{\partial r^j} = \mathbf{e}^k \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial r^i \partial r^j} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial r^k} \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial r^i \partial r^j} = \mathbf{e}^k \frac{\partial \mathbf{e}_j}{\partial r^i} = \mathbf{e}^k \partial_i \mathbf{e}_j. \quad (2.48)$$

Враховуючи властивості метричного тензора опускати чи піднімати індекс, наприклад, (2.30) та (2.31), помноживши (2.48) на метричний коваріантний тензор, отримаємо символ Крістофеля першого роду:

$$\Gamma_{k,ij} = \mathbf{e}_k \mathbf{r}_{ij} = \mathbf{e}_k \frac{\partial \mathbf{e}_i}{\partial r^j} = \mathbf{e}_k \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial r^i \partial r^j} = \frac{\partial \mathbf{r}}{\partial r^k} \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial r^i \partial r^j}. \quad (2.49)$$

З (2.48) та (2.49) бачимо, що символ Крістофеля симетричний по індексам i та j , тобто вплив перерозподілу навантаження з i -го каналу на j -й канал і навпаки є однаковим при зміні навантаження на k -му каналі.

Важливо зазначити, що символи Крістофеля і матриці переходу не є тензорами.

В криволінійні системи координат, коли похідна $\partial \mathbf{e}^i / \partial_j \neq 0$, то реperi можуть змінюватися за напрямком. Крім того, розглядаючи мережу із пріоритетом можливі випадки, коли навантаження з меншим пріоритетом буде затримано або одночасно перенаправлено в інший канал. Аналогічно важливим є розгляд систем координат на основі фізичного рівня і віртуального зв'язку між вузлами, коли канал фізичного рівня в певний момент часу відповідає одному каналу віртуального зв'язку, а пізніше – іншому віртуальному каналу. В розглянутих прикладах похідна $\partial \mathbf{e}^i / \partial_j$ є фактично зміною у часі. Водночас, коли одна система координат складена з компонент вхідного і вихідного навантажень на вузлах, а інша система – з компонент розподіленого навантаження на гілках, то фактично (2.35) є незмінним.

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

$$D\mathbf{r} = \partial_k \mathbf{r} dr^k = \partial_k (r^i \mathbf{e}_i) dr^k = (\mathbf{e}_i \partial_k r^i + r^i \partial_k \mathbf{e}_i) dr^k,$$

В першому доданку німі індекси можемо перейменувати, а в другому доданку врахуємо (2.45) і (2.46), внаслідок чого отримаємо:

$$\begin{aligned} D\mathbf{r} &= \left(\mathbf{e}_j \partial_k r^j + r^i \frac{\partial^2 \mathbf{r}}{\partial r^i \partial r^k} \right) dr^k = \left(\mathbf{e}_j \partial_k r^j + r^i \mathbf{e}_j \Gamma_{ik}^j \right) dr^k = \\ &= \mathbf{e}_j \left(\partial_k r^j + r^i \Gamma_{ik}^j \right) dr^k = \mathbf{e}_j (D_k r^j) dr^k = \mathbf{e}_j D r^j. \end{aligned} \quad (2.50)$$

де $D\Gamma^j$ – коваріантний диференціал, $D_k r^j$ – коваріантна похідна, яка для r^j та r_j , відповідно має вигляд:

$$D_k r^j = \left(\partial_k r^j + r^i \Gamma_{ik}^j \right), \quad \text{та} \quad D_k r_j = \left(\partial_k r_j - r_i \Gamma_{jk}^i \right). \quad (2.51)$$

Опускання чи піднімання індексів параметрів під коваріантним диференціалом здійснюється з використанням теореми Річі:

$$D_k g_{ij} = 0, \quad \text{або} \quad D_k g^{ij} = 0.$$

Звернемо увагу, що після коваріантного диференціювання отримується тензор.

Зміну навантаження протягом часу тепер можна представити у вигляді:

$$\mathbf{u} = \mathbf{e}_i (D_k r^i) \frac{\partial r_k}{\partial \tau}, \quad u^i = \left(\partial_k r^i + r^j \Gamma_{jk}^i \right) \frac{\partial r_k}{\partial \tau}.$$

На практиці відомості про зміну стану мережі на вузлах надходять по різному.

Нехай на вузол S надійшло навантаження, яке має бути передане на вузол J , отже, відбулась зміна стану мережі, що відповідає множині \mathbf{V} . Припустимо, що в цей же момент надійшло навантаження на вузол Y для вузла Q , відповідна зміна стану мережі відповідає множині \mathbf{U} . Згідно рис. 2.6 множина \mathbf{V} складається з векторів \mathbf{a} та \mathbf{d} , а множина \mathbf{U} – з векторів \mathbf{b} та \mathbf{c} . Різниця між векторами \mathbf{a} та \mathbf{d} , як і між \mathbf{b} та \mathbf{c} , полягає у послідовній зміні стану мережі.

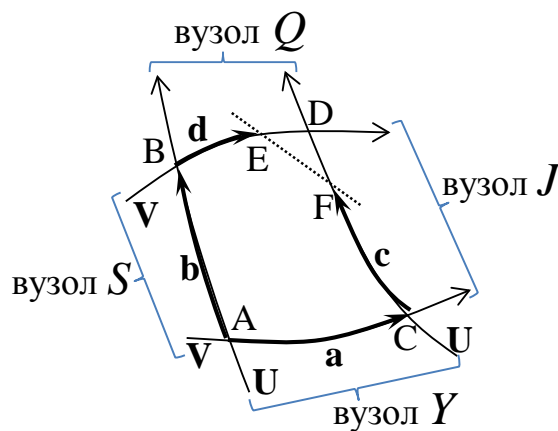


Рис. 2.6. Зміна послідовності кореляції стану мережі у криволінійній системі координат

Нехай спочатку стан мережі змінився за рахунок навантаження, що надійшло на вузол S для передачі даних на вузол J , тоді:

$$\mathbf{a} = a^i \mathbf{e}_i = (D_v r^i) dr^v \mathbf{e}_i,$$

потім надійшло навантаження з вузла Y на вузол Q :

$$\mathbf{c} = (D_u(r^i + a^i)) dr^u \mathbf{e}_i = (D_u(r^i + (D_v r^i) dr^v)) dr^u \mathbf{e}_i.$$

У випадку, коли зміна стану мережі відбувається внаслідок надходження на вузол Y навантаження, яке має бути передане на вузол Q , то:

$$\mathbf{b} = b^i \mathbf{e}_i = (D_u r^i) dr^u \mathbf{e}_i,$$

а потім з вузла S надходить навантаження на вузол J згідно рис. 2.6:

$$\mathbf{d} = (D_v(r^i + b^i)) dr^v \mathbf{e}_i = (D_v(r^i + (D_u r^i) dr^u)) dr^v \mathbf{e}_i.$$

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:

$$(\mathbf{a} + \mathbf{c}) - (\mathbf{b} + \mathbf{d}) = (D_u D_v - D_v D_u) r^i dr^u dr^v \mathbf{e}_i = R^i_{j,uv} r^j dr^u dr^v \mathbf{e}_i, \quad (2.52)$$

де $R^i_{j,uv}$ – тензор Рімана (тензор кривизни), який визначають за допомогою символів другого роду Крістофеля (коефіцієнти зв'язності):

$$R^i_{j,uv} = \frac{\partial \Gamma^i_{jv}}{\partial r^u} - \frac{\partial \Gamma^i_{ju}}{\partial r^v} + \Gamma^i_{pu} \Gamma^p_{jv} - \Gamma^i_{pv} \Gamma^p_{ju}. \quad (2.53)$$

В (2.52) враховано, що

$$(D_u D_v - D_v D_u) r^i = R^i_{j,uv} r^j.$$

Зазначимо, що вектори \mathbf{d} та \mathbf{c} отримані внаслідок паралельного переносу векторів \mathbf{a} та \mathbf{b} , відповідно.

Якщо всі компоненти тензора Рімана рівні нулю, то (2.52) також рівний нулю, значить зміна станів, що комутують між собою, і всі коваріантні похідні також комутують, а простір є евклідовим.

Тензор Рімана з (2.52) та (2.53) визначає наскільки вектор зміни стану відрізняється при його перенесенні по нескінченно малому замкнутому контуру. Чим більша кривизна і площа, тим більше змінюються компоненти, тобто залежить наскільки різкою є зміна стану мережі.

Представлені співвідношення є вірними в межах ріманової геометрії, коли нижня пара індексів у символі Крістофеля є симетричною, інакше в (2.52) необхідно врахувати доданок:

$$(\Gamma_{uv}^p - \Gamma_{uv}^p)(\partial_p r^i + \Gamma_{jp}^i r^j) = 2T_{uv}^p(\partial_p r^i + \Gamma_{jp}^i r^j), \quad (2.54)$$

де $T_{uv}^p = 0,5(\Gamma_{uv}^p - \Gamma_{uv}^p)$ – тензор кручення.

Зміну симетричного метричного тензора в ріманівській геометрії можна визначити за допомогою потоку Річі:

$$\frac{dg_{(ij)}}{d\tau} = -2R_{ij},$$

де $R_{ij} = R^k_{i,kj}$ – тензор Річі, який відповідає згорнутому, наприклад, по першому і третьому індексу, тензору Рімана. При проведенні додаткової згортки отримуємо скаляр кривизни простору:

$$R = g^{ij}R_{ij}.$$

Кількість компонент символів Крістофеля і тензора Рімана досить швидко зростає із збільшенням розмірності простору. Для спрощеного визначення цих компонент доцільно використовувати диференціальні форми (271). Тензор Рімана можна визначити за допомогою структурного рівняння Картана:

$$d\omega_j^i + \omega_p^i \wedge \omega_j^p = 0,5R^i_{j,mk} \mathbf{dr}^m \wedge \mathbf{dr}^k. \quad (2.55)$$

де \mathbf{dr}^i – це градієнт, а не диференціал, причому $\mathbf{dr}^i \equiv e^i$, що являє собою ще одне позначення векторів взаємного базису; позначення (d) – відповідає операції зовнішнього диференціювання, а (\wedge) – косий (зовнішній) добуток.

Наприклад, для вектора 1-форми по базису \mathbf{dr}^i :

$$\mathbf{a} = a_i \mathbf{dr}^i,$$

зовнішнє диференціювання визначається як

$$d\mathbf{a} = da_i \wedge \mathbf{dr}^i = \partial_j a_i \mathbf{dr}^j \wedge \mathbf{dr}^i. \quad (2.56)$$

Представлені 1-форми, пов'язані метричним тензором і зв'язністю

$$\begin{aligned} \omega_i &= g_{ij} \mathbf{dr}^j, & \omega^i &= g^{ij} \omega_j \mathbf{dr}^i, \\ \omega_{ij} &= \Gamma_{i,jk} \mathbf{dr}^k, & \omega_j^i &= g^{ip} \omega_{pj} = \Gamma_{jk}^i \mathbf{dr}^k. \end{aligned} \quad (2.57)$$

Слід зазначити, що тензор Рімана може бути також визначений за допомогою подвійного коваріантного зовнішнього диференціювання (2.52).

Альтернативою зовнішнього диференціювання є похідна Лі L_v вздовж векторного поля V від тензора $U^i_{jk\dots}$:

$$(L_v U)^i_{jk\dots} = \left. \frac{dU^i_{jk\dots}}{dv} \right|_{v=0}, \quad (2.58)$$

де векторне поле визначається:

$$\mathbf{V} \equiv \frac{d}{dv} = V^j(r^1, r^2, \dots, r^n) \frac{\partial}{\partial r^j}.$$

Похідна Лі від вектора – дужки Лі:

$$(L_v \mathbf{U})^i = V^j \partial_j U^i - U^j \partial_j V^i = ([\mathbf{V}, \mathbf{U}])^i. \quad (2.59)$$

Зазначимо, що тут є алгебра Лі, оскільки розглядається лінійний простір, в якому задана операція дужок Лі, що володіє властивостями антисиметричності:

$$[\mathbf{a}, \mathbf{b}] = -[\mathbf{b}, \mathbf{a}],$$

лінійності:

$$[\alpha_v \mathbf{a} + \beta_v \mathbf{b}, \mathbf{c}] = \alpha_v [\mathbf{a}, \mathbf{c}] + \beta_v [\mathbf{b}, \mathbf{c}],$$

та тотожності Якобі:

$$[\mathbf{a}[\mathbf{b}, \mathbf{c}]] + [\mathbf{b}[\mathbf{c}, \mathbf{a}]] + [\mathbf{c}[\mathbf{a}, \mathbf{b}]] = 0.$$

Для проведення коваріантної похідної необхідно мати значення символів Крістофеля, за допомогою яких проводяться паралельні перенесення тензорів. Похідна Лі не потребує врахування коефіцієнтів зв'язності, а паралельне перенесення визначається вздовж інтегральної кривої будь-якого фіксованого векторного поля. На відміну від коваріантної похідної, за допомогою похідної Лі (приклад на рис. 2.6) співвідношення (2.52) можна представити у вигляді:

$$(\mathbf{a} + \mathbf{c}) - (\mathbf{b} + \mathbf{d}) = L_v \mathbf{U} dr(v) dr(u) = [\mathbf{V}, \mathbf{U}] dr(v) dr(u), \quad (2.60)$$

де вектори \mathbf{a} та \mathbf{d} відповідають зміщенню стану у векторному полі $V^i(r^1, r^2, \dots, r^n)$, а вектори \mathbf{b} та \mathbf{c} – у векторному полі $U^i(r^1, r^2, \dots, r^n)$. Векторні поля, для яких дужка Лі (2.60) рівна нулю, називають координатними. З

точки зору наших досліджень, похідна Лі $L_v \mathbf{U}$ може розглядатися як визначення інваріантної похідної по заданому векторному полі \mathbf{V} від тензорного поля \mathbf{U} при зміні стану мережі.

Зміна навантаження від часу за допомогою похідної Лі визначається як:

$$L_v \mathbf{u} = (v^j - u^j) D_j D_k r^i \frac{\partial r_k}{\partial \tau}.$$

З точки зору алгебри Лі, зміна, що станів комутиють між собою, коли векторні поля є координатними, коли дужки Лі дорівнюють нулю.

Загалом, відомості про послідовність зміни стану мережі на різних ділянках можуть відрізнитися, тому для зменшення ймовірних втрат та помилок необхідно, щоб компоненти тензора Рімана або дужок Лі дорівнювали нулю.

2.2.4. Узагальнена тензорна модель розрахунку параметрів телекомунікаційної системи

Розглянемо $(n+N)$ – простір, який складається з $(n+N)$ – координат, де n – гілок, N – вузлів. Для повнозв'язаної мережі, коли $n = N(N-1)/2$, маємо $N(N+1)/2$ -простір.

Відому формула Літтла [22-26] представимо у безкоординатній формі запису:

$$\mathbf{H} = \mathbf{T}\mathbf{L}, \quad (2.61)$$

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} . З (2.61), користуючись тензорними операціями, зокрема згорткою [272], можна визначити час перебування даних у вибраній ділянці мережі:

$$\mathbf{T} = \mathbf{H}\mathbf{L}^{-1}. \quad (2.62)$$

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

Зазначений в (2.61), один з тензорів \mathbf{H} , \mathbf{L} або \mathbf{T} можна представити у вигляді тензору другого роду, а інші два – як тензори першого роду. В [144, 145, 147, 273] \mathbf{H} розглядають як контраваріантний вектор, \mathbf{T} –коваріантний

вектор, але \mathbf{L} – контраваріантний, а \mathbf{L}^{-1} – конваріантний метричний тензор. Слід зазначити, що у такому випадку репери $\{\mathbf{e}^1, \dots, \mathbf{e}^n\}$ та $\{\mathbf{e}_1, \dots, \mathbf{e}_n\}$ не є нормовані, тобто $\mathbf{e}^i \mathbf{e}^i \neq 1$ і $\mathbf{e}_i \mathbf{e}_i \neq 1$.

Враховуючи, що розглядуваний простір складається з двох підпросторів – n -простір гілок (Γ) та N -простір вузлів (B), то досліджувані параметри \mathbf{H} , \mathbf{L} , \mathbf{T} можна розглядати окремо і представити як \mathbf{H}^Γ та \mathbf{H}^B , \mathbf{L}^Γ та \mathbf{L}^B , \mathbf{T}^Γ та \mathbf{T}^B , відповідно.

Отже, досліджувані параметри у вибраному маршруті можна представити як [23]:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}^B + \mathbf{T}^\Gamma, \quad \mathbf{H} = (\mathbf{H}^B \quad \mathbf{H}^\Gamma), \quad \mathbf{L}^{-1} = \begin{pmatrix} \mathbf{L}^{B^{-1}} \\ \mathbf{L}^{\Gamma^{-1}} \end{pmatrix}.$$

Звідси (2.62) можна записати у вигляді:

$$\mathbf{T}^B = \mathbf{H}^B \mathbf{L}^{B^{-1}}, \quad \mathbf{T}^\Gamma = \mathbf{H}^\Gamma \mathbf{L}^{\Gamma^{-1}}. \quad (2.63)$$

Час перебування на вузлах можна розкласти як:

$$\mathbf{T}^B = \mathbf{T}^ч + \mathbf{T}^{обс}, \quad (2.64)$$

де $\mathbf{T}^ч$ – час перебування повідомлення у черзі на обслуговування, $\mathbf{T}^{обс}$ – час обслуговування заданих даних. Для вибраного вузла, наприклад, для i -го вузла, (2.64) має вигляд:

$$\mathbf{T}_i^B = \mathbf{T}_i^ч + \mathbf{T}_i^{обс}. \quad (2.65)$$

Водночас, враховуючи (2.63) та (2.65), знаходимо

$$\mathbf{T}_i^{обс} = h_i \mathbf{L}_i^{B^{-1}}, \quad (2.66)$$

$$\mathbf{T}_i^ч = h_i^ч \mathbf{L}_i^{B^{-1}}, \quad (2.67)$$

де \mathbf{L}_i^B – пропускна здатність розглянутого вузла, h_i – навантаження, яке планується надіслати на обраний вузол, $h_i^ч$ – середнє навантаження у черзі на вузлі, яке знаходимо у вигляді:

$$\mathbf{h}_i^ч = \mathbf{N}_i^ч \mathbf{1}_i, \quad (2.68)$$

де N_i^c – середня кількість даних у черзі, l_i – середня довжина даних. Очевидним є те, що T^c не залежить від навантаження h_i , тоді в (2.83) \mathbf{H}^B можна розкласти як:

$$\mathbf{H}^B = \mathbf{H}^c + \mathbf{H}^{обс}. \quad (2.69)$$

2.2.5. Тензорний аналіз для дослідження багатопляхової маршрутизації

При передачі даних за допомогою \mathbf{K}_R шляхової маршрутизації спочатку визначаємо множину всіх можливих маршрутів за допомогою теорії графа [151]. Далі обмежуємося \mathbf{K}_R маршрутами з найменшим часом затримки, по яким і будуть передані дані. Водночас розглядаємо які саме N вузлів та n гілок використовуються для даних маршрутів.

Використаємо тензорний підхід в мережах, запропонований Г.Кроном [140] та розглянутий в телекомунікаційних системах [144]. Для вибраної множини систем координат кількість гілок у будь-якій одномірній мережі чисельно дорівнює сумі [140] :

$$n=r+s, \quad (2.70)$$

де r – кількість замкнутих шляхів (контурів); s – кількість незалежних розімкнутих шляхів (вузлових пар), яка визначається [140]:

$$s=N-\alpha_T, \quad (2.71)$$

де α_T – кількість незв'язних підмереж. В нашому випадку, щоб не ускладнювати задачу, $\alpha_T=1$.

Відповідно до постулату другого узагальнення Г. Крона [140], як функціональний інваріант пропонованої моделі виступає тензорне рівняння Літла, що зберігає свою форму незмінною незалежно від координатної системи розгляду мережі. Вводяться дві координатні системи. Перша – система координат гілок мережі, друга – система координат незалежних контурів і пар вузлів мережі. При цьому в першій системі координат як координатні шляхи безпосередньо виступають окремі гілки мережі, а в

другій – координатні шляхи представлені незалежними контурами і вузловими парами.

Правила перетворення для досліджуваних параметрів записують у такому вигляді [144]:

$$H^{\Gamma} = C_{\Pi} H^{KB}, \quad (2.72)$$

$$T^{\Gamma} = A_{\Pi} T^{KB}, \quad (2.73)$$

$$L^{\Gamma} = C_{\Pi} L^{KB} C_{\Pi}^t \quad \text{або} \quad L^{\Gamma} = A_{\Pi} L^{KB} A_{\Pi}^t, \quad (2.74)$$

$$C_{\Pi}^t = A_{\Pi}^{-1}.$$

де C_{Π} та A_{Π} – матриці контраваріантного та коваріантного перетворення, відповідно; навантаження H^{Γ} та H^{KB} , час затримки T^{Γ} та T^{KB} , пропускна здатність L^{Γ} та L^{KB} введених вище координатних системах окремих гілок мережі та незалежних контурів і пар вузлів, відповідно.

В [144, 273] детально розглянуто тензорні моделі та методи дослідження телекомунікаційних систем, де затримка часу на транзитних вузлах не враховується, тобто

$$T^B = 0. \quad (2.75)$$

Така модель та методи дослідження полегшують та спрощують самі розрахунки. Водночас тут не враховується час затримки на вузлах. В роботах [22, 36] запропоновано вводити додаткову гілку замість транзитних вузлів, що дозволяє враховувати час затримки на відповідних вузлах.

2.3. Метод діакоптики для аналізу мереж великих розмірів

Методом діакоптики [5, 16, 27, 70, 71, 274] можна проводити обчислення та аналіз телекомунікаційних мереж будь-яких великих розмірів.

2.3.1. Алгоритм аналізу параметрів телекомунікаційних мереж з багатопляховою маршрутизацією

Одним з ефективних способів дослідження мережі великих розмірів є діакоптика [18, 19, 27, 60, 62, 63, 161, 274].

Розкладемо телекомунікаційну мережі на підмережі, які відносяться до підмножини \mathbf{J}_1 , а зв'язок підмереж нехай відноситься до підмножини \mathbf{J}_2 [5,

16]. Об'єднана топологічна структура являє собою всю мережу і математично представляється множиною \mathbf{J} . Сукупність множин \mathbf{J}_1 та \mathbf{J}_2 об'єднані в структурну множину $\mathbf{J}=\mathbf{J}_1 \times \mathbf{J}_2$ [16].

Для розрахунку телекомунікаційної мережі методом діакоптики задається система і записується її рівняння стану у символній формі, наприклад, формула Літла (2.61).

Завдання зводиться до розв'язку системи рівнянь (2.62), де \mathbf{H} та \mathbf{L} задані, а час затримки – невідомий.

На початковому етапі розв'язку задачі методом розділення задана тільки досліджувана система, а розв'язки рівняння (2.61) – відсутні.

Етап перший. Розчленування моделі. Розглядаються підмережі з підмножини \mathbf{J}_1 , які ділимо на кілька підсистем.

Другий етап. Видалення розділених зв'язків.

З досліджуваної системи видаляються усі цикли з'єднання між підсистемами. У підсистемах не залишається жодних зв'язків з іншими підсистемами, за якими можна було б визначити як вони були пов'язані один з одним. Тобто передбачається, що розділені гілки не належать ні до однієї з n_d підсистем початкової системи. Оскільки ними нехтують, то їх потрібно віднести до додаткової n_d+1 -ої підсистеми, яку треба побудувати.

Третій етап – отримання і розв'язання рівняння (2.62) для кожної підсистеми. Вводиться параметр $\mathbf{F}_d^1 = \mathbf{L}^{-1}$.

Четвертий етап полягає в отриманні і розв'язанні рівнянь системи, що називається колом перетинів.

Оскільки (n_d+1) -а система перетинів відіграє центральну роль в методі розділення, то виділяється чотири кроки її побудови:

I. З повних схем підсистем виділяються лише ті фрагменти, які важливі для взаємодії з іншими підсистемами. Для цих фрагментів записується спрощена матриця обернених пропускових здатностей $\mathbf{F}_d^{I'} = \mathbf{L}^{-1}$, яка є основою для побудови "опорного" кола перетинів.

II. Видалені зв'язки відновлюються, але без врахування пропускну здатності.

III. Фрагменти підсистем об'єднуються і утворюють "опорну" систему перетинів f' .

IV. Вводяться пропускні здатності видалених раніше гілок і остаточно формується матриця F_d .

П'ятий етап. Алгоритм розрахунку матриці значень часових затримок.

Для виконання даного алгоритму задані матриці L' , F_d^{-1} і матриці переходу C_n телекомунікаційної системи, що складаються із n_d+1 підсистем.

Необхідно знайти вектор T значень часових затримок у вузлах вихідної системи.

Вектор, який отримується на кожному етапі обрахунку, має відповідний фізичний зміст, а саме:

1. $T_1 = F_d^{-1} H$ – час затримки передачі даних в ізольованих підсистемах при заданому навантаженні H на вузлах.

2. $t = -C_n^{-1} T_1$ – час затримки передачі даних в перерізі j , який здійснює роз'єднання зв'язків в J_2 .

3. $h = L' t$ – навантаження, що проходить через J_2 .

4. $H^t = C_n h$ – додаткове навантаження в підсистемах J_1 , що виникає за рахунок навантаження у зв'язках між підсистемами J_2 .

5. $T_2 = F_d^{-1} H^t$ – час затримки передачі даних у вузлах внаслідок взаємодії з додатковим навантаженням системи J_2 .

6. $T = T_1 + T_2$ – результуюче значення величини часу затримки передачі даних в об'єднаній системі.

В описаному алгоритмі уже відомі процедури поєднуються разом в новій послідовності для розрахунку параметрів великих телекомунікаційних мереж, зокрема й повністю оптичних.

2.3.2. Алгоритм розрахунку параметрів телекомунікаційної мережі методом лінійного програмування на основі транспортної задачі

Транспортна задача – це задача вибору оптимального варіанту доставки продукції від пунктів виробництва до пунктів споживання з врахуванням всіх реальних можливостей.

Задача лінійного програмування - задача оптимізації з лінійною цільовою функцією та допустимою множиною обмеженою лінійними рівностями або нерівностями. Для телекомунікаційної мережі за допомогою транспортної задачі засобами лінійного програмування вибирається оптимальний варіант шляхів доставки даних від одного граничного вузла до іншого. Зазначимо, що таку оптимізацію доцільно здійснювати при багатошляховій маршрутизації.

Представлений алгоритм передбачає, що вихідна мережа може бути розділена на n_d незв'язаних підмереж і n_d+1 -шу під мережу перетинань. Зазначимо, що зв'язки представляються через таблиці, які містять тільки одиниці з плюсом чи мінусом. Завдання полягає в тому, щоб:

- 1) вибрати K_R маршрутів, які можуть бути використані;
- 2) визначити кількість навантаження, яке має бути відправлено по кожному з обраних маршрутів.

У лінійному програмуванні всі нерівності і негативні знаки перетворюються в рівності і позитивні знаки, вихідні вирази можна записати у вигляді обмежень [38, 274]

$$\tilde{\mathbf{b}} = \tilde{\mathbf{a}} \mathbf{x}, \quad (2.76)$$

і цільової функції

$$\tilde{\mathbf{F}} = \tilde{\mathbf{c}} \mathbf{x} \rightarrow \text{extr}. \quad (2.77)$$

Для простоти записують таблицю у вигляді для (2.76) та (2.77):

$$\left| \begin{array}{c|c} \tilde{\mathbf{b}} & \tilde{\mathbf{a}} \\ \hline \tilde{\mathbf{F}} & \tilde{\boldsymbol{\gamma}} \end{array} \right|. \quad (2.78)$$

де $\tilde{\boldsymbol{\gamma}}$ – називають індексним рядком, який призначений для пошуку варіантів

розв'язків на оптимальність, що в матричному позначенні визначається [275] як:

$$\tilde{\gamma}_j = C_i \tilde{a}_{ij} - C_j. \quad (2.79)$$

В роботі для оцінки якості обслуговування з пошуком мінімального часу затримки для телекомунікаційної мережі, цільова функція може бути представлена як формула Літла (2.62), де $\tilde{\mathbf{F}}$ – відповідає часу затримці \mathbf{T} . Отже, параметр \mathbf{x} у (2.76) та (2.77) – шукане навантаження, яке маємо розподілити по різних шляхам, $\tilde{\mathbf{b}}$ – відповідає навантаженню, що має бути передане, який в (2.78) представлено як стовбець, $\tilde{\mathbf{c}}$ – відповідає оберненій величині пропускну здатності, тобто часу передачі для одиничного навантаження. В (2.76) матриця $\tilde{\mathbf{a}}$ показує зв'язок базису із всіма існуючими змінними.

При оптимізації базисними векторами на початковому етапі вибирають параметри, пов'язані з вузлами, тоді $\mathbf{T}^\Gamma = 0$ і цільова функція $\tilde{\mathbf{F}} = \mathbf{T}^B = \mathbf{H}^B \mathbf{L}^{B-1} = \mathbf{M} \mathbf{H}^B$, де \mathbf{M} – час перебування одиничного навантаження, який перевищує допустимі вимоги згідно рекомендації ІТУ-Т.

Отже, приймаємо, що на всіх вузлах $\mathbf{L}^{B-1} = \mathbf{M}$, тоді (2.77) можна представити у вигляді:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}^B + \mathbf{T}^\Gamma = \mathbf{M} \mathbf{H}^B + \mathbf{H}^\Gamma \mathbf{L}^{\Gamma-1}. \quad (2.80)$$

В роботі (2.78) представляється у загальному вигляді як:

$$\left| \begin{array}{c|c|c} \mathbf{H} & \tilde{\mathbf{a}}^B & \tilde{\mathbf{a}}^\Gamma \\ \hline \tilde{\mathbf{F}} = -\mathbf{T} & \tilde{\gamma}^B & \tilde{\gamma}^\Gamma \end{array} \right|. \quad (2.81)$$

В (2.81) індексний рядок (2.79) можна представити наступним чином:

$$\tilde{\gamma}^\Gamma_j = L_i^{-1} \tilde{a}_{ij} - L_j^{\Gamma-1}. \quad \tilde{\gamma}^B_j = L_i^{-1} \tilde{a}_{ij} - \mathbf{M}. \quad (2.82)$$

Проведення пошуку оптимального розв'язку здійснюється за допомогою алгоритму Данцига таким чином [275]:

1. Якщо добутий розв'язок (2.81) не виконує умови оптимальності, то в індексному рядку знаходять $\tilde{\gamma}_j$, який найбільше порушує ці умови. Для розглядуваного випадку $\tilde{\mathbf{F}} \rightarrow \min$ вибирають найбільш від'ємний елемент $\tilde{\gamma}_j$,

а при $\tilde{F} \rightarrow \max$ – найбільш невід’ємний елемент $\tilde{\gamma}_j$.

2. Розглядаються всі ненульові значення матриці \tilde{a}_{ij} із стовбця j , які дорівнюють 1. Серед вибраних параметрів вибирають рядок із мінімальним значенням H_i в (2.81).

3. За допомогою метода Жордана-Гаусса здійснюється перетворення, де j змінна стає базисом замість i . Далі аналізують отриманий варіант розв’язку.

На рис. 2.7 наведено алгоритм розрахунку методом діакоптики лінійного програмування на основі транспортної задачі для телекомунікаційних мереж великих розмірів.

Етапи оптимізації. Транспортна задача розв’язується окремо для підмереж та мережі перетинань. Об’єднання оптимальних рішень складається з багатократних оптимізацій кожної з підмереж та мережі перетинань із врахуванням взаємодії n_d+1 мереж. Протягом циклу оптимізації кожна підмережа і мережа перетинань оптимізується окремо.

Кожен цикл оптимізації виконується в чотири етапи (рис. 2.7) [274]:

1. Окремо оптимізуються n_d підмереж.

2. Обчислюється реакція від проведених оптимізацій на мережу перетинань.

3. Окремо оптимізується $n_d + 1$ -ша під мережі (мережі перетинань).

4. Обчислюється реакція від оптимізації мережі перетинань на n_d підмережі.

Використання запропонованого алгоритму на основі лінійного програмування потребує численної кількості ітерацій.

При знаходженні оптимального варіанту за допомогою лінійного програмування на основі транспортної задачі з використанням алгоритму Данцига кількість необхідних ітерацій залежить від числа обмежень (базисів - N) і є в діапазоні $1,5N \div 3N$ [275]. З використанням діакоптики кількість ітерацій при лінійному програмуванні на основі транспортної задачі зростає, як мінімум, вдвічі. Необхідно врахувати, що кількість ітерацій в

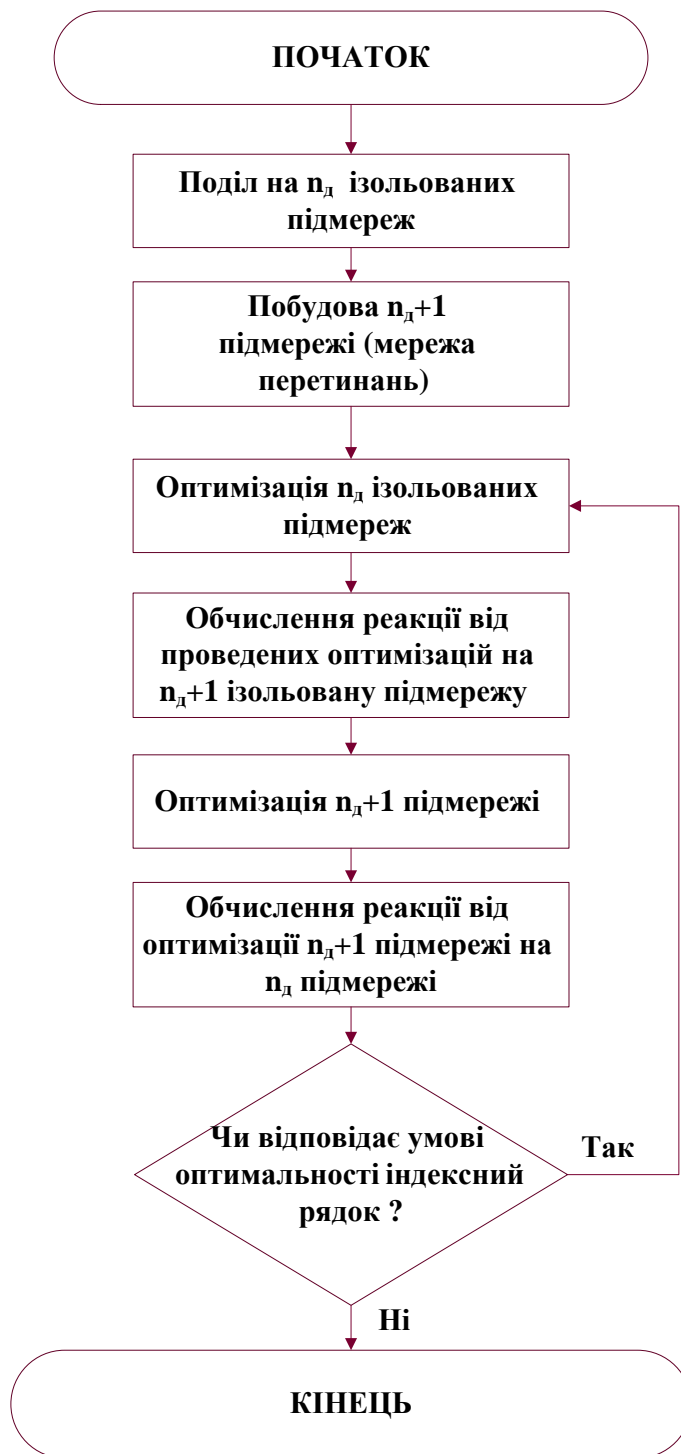


Рис. 2.7. Блок - схема алгоритму за допомогою лінійного програмування на основі транспортної задачі методом діакоптики [70]

підмережах знаходиться в діапазоні $1,5N_i \div 3N_i$, де i – індекс, що відповідає певній підмережі. Очевидно, що:

$$N = \sum_{i=1}^N N_i,$$

Отже, загальна кількість ітерацій на підмережах досягає $1,5N \div 3N$. Така ж кількість ітерацій є і в мережі перетинань. Крім того, необхідно здійснювати обчислення реакції від цих оптимізацій підмереж на мережу перетинань і навпаки.

Для алгоритму Данціга складають таблицю (2.81), яка відповідає плану передачі даних, після певної кількості ітерацій цільова функція стає оптимальною. За допомогою діакоптики така таблиця поділена на кілька таблиць типу (2.81). Згідно [274] сукупність таблиць, складених для всіх підмереж та мережі перетинань, має відповідати одній таблиці, складеній для алгоритму Данціга. Після оптимізації підмереж або мережі перетинань згідно рис. 2.7 проводиться обчислення реакції від проведеної оптимізації на мережу перетинань або підмереж, відповідно. Таке обчислення необхідне для того, щоб зберігати еквівалентність між сукупністю таблиць, складених за допомогою діакоптики і однієї таблиці Данціга при проведенні ітерацій. Отже, певна ітерація в алгоритмі Данціга й ідентична ітерація за допомогою діакоптики приводить до однакового значення F у (2.77). Враховуючи, що алгоритм Данціга є збіжний, а представлене лінійне програмування на основі транспортної задачі методом діакоптики є ідентичною задачею, то і цей метод є збіжний.

Число кроків в процесі досягнення оптимізації в описуваному методі більше, ніж в алгоритмі Данціга, однак перевагою методу діакоптики є [274]:

1. можливість проведення оптимізації великих телекомунікаційних мереж;
2. малі зміни в структурі системи та її параметрів можуть бути враховані без повторення процесу оптимізації з самого початку.

Після проведення кожного циклу оптимізації загальна вартість (ймовірність втрат, затримка) повинна покращуватись. Якщо після проведеного циклу не вдалось отримати екстремальне значення вартості, тоді цикл повторюємо вже на основі результатів попереднього циклу.

Метод діакоптики полегшує дослідження й аналіз мереж великих

розмірів. Крім того, при зміні стану мережі перший цикл оптимізації проводиться лише в мережі перетинань та підмережах, де відбулись зміни. В подальшому існують випадки, коли такі проведені розрахунки можуть задовольняти умові оптимальності. Водночас в алгоритмі Данціга необхідно постійно здійснювати чисельне обчислення всієї мережі.

2.4. Теорія масового обслуговування

В роботі для визначення характеристик досліджуваних РТН використано теорію масового обслуговування.

2.4.1. Одноканальні системи масового обслуговування

Згідно теорії масового обслуговування [129], найпростішим її випадком є система М/М/1 з пуассонівським вхідним потоком заявок, експонентним законом розподілу часу обслуговування й одним сервером. Вона містить буфер, що може зберігати чергу нескінченної довжини, стан якої ототожнюється з числом заявок, що містяться в черзі у кожен момент часу:

$$N_i^q = \frac{\rho}{1 - \rho},$$

де $\rho = \lambda_i / \mu_i = \lambda_i l_i / L_i^B$ – коефіцієнт завантаження, λ – інтенсивність надходження даних на вузол, $\mu = L_i^B / l_i$ – інтенсивність обслуговування даних у вузлі, l_i – середня довжина даних.

Враховуючи (2.63), (2.68) та (2.69), час затримки даних на вузлі, який належить системі М/М/1, становить

$$t_i^B = (N_i^q l_i + h) \frac{1}{L_i^B} = \left(\frac{\rho}{1 - \rho} l_i + h \right) \frac{1}{L_i^B}.$$

де h – навантаження, яке обслуговується.

Оскільки допустимий час затримки $\tau > t_i^B$, тоді:

$$\tau > \frac{l_i}{(1 - \rho)L_i^B}.$$

Отже, пропускна здатність каналу зв'язку повинна вибиратись з умови:

$$L_i^B > 1_i \left(\frac{1}{\tau} + \lambda_i \right). \quad (2.83)$$

M/M/1:N₁ – це система з кінцевим накопичувачем, в якій може перебувати фіксована кількість N₁ даних з середньою довжиною l_i, включаючи дані, що знаходяться на обслуговуванні в сервері. Будь-які дані, що надійшли в час, коли буфер переповнений, одержують відмову та негайно залишають систему. Дані, що поступають, утворюють Пуассонівський потік, а обслуговування здійснюється одним сервером з показниковим законом розподілу часу обробки. Кількість даних у черзі для системи M/M/1:N₁:

$$N_i^q = \frac{\rho(1-\rho)(1+2\rho+3\rho^2+4\rho^3+\dots+N_1\rho^{N_1-1})}{1-\rho^{N_1+1}}.$$

Якщо провести аналогічні розрахунки, як для системи M/M/1, то легко помітити, що і для системи M/M/1:N₁ повинна виконуватись умова (2.83).

При використанні одноканальної системи M/G/1 ймовірність звільнення обслуговуючого пристрою збіжна до стаціонарного типу і при ρ<1 описується в стаціонарному режимі. Такою одноканальною системою добре описувати поведінку мережі в неквазіперевантаженому режимі.

Для типу M/G/1, яка є одноканальною системою з очікуванням і довільним законом тривалості обслуговування в порядку надходження даних, коли вхідні потоки залишаються марківськими, кількість даних у черзі становить

$$N_i^q = \frac{\lambda^2 \overline{\tau_{\text{обс}}^2}}{2(1-\rho)}, \quad (2.84)$$

де $\overline{\tau_{\text{обс}}^2}$ – другий початок моменту часу обслуговування. У випадку, коли тривалість обслуговування всіх заявок є однакою, матимемо систему типу M/D/1 з детермінованим законом тривалості обслуговування, для якого $\overline{\tau_{\text{обс}}^2} = 1/\mu^2$, тоді (2.84) прийме вигляд

$$N_i^q = \frac{\rho^2}{2(1-\rho)}.$$

Розв'язуючи квадратне рівняння $\tau_i > t_i^B$, пропускна здатність каналу зв'язку повинна обиратись з умови:

$$L_i^B > \frac{l_i}{2} \left\{ \frac{1}{\tau} + \lambda_i + \sqrt{\left(\frac{1}{\tau} + \lambda_i \right)^2 + \frac{2\lambda_i}{\tau}} \right\}. \quad (2.85)$$

2.4.2. Багатоканальні системи масового обслуговування

Очевидно, що в порівнянні з одноканальною системою, продуктивність багатоканальної є вища. Для системи M/M/m середнє число даних, що очікують черги на обслуговування:

$$N_i^q = C_p(m, A) \frac{A}{1-A},$$

де m – кількість обслуговуючих каналів; $A = m\rho$ – загальне вхідне навантаження; $C_p(m, A)$ – ймовірність знаходження у системі даних, які є в черзі і визначається згідно С-формули Ерланга:

$$C_p(m, A) = \frac{\left(\frac{A^m}{m!} \right) \left(\frac{1}{1-A/m} \right)}{\left[\sum_{k=0}^{m-1} \frac{A^k}{k!} + \left(\frac{A^m}{m!} \right) \left(\frac{1}{1-A/m} \right) \right]}.$$

Припустивши, що дані знаходяться в черзі, тобто $C_p(m, A) = 1$, тоді пропускна здатність каналу зв'язку повинна вибиратись з умови:

$$L_i^B > l_i \left(\frac{1}{\tau} + m\lambda_i \right). \quad (2.86)$$

Середня кількість даних у системі залежить від ймовірності знаходження k -их даних P_k , у вигляді:

$$N_i^q = \sum_{k=0}^{\infty} k P_k. \quad (2.87)$$

В системі M/M/m:Loss без черги в момент, коли всі m сервери є зайняті, дані, що надійшли, будуть втрачатися. За допомогою В - формули Ерланга визначають ймовірності знаходження j -их даних :

$$P_j = \left[\rho^j \frac{1}{j!} \right] / \left[\sum_{j=0}^m \rho^j \frac{1}{j!} \right].$$

Для системи обслуговування $M/M/m:K_1/M$:

$$P_j = p_0 \prod_{i=1}^{j-1} \frac{\lambda(M_1 - i)}{(i+1)\mu} = C_m^j p_0 \rho^j, \quad 0 \leq k \leq m-1, \quad C_m^j = \frac{m!}{(m-j)!j!},$$

$$P_j = C_M^j p_0 \rho^j \frac{j!}{m!} m^{m-j}, \quad m \leq j \leq K_1$$

Для системи типу $M/M/m:m$, яка має однакове число вхідних ліній і обслуговуючих серверів, блокування є неможливим. Ймовірність того, що j підсистем перебувають у стані «зайнято», визначається через розподіл Бернуллі:

$$P_j = \frac{C_m^j \rho^j}{(1+\rho)^m} = C_m^j p_a^j (1-p_a)^{m-j}, \quad p_a = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{\rho}{1+\rho},$$

де p_a – визначає ймовірність зайнятості сервера, $(1-p_a)$ – ймовірність роботи при холостому ході.

На основі того, що для всіх розглянутих у даному пункті систем, за виключенням $M/M/m$, середню кількість даних можна визначити за допомогою суми ряду (2.87), то пропускна здатність має складний характер, і можна стверджувати, що умова (2.86) повинна виконуватись для всіх розглянутих багатоканальних систем.

Зазначимо, що кожен вузол має різне значення середньої кількості даних у черзі, оскільки вони можуть належати різним системам масового обслуговування.

Прийmemo, що в межах похибки, навантаження гілки наближається до навантаження вузла в максимальному режимі і пропускна здатність гілки наближається до максимальної пропускної здатності вузла.

2.5. Модель дослідження просторової анізотропії параметрів кристалофізики для пристроїв фотонної транспортної мережі

Для дослідження просторової анізотропії різних параметрів, що описуються тензорами вище другого роду можна побудувати вказівні поверхні [276]. Вказівна поверхня – це геометричне місце кінців радіуса-

вектора, довжина якого рівна значенню компоненти у вибраному масштабі в розглядуваному напрямку [277].

В загальному випадку рівняння вказівної поверхні можна представити у вигляді (1.1). Як було зазначено у першому розділі, кристалофізичні параметри у більшості випадків прийнято записувати через нижні індекси. Для $st\dots v$ – компоненти тензора $T_{ef\dots h}$ рівняння вказівної поверхні записують у вигляді [276]

$$T'_{st\dots v} = \alpha_{se}\alpha_{tf}\dots\alpha_{vh}T_{ef\dots h}, \quad (2.88)$$

де $\alpha_{se}, \alpha_{tf}, \dots, \alpha_{vh}$ – напрямні косинуси, які пов'язують головну систему координат $(X_1, X_2, X_3 \dots)$; з новою рухомою системою координат $X'_1 X'_2 X'_3 \dots$. В кристалофізиці розглядають трьохмірну систему координат, тому в (2.88) всі індекси $setf\dots vh$ приймають значення 1, 2 чи 3 і відповідають осям систем координат $X_1X_2X_3$ або $X'_1 X'_2 X'_3$.

При розгляді тензорів, пов'язаних з оптичними явищами, доцільно враховувати особливості поширення світла в кристалах, що дозволяє обмежити кількість вказівних поверхонь [7, 28, 278].

Для побудови вказівних поверхонь, необхідно мати відомості про те, як змінюються напрямні косинуси. Нехай рухома система координат $X'_1 X'_2 X'_3$, пов'язана з напрямком поширення світла: $X'_1 \parallel \mathbf{d}_c$, $X'_2 \parallel \mathbf{j}_1$, $X'_3 \parallel \mathbf{r}$, де $\mathbf{j}_1 \perp \mathbf{r}$ і $\mathbf{j}_1 \perp \mathbf{d}_c$. Тут \mathbf{d}_c є паралельний напрямку поширення світла, а \mathbf{j}_1 та \mathbf{r} паралельні напрямкам поляризації. Для 3D-аналізу важливим і визначальним є \mathbf{r} – радіус-вектор.

Напрямні косинуси для радіус-вектора, які представимо через координати θ та φ сферичної системи координат, мають такий загальновідомий вигляд [28]:

$$\alpha_{r1} = \sin\theta \cos\varphi, \quad \alpha_{r2} = \sin\theta \sin\varphi, \quad \alpha_{r3} = \cos\theta. \quad (2.89)$$

Поширення світла в одновісних кристалах, до яких відноситься ніобіт літію, представлено на рис. 2.8 [28], де \mathbf{j}_1 співпадає з напрямком поляризації звичайної хвилі, а \mathbf{r} – паралельний напрямку поляризації незвичайної хвилі.

Напрямні косинуси для напрямків \mathbf{j}_1 та \mathbf{d}_c (див.рис.2.8) [6]:

$$\alpha_{j1} = -\sin\varphi, \quad \alpha_{j2} = \cos\varphi, \quad \alpha_{j3} = 0; \quad (2.90)$$

$$\alpha_{d1} = \cos\theta \cos\varphi, \quad \alpha_{d2} = \cos\theta \sin\varphi, \quad \alpha_{d3} = -\sin\theta. \quad (2.91)$$

В [9, 28, 30] при побудові вказівних поверхонь для АО параметрів, вибирається рухома система координат. Для того, щоб при дослідженні АО параметрів не враховувати довжини електромагнітної та акустичної хвиль, розглядаються випадки, коли напрямки поширення електромагнітної хвилі є ортогональними напрямку поширенню акустичної хвилі. Згідно [163, 279], таке обмеження дозволяє зменшити кількість побудов вказівних поверхонь.

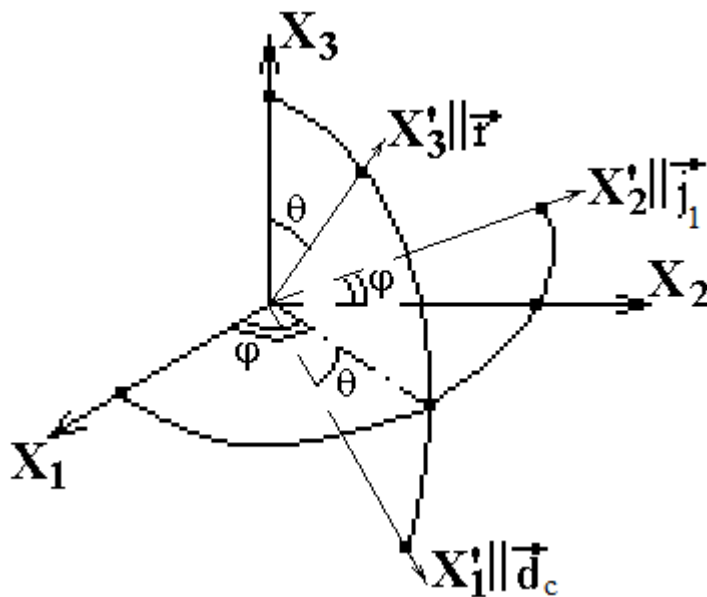


Рис. 2.8. Геометричне розміщення рухомої системи координат $X'_1 X'_2 X'_3$ відносно головної кристалофізичної системи координат $X_1 X_2 X_3$ в одновісних кристалах

В [32, 58] проводиться 3D-аналіз шляхом оптимізації АО параметрів без умови ортогональності між електромагнітною та акустичною хвилею. Цільовою функцією виступає досліджуваний АО параметр, а обмежуючою умовою – закон збереження імпульсу (1.12)-(1.14). В даному випадку необхідно задати довжини електромагнітної та акустичної хвиль. Поверхні будують таким чином, що для заданого напрямку існує певна кількість

значень, коли можна отримати різні досліджувані значення і з них вибирається максимальне.

Висновки до розділу 2

1. Розглянуто основні положення теорії випадкових графів та визначено основні моделі для опису PTN. Здійснено опис основного теоретичного матеріалу для дослідження PTN за допомогою моделей Ердос-Ренеї, Уотса – Стругатса, Барабаші-Альберта та узагальненого випадкового графа.

2. 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 систем координат. Розглянуто незвідні представлення для тензорів. Описано тензорну модель для багатошляхової маршрутизації.

3. Вперше запропоновано використання тензорної моделі диференціальної геометрії для дослідження параметрів телекомунікаційної мережі, що дає змогу проводити аналіз ефективності використання алгоритмів управління інформаційними потоками та визначати оптимальний розподіл трафіку за критеріями мінімізації часових параметрів та показників втрат при передачі даних у PTS. За допомогою коваріантного диференціювання описано можливість врахування зміни стану мережі на основі символу Крістофеля. Приведено диференціальні форми для спрощення розрахунків символу Крістофеля, тензорів Рімана, Річі, скаляр кривизни простору та похідні Лі як альтернативу коваріантним похідним. Зазначено, що відомості про послідовність зміни стану мережі на різних ділянках можуть відрізнятися, тому для зменшення ймовірних втрат та помилок необхідно, щоб компоненти тензора Рімана або дужок Лі дорівнювали нулю.

4. Представлено алгоритм аналізу параметрів телекомунікаційних мереж великих розмірів з багатошляховою маршрутизацією методом діакоптики.

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. Розглянуто переваги та недоліки методу діакоптики.

5. Для кожного типу вузла на основі теорії масового обслуговування представлено оцінку середньої кількості даних у черзі та розглянуто нижню границю пропускну здатності даних вузлів. Приділена увага ймовірності знаходження різної кількості даних для різних систем масового обслуговування.

6. Розглянуто модель дослідження просторової анізотропії параметрів кристалофізики за допомогою їхніх вказівних поверхонь. Представлено направляючі косинуси з урахуванням особливостей поширення світла в одновісних кристалах.

РОЗДІЛ 3. ТЕНЗОРНИЙ АНАЛІЗ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ

3.1. Практична реалізація криволінійної системи координат в телекомунікаційній мережі

Для телекомунікаційної мережі базисні вектори визначаються:

$$\mathbf{e}_i = \mathbf{r}(i)/|\mathbf{r}(i)|, \quad (3.1)$$

де $\mathbf{r}(i)$ – вектор навантаження між вузлами на i -му віртуальному каналі зв'язку, а $|\mathbf{r}(i)|=r^i$ – модуль вектора навантаження, тобто кількість навантаження, яке перебуває в мережі і передається, наприклад, від вузла А до В.

Метричний тензор визначається за допомогою (2.30) і з врахуванням (3.1) отримаємо [34]:

$$g_{ij} = \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_j = \mathbf{r}(i) \cdot \mathbf{r}(j) / |\mathbf{r}(i)| |\mathbf{r}(j)| = \cos \gamma_{df}, \quad (3.2)$$

де γ_{df} – кут між векторами $\mathbf{r}(i)$ та $\mathbf{r}(j)$.

Для векторів \mathbf{a}_{df} та \mathbf{b}_{df} , що представлені на рис. 3.1 а, визначимо компоненту метричного тензора [34] наступним чином:

$$g_{ab} = \cos \gamma_{df} = (a_{df}^2 + b_{df}^2 - c_{df}^2) / 2a_{df} b_{df}. \quad (3.3)$$

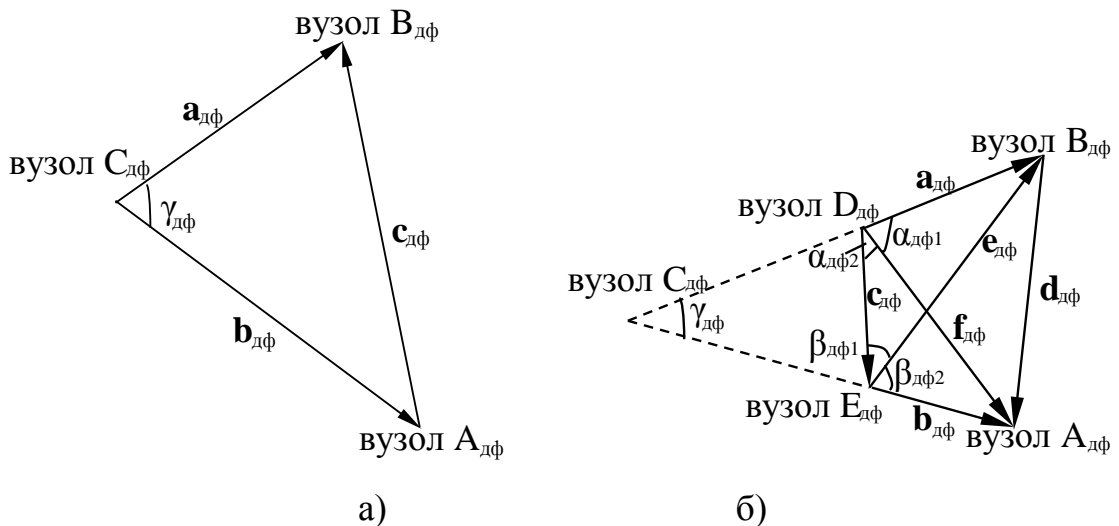


Рис. 3.1. Визначення кута між векторами: а) коли точка (вузол вхідний або вихідний) є спільна; б) коли вектори не мають спільних точок [34]

Вважається, що $|\mathbf{A}_{дф}\mathbf{B}_{дф}| \neq |\mathbf{B}_{дф}\mathbf{A}_{дф}|$, тому в роботі позначимо $\mathbf{A}_{дф}\mathbf{B}_{дф}=\mathbf{c}_{дф}$, а $\mathbf{B}_{дф}\mathbf{A}_{дф}=\mathbf{c}'_{дф}$ і $g_{ab} \neq g_{ba}$, де вектори \mathbf{c} та \mathbf{c}' є протилежно напрямленими відносно один одного, оскільки навантаження з $\mathbf{A}_{дф}$ в $\mathbf{B}_{дф}$ зазвичай відрізняється від навантаження з $\mathbf{B}_{дф}$ в $\mathbf{A}_{дф}$. Прийmemo, що при визначенні g_{ab} згідно (3.3) вибирається вектор $\mathbf{c}_{дф}$, для якого початком вектора є спільна точка з вектором $\mathbf{a}_{дф}$, а кінцем – спільна точка з вектором $\mathbf{b}_{дф}$.

Складним випадком є визначення метричного тензора, коли вектори $\mathbf{a}_{дф}$ та $\mathbf{b}_{дф}$ не мають спільних точок (рис. 3.1б). Зауважимо, що тут розглядається навантаження між різними вузлами на віртуальному рівні, але на фізичному рівні дані вектори можуть мати транзитні спільні вузли.

На віртуальному рівні кут $\gamma_{дф}=180^\circ - \angle C_{дф}D_{дф}E_{дф} - \angle C_{дф}E_{дф}D_{дф}$, але враховуючи, що $\angle C_{дф}D_{дф}E_{дф}=180^\circ - \alpha_{дф}$ і $\angle C_{дф}E_{дф}D_{дф}=180^\circ - \beta_{дф}$, тоді $\gamma_{дф}=\alpha_{дф}+\beta_{дф}-180^\circ$, де $\alpha_{дф}=\angle E_{дф}B_{дф}D_{дф}$, $\beta_{дф}=\angle A_{дф}E_{дф}D_{дф}$. Тоді [34]:

$$g_{ab}=\cos \gamma_{дф}=\cos(\alpha_{дф}+\beta_{дф}-180^\circ)=-\cos(\alpha_{дф}+\beta_{дф})=-\cos\alpha_{дф} \cos\beta_{дф}+\sin\alpha_{дф} \sin\beta_{дф}=-\cos\alpha_{дф} \cos\beta_{дф}+\sqrt{1-\cos^2 \alpha_{дф}} \sqrt{1-\cos^2 \beta_{дф}}=g_{ac} g_{cb}-\sqrt{1-g_{ac}^2} \sqrt{1-g_{cb}^2}. \quad (3.4)$$

У вищезгаданому співвідношенні використовувався тільки вектор $\mathbf{c}_{дф}$, оскільки вектор $\mathbf{d}_{дф}$ не враховувався при розрахунку кутів $\angle BDE=\alpha_{дф}$ і $\angle DEA=\beta_{дф}$ згідно рис. 3.1,б. У зв'язку з цим виникає необхідність ввести додаткові умови для двох випадків, коли використовують: 1) тільки вектор $\mathbf{c}_{дф}$; 2) вектори $\mathbf{c}_{дф}$ і $\mathbf{d}_{дф}$. Для другого випадку, щоб визначити g_{ab} , згідно рис. 3.1,б, пропонується визначити $\cos\alpha$ та $\cos\beta$. З рис. 3.1,б випливає, що $\alpha_{дф}=\alpha_{дф1}+\alpha_{дф2}$ та $\beta_{дф}=\beta_{дф1}+\beta_{дф2}$, тоді по аналогії з (3.4) маємо [34]:

$$g_{ac} = g_{af} g_{fc} - \sqrt{1-g_{af}^2} \sqrt{1-g_{fc}^2},$$

$$g_{cb} = g_{cf} g_{fb} - \sqrt{1-g_{cf}^2} \sqrt{1-g_{fb}^2}. \quad (3.5)$$

Отримані значення підставляємо у (3.4) і отримуємо g_{ab} для рис.3.1б.

Загалом метричний тензор не є симетричний, тому може бути розкладений на симетричну $g_{(ab)}$ і антисиметричну $g_{[ab]}$ компоненти, аналогічно (2.41):

$$g_{ab} = g_{(ab)} + g_{[ab]}. \quad (3.6)$$

В даному прикладі розглядається лінійний простір з несиметричною метрикою, який називається лінійним простором з несиметричною сферою (несиметричний простір).

Наведені в п.2.2.3 формули представлені, коли метричний тензор є симетричний. Наприклад, символ Крістофеля $\Gamma_{k,ij}$ є несиметричний по парі індексів i та j , розкладається на симетричний $\Gamma_{k,(ij)}$ та антисиметричний $\Gamma_{k,[ij]}$ (тензор кручення Γ_{mk}^p) по даній парі, які визначаються з врахуванням (2.49):

$$\begin{aligned}\Gamma_{k,ij} &= \Gamma_{k,(ij)} + \Gamma_{k,[ij]} = 0,5(\partial_i g_{jk} + \partial_j g_{ki} - \partial_k g_{ji}); \\ \Gamma_{k,(ij)} &= 0,5(\partial_i (g_{jk}) + \partial_j g_{(ki)} - \partial_k g_{(ij)}); \\ \Gamma_{k,[ij]} &= \Gamma_{k,[ij]} = 0,5(\partial_i g_{[jk]} + \partial_j g_{[ki]} - \partial_k g_{[ji]}).\end{aligned}\quad (3.7)$$

Розглянемо для прикладу елементарну мережу, складену з трьох вузлів (рис. 3.1а). Для спрощення на згаданому рисунку не зображено штриховані вектори ($\mathbf{a}'_{дф}$, $\mathbf{b}'_{дф}$ та $\mathbf{c}'_{дф}$), які відповідають протилежному напрямку між вузлами відносно нештрихованих векторів ($\mathbf{a}_{дф}$, $\mathbf{b}_{дф}$ та $\mathbf{c}_{дф}$), та представлено лише один випадок розподілу навантаження при визначенні компонент метричного тензора g_{ij} . Відповідно для даного прикладу елементарної мережі маємо шість векторів навантаження $\mathbf{a}_{дф}$, $\mathbf{b}_{дф}$, $\mathbf{c}_{дф}$, $\mathbf{a}'_{дф}$, $\mathbf{b}'_{дф}$ та $\mathbf{c}'_{дф}$ і шість базисних векторів \mathbf{e}_a , \mathbf{e}_b , \mathbf{e}_c , \mathbf{e}_a' , \mathbf{e}_b' та \mathbf{e}_c' , які визначаються за допомогою (3.1).

Стан мережі визначається [34]:

$$\begin{aligned}\mathbf{r} &= \mathbf{r}(\mathbf{a}_{дф}) + \mathbf{r}(\mathbf{b}_{дф}) + \mathbf{r}(\mathbf{c}_{дф}) + \mathbf{r}(\mathbf{a}'_{дф}) + \mathbf{r}(\mathbf{b}'_{дф}) + \mathbf{r}(\mathbf{c}'_{дф}) = \\ &= |\mathbf{a}_{дф}| \mathbf{e}_a + |\mathbf{b}_{дф}| \mathbf{e}_b + |\mathbf{c}_{дф}| \mathbf{e}_c + |\mathbf{a}'_{дф}| \mathbf{e}_a' + |\mathbf{b}'_{дф}| \mathbf{e}_b' + |\mathbf{c}'_{дф}| \mathbf{e}_c'.\end{aligned}\quad (3.8)$$

де, порівнюючи з (2.28), маємо $r^i = |\mathbf{r}(\mathbf{i})| = |\mathbf{i}| = i$. Зауважимо, що базисні вектори не співпадають з векторами, представленими на рис.3.1а.

Метричний тензор для мережі (рис. 3.1а) можна представити у матричному вигляді 6×6 , тобто

$$g_{ii} = 1; \quad g_{i\bar{i}} = -1; \quad g_{ij} = (\mathbf{i}^2 + \mathbf{j}^2 - \mathbf{k}^2) / 2ij, \quad (3.9)$$

де індекс \bar{i} відповідає вектору направленому протилежно до вектора \mathbf{i} , а величина k відповідає навантаженню вектора, який, згідно рис. 3.1а, розташований між векторами \mathbf{i} та \mathbf{j} . У всіх розглянутих трикутниках виконується умова $i + j \geq k$.

Враховуючи (2.57) та (3.8), для форм зв'язності ω_{ij} маємо [34]

$$\omega_{ij}=0,5(\partial_k g_{ij} + \partial_j g_{ki} - \partial_i g_{kj}) \mathbf{dr}^k = \Gamma_{i,jk} \mathbf{dr}^k. \quad (3.10)$$

У нашому випадку всі діагональні компоненти $\omega_{ii}=0$, отже, символи Крістофеля з однаковими першими двома індексами рині нулю $\Gamma_{i,ii}=0$, також $\omega_{ii}=0$, тоді $\Gamma_{i,iu}=0$, де індекс u відповідає будь-якому вектору. Для інших випадків :

$$\omega_{ij}=(i^2-j^2+k^2)/2i^2j \mathbf{di}+(-i^2+j^2+k^2)/2ij^2 \mathbf{dj}-k/2ij \mathbf{dk},$$

і, враховуючи (2.55), отримуємо:

$$\Gamma_{i,ji}=(i^2-j^2+k^2)/2i^2j,$$

$$\Gamma_{i,jj}^i=(-i^2+j^2+k^2)/2ij^2,$$

$$\Gamma_{i,jk}=-k/2ij,$$

$$\Gamma_{i,ij}=0, \quad \Gamma_{i,jk}=0, \quad \Gamma_{i,ji}=0.$$

Далі для визначення символів Крістофеля другого роду використовується метричний контраваріантний тензор $\Gamma^i_{jk}=g^{ip}\Gamma_{p,jk}$, який визначається як:

$$g^{ij}=\frac{1}{g} \frac{\partial g}{\partial g_{ij}},$$

де $g=\det|g_{ij}|$ – визначник метричного коваріантного тензора. За допомогою (2.55)-(2.57) визначається тензор Рімана.

Користуючись (2.30), можна визначити коваріантну компоненту, яка для вектора \mathbf{a} виглядає наступним чином:

$$r_a=6a_{дф}^2-a_{дф}^2+(-b_{дф}^2+b_{дф}^2+c_{дф}^2-c_{дф}^2)/2a_{дф}.$$

Далі, використовуючи (3.3), отримуємо:

$$g^{ij}=\frac{((r^i)^2+(r^j)^2-(r^k)^2)}{2r^i r^j}.$$

Оскільки метричний тензор не є симетричний, то в (2.59) для дужок Лі необхідно врахувати додатковий доданок із символів Крістофеля, що представлено у такому вигляді:

$$(L_v \mathbf{U})^i=(V^j \partial_j U^i - U^j \partial_j V^i)+ (V^j U^k \Gamma^i_{kj} - U^j V^k \Gamma^i_{jk})=(\mathbf{V}, \mathbf{U})^i.$$

Так похідна Лі вздовж векторного поля $\mathbf{a}_{дф}$ від векторного поля $\mathbf{b}_{дф}$ визначається [34]:

$$L_a \mathbf{b}_{дф}=(\mathbf{b}_{дф}-\mathbf{a}_{дф})+ a_{дф} \mathbf{b}_{дф} (\Gamma^i_{ab} - \Gamma^i_{ba}) \mathbf{e}_i=(\mathbf{b}_{дф}-\mathbf{a}_{дф})+ 2a_{дф} \mathbf{b}_{дф} \Gamma^i_{[ab]} \mathbf{e}_i, \quad (3.11)$$

Похідні $\partial_j U^i$ та $\partial_j V^i$ в (3.11) представлені у вигляді $\partial \mathbf{b}_{\text{дф}} / \partial \mathbf{a}_{\text{дф}}$ та $\partial \mathbf{a}_{\text{дф}} / \partial \mathbf{b}_{\text{дф}}$, що визначались за допомогою допоміжної функції, наприклад, антисиметричного метричного тензора $g_{[ab]}$ і з врахуванням властивостей похідної оберненої функції [34]:

$$\frac{\partial \mathbf{b}_{\text{дф}}}{\partial \mathbf{a}_{\text{дф}}} = \frac{\partial \mathbf{b}_{\text{дф}}}{\partial g_{[ab]}} \frac{\partial g_{[ab]}}{\partial \mathbf{a}_{\text{дф}}} = \frac{\mathbf{b}_{\text{дф}}}{\mathbf{a}_{\text{дф}}}.$$

Враховуючи зміст (2.60) і порівнюючи з (3.11), зауважимо, що зміна стану мережі внаслідок кореляції послідовностей між векторами $\mathbf{a}_{\text{дф}}$ та $\mathbf{b}_{\text{дф}}$ визначається різницею цих векторів і антисиметричним символом Крістофеля другого роду по нижній парі індексів $\Gamma_{[ab]}^i$.

3.2. Удосконалена тензорна модель багатошляхової маршрутизації для фотонної транспортної мережі

Розроблений тензорний аналіз для дослідження багатошляхової маршрутизації представлений в п. 2.4.5 має недолік. У PTN мережах існує двохсторонній зв'язок між вузлами, який не враховується в існуючих тензорних моделях.

За способом організації двохстороннього зв'язку PTN поділяються на [280, 281]:

а) двохволоконну односмугову однокабельну, при якій передача і прийом оптичних сигналів ведуться по двох ООВ і здійснюються на одній довжині хвилі. Кожне ООВ є еквівалентом двопровідної фізичної ланки і, оскільки взаємні впливи між ООВ кабелю малі, то тракти передачі і прийому різних систем організуються по одному кабелю, тобто такі PTN є однокабельними односмуговими. Перевагою такої PTN є використання однотипного устаткування трактів передачі і прийому кінцевих і проміжних станцій, а недоліком – вельми низький коефіцієнт використання пропускної здатності ООВ;

б) одноволокна односмугова однокабельна, особливістю якої є використання одного волокна для передачі сигналів в двох напрямках на одній

і тій же довжині хвилі;

в) одноволокона двосмугова однокабельна, при якій передача в одному напрямі ведеться на довжині хвилі оптичного випромінювання $\tilde{\lambda}_1$, а в іншому – $\tilde{\lambda}_2$. Розділення напрямів передачі здійснюється за допомогою направляючих оптичних фільтрів, налаштованих на відповідні довжини хвиль оптичного випромінювання.

В OTN між двома транзитними вузлами при передачі даних зв'язок може здійснюватися одночасно в різні напрямки. Отже, необхідно враховувати, що можливою є передача даних від одного транзитного вузла до іншого транзитного вузла і одночасна паралельна передача у зворотному напрямку, яку необхідно проаналізувати. В [22] досліджувалась телекомунікаційна мережа між вузлом-джерелом та вузлом-адресатом (рис. 3.2(а)).

На рис. 3.2(б) зображено топологічну модель для переходу від системи координат гілок (Г1-Г7) мережі до системи координат незалежних контурів К1, К2, К3 і пар вузлів ПВ1 – ПВ5.

Згідно тензорної моделі багатошляхової маршрутизації, затримка часу на транзитних вузлах не враховується (2.75). Для врахування часової затримки на транзитних вузлах додаються гілки Г3 та Г5 (Рис. 3.2(б)). Крім того, зв'язок між транзитними вузлами, замість однієї гілки згідно рис. 3.2(а), маємо дві Г4 та Г8 (Рис. 3.2(б)). Гілки Г4 та Г8 з'єднують вихід одного транзитного вузла у вхід іншого.

Враховуючи рис. 3.2, отримано матриці переходу C_{Π} та A_{Π} (2.72)-(2.74) від системи координат гілок мережі до системи координат незалежних контурів і пар вузлів у вигляді [25]:

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

де A_{Π} , C_{Π} відповідають коваріантному і контрваріантному перетворенням, відповідно.

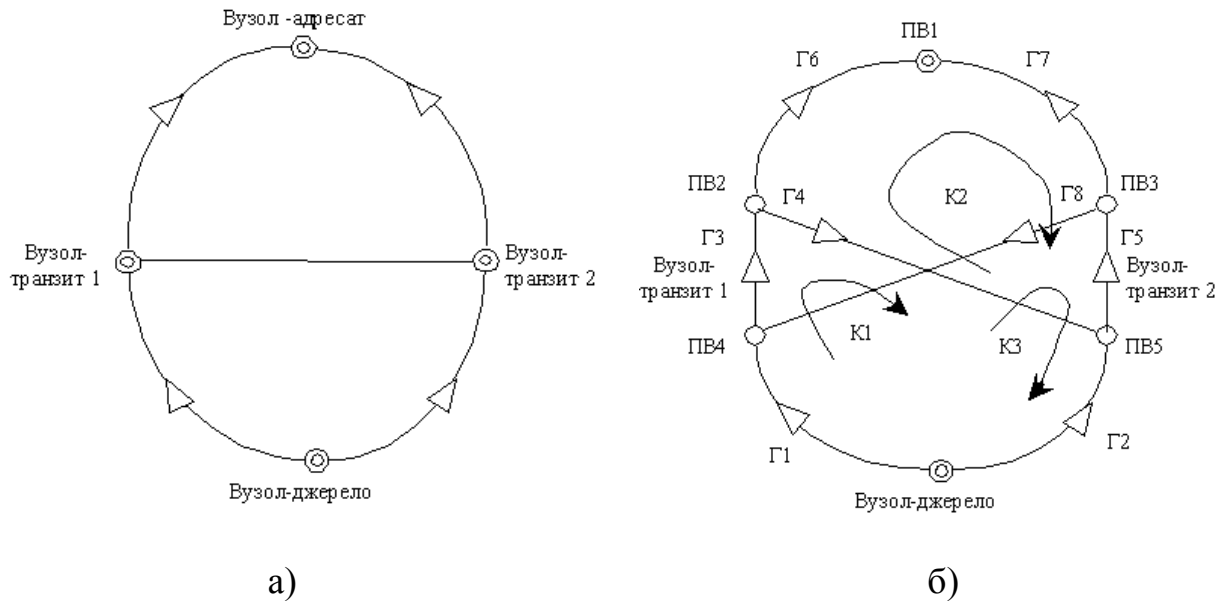


Рис. 3.2. Схема телекомунікаційної мережі: а) між вузлом-джерелом та вузлом-адресатом; б) вибір координатних шляхів [25]

За умови, що навантаження між транзитними вузлами, в нашому випадку, на гілках Г4 та Г8 є від'ємними, відповідну гілку не потрібно враховувати. Тобто можливі випадки, коли необхідно знехтувати Г4, Г8 або Г4 і Г8 одночасно. Отже, не завжди доцільно враховувати зв'язок, який існує між транзитними вузлами, причому можливі випадки, коли зв'язком Г4 і Г8 краще знехтувати (рис. 3.2б).

Представлена тензорна модель є складнішою, оскільки необхідно враховувати умову доцільності зв'язку між транзитними вузлами. Проведене дослідження показує, що врахування двохстороннього зв'язку між транзитними вузлами дозволяє зменшити час затримок передачі даних в більшості випадків на 10-30% [25].

3.3. Дослідження фотонної транспортної мережі методом діакоптики

3.3.1. Фотонна транспортна мережа з перерозподілом навантаження

Розглянемо PTN [16, 18, 19], у вигляді рис. 3.3. Користуючись методом

діакоптики згідно алгоритму, представленому в п. 2.3.1, приведемо приклад дослідження PTN.

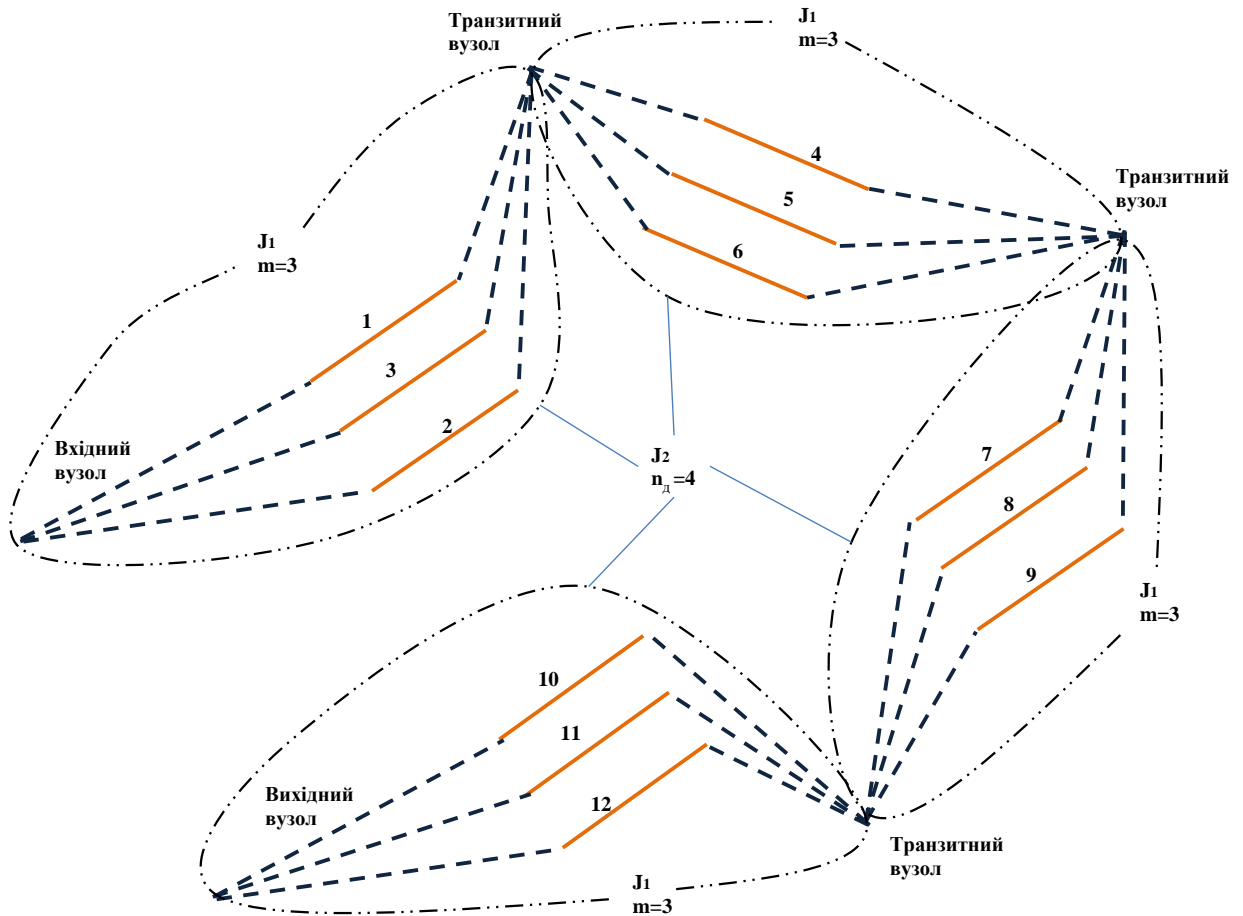


Рис. 3.3. Приклад топології PTN

Нехай вихідні дані такі:

- пропускна здатність кожного каналу між вузлами множини J_1 – 155 Мбіт/с;
- проміжних транзитних вузлів три, однакових підсистем $n_d=4$ множини J_2 , де кожна підсистема складена із сукупності волокон 1-2-3, 4-5-6, 7-8-9 та 10-11-12, що показано на рис. 3.3.

Навантаження, яке поступає для проходження по різним шляхам, у більшості випадків є різним. Для ефективного використання PTN із зменшенням середнього часу передачі даних доцільно здійснювати у вузлах перерозподіл даних таким чином, щоб навантаження між вузлами по волокнах було однаковим. Так на вхідному вузлі (рис. 3.3) пропонується

здійснювати перерозподіл навантаження H_1 , H_2 та H_3 (рис. 3.4), щоб по каналах 1-2-3 поширювалися однакові навантаження.

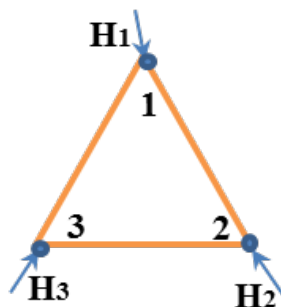


Рис.3.4. Схематичне зображення перерозподілу навантаження у вузлах

Проведемо розрахунок між вхідним вузлом та першим транзитним вузлом. Розглянемо лише одну підсистему з рис.3.3, де вважатимемо, що враховано перерозподіл навантаження на вузлах (рис.3.4), що в підсумку представлено на рис.3.5.

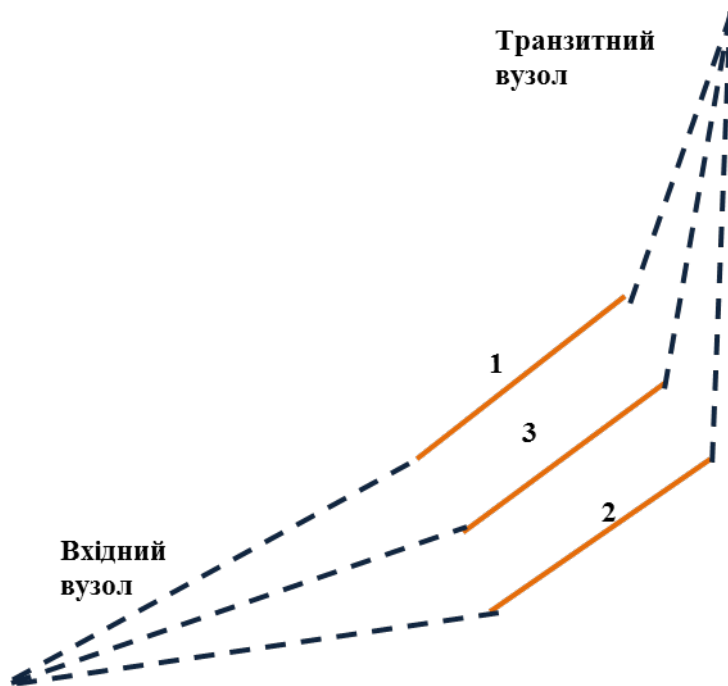


Рис. 3.5. Досліджувана топологічна модель

Етап перший. Розчленування моделі.

Модель розділяється на дві ізольовані частини, як показано на рис. 3.6. В одній підсистемі є вхідний вузол з перерозподілом навантаження (рис.3.4).

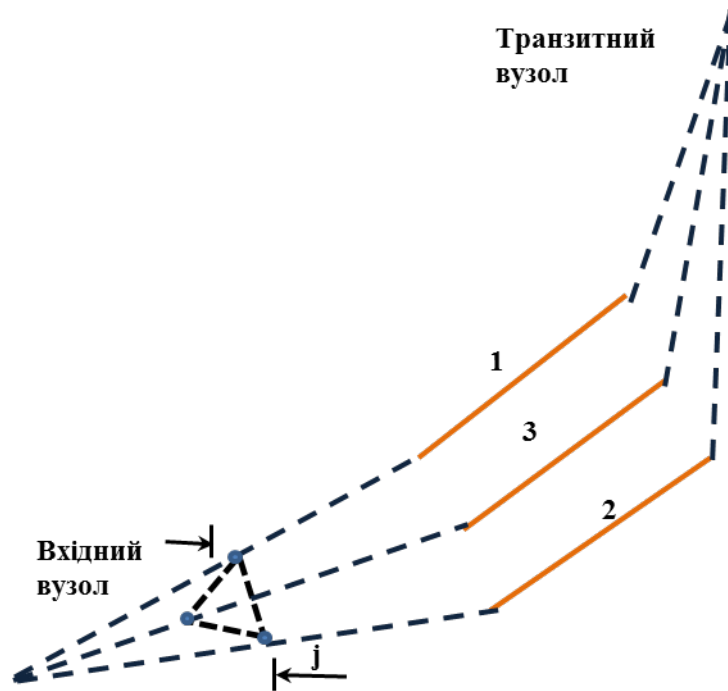


Рис. 3.6. Поділ на дві підсистеми

Другий етап. Видалення розділених зв'язків.

З досліджуваної системи видаляються усі міжз'єднання вузлів на рис.3.4 і представляємо їх на рис. 3.7.

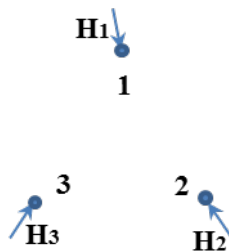


Рис. 3.7. Розділення на ізольовані підсистеми

Третій етап – отримання і розв'язання рівняння (2.62) для кожної підсистеми.

Рівняння (2.61) для підсистеми складеної з волокон 1-2-3 множини \mathbf{J}_1 (рис. 3.6) має вигляд:

$$\begin{array}{l}
 1 \\
 2 \\
 3
 \end{array}
 \left| \begin{array}{l}
 H_1 \\
 H_2 \\
 H_3
 \end{array} \right. = \begin{array}{l}
 1 \\
 2 \\
 3
 \end{array}
 \left| \begin{array}{ccc}
 310 & 0 & 0 \\
 0 & 310 & 0 \\
 0 & 0 & 310
 \end{array} \right. \times \begin{array}{l}
 1 \\
 2 \\
 3
 \end{array} \left| \begin{array}{l}
 T_1 \\
 T_2 \\
 T_3
 \end{array} \right. . \quad (3.12)$$

де H_1, H_2, H_3 – навантаження, яке має бути передане між вхідним вузлом і транзитним вузлом через волокна 1-2-3; T_1, T_2, T_3 – час затримки передачі даних по заданим волокнам.

Для наочності в (3.12) представлено нумерацію стовпців та рядків, які відповідають волокнам згідно рис.3.6. В подальшому в даному пункті для наочності аналогічна нумерація буде представлена згідно розглянутих рисунків.

Враховуючи $F_d^1 = L^{-1}$, (3.12) можна переписати у вигляді:

$$\begin{array}{c|ccc|c} & 1 & 2 & 3 & \\ \hline 1 & T_1 & & & H_1 \\ 2 & T_2 & & & H_2 \\ 3 & T_3 & & & H_3 \end{array} = 10^{-6} \begin{array}{c|ccc|c} & 1 & 2 & 3 & \\ \hline 1 & 3226 & 0 & 0 & \times 1 \\ 2 & 0 & 3226 & 0 & \times 2 \\ 3 & 0 & 0 & 3226 & \times 3 \end{array} \quad (3.13)$$

Четвертий етап – отримання і розв’язання рівнянь системи, що називається колом перетинів.

Система розділяється на n_d підсистем J_1 (в нашому випадку, згідно з рис.3.7 $n_d = 3$).

Для $(n_d + 1)$ -а системи перетинів (на рис. 3.6 представлена структурою J_2), виділяються чотири стадії побудови:

I стадія. Для системи вузлів 1-2-3 матриця має вигляд:

$$F_d^1 = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 3226 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 3226 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 3226 \end{array} \cdot 10^{-6}. \quad (3.14)$$

Матриця F_d^1 , що відповідає системі 4-5-6, 7-8-9 та 10-11-12, аналогічна, оскільки структури J_1 однакові.

Перехід від матриці F_d^1 в (2.62) до $F_d^{1'}$ може бути здійснений за допомогою матриці перетворення $C_{п1}$:

$$C_{п1} = \begin{array}{c|ccc} & 1 & 2 & 3 \\ \hline 1 & 1 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 1 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 1 \end{array} \quad (3.15)$$

З (3.15) отримаємо:

$$F_d^{1'} = C_{п1t} F_d^1 C_{п1}. \quad (3.16)$$

В даному випадку $C_{п1}$ є одиничною матрицею і визначення згідно (3.16) можна не проводити в даному випадку.

II стадія. Відновлення зв'язків за допомогою матриці $C_{п2}$. Вона дозволяє відновити зв'язки в тому вигляді, в якому вони були після розподілу, але до їх видалення (рис. 3.8)

$$C_{п2} = \begin{array}{c|cccccc} & 1^{(2)} & 1^{(3)} & 2^{(1)} & 2^{(3)} & 3^{(1)} & 3^{(2)} \\ \hline 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{array} . \quad (3.17)$$

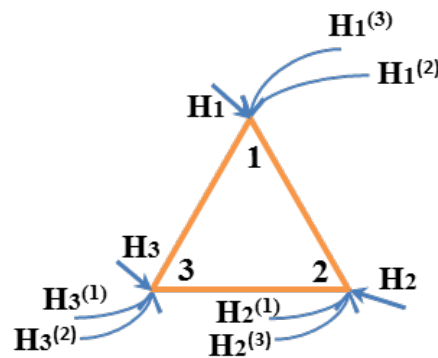


Рис. 3.8. Приєднання зв'язків

III стадія. Об'єднання підсистем виконується за допомогою матриці $C_{п3}$.

$$C_{п3} = \begin{array}{c|cccc} & 1^{(2)}2^{(1)} & 1^{(3)}3^{(1)} & 2^{(3)}3^{(2)} & \\ \hline 1^{(2)} & 1 & 0 & 0 & \\ 1^{(3)} & 0 & 1 & 0 & \\ 2^{(1)} & -1 & 0 & 0 & \\ 2^{(3)} & 0 & 0 & 1 & \\ 3^{(1)} & 0 & -1 & 0 & \\ 3^{(2)} & 0 & 0 & -1 & \end{array} . \quad (3.18)$$

Маючи три матриці перетворення, можемо за допомогою них отримати матрицю з'єднаної системи f_d з "опорної" матриці кола перетинів F_d^{-1} .

У першому способі використовували тільки дві перетворюючі матриці:

$$C_{п23} = C_{п2}C_{п3} . \quad (3.19)$$

Матрицю f_d' , яка описує опорне коло перетинів знаходимо за допомогою матриці F_d^{-1} , із співвідношення:

$$f_d' = (C_{п23})_t F_d^{-1} C_{п23} . \quad (3.20)$$

Здійснюючи перетворення, отримаємо:

$$f_d' = \begin{array}{c|ccc} & 1^{(2)}2^{(1)} & 1^{(3)}3^{(1)} & 2^{(3)}3^{(2)} \\ \hline 1^{(2)}2^{(1)} & 6452 & 3226 & -3226 \\ 1^{(3)}3^{(1)} & 3226 & 6452 & 3226 \\ 2^{(3)}3^{(2)} & -3226 & 3226 & 6452 \end{array} \times 10^{-6}. \quad (3.21)$$

Другий спосіб знаходження матриці виконується за допомогою добутку трьох матриць:

$$C_{\Pi} = C_{\Pi 1} C_{\Pi 2} C_{\Pi 3}, \quad (3.22)$$

Матриця C_{Π} має нульові елементи в тих рядках, які відповідають змінним, що не відносяться до зв'язків. Проте ці елементи повинні включатися в матрицю, щоб її розміри відповідали розмірам матриці F_d^1 . На F_d^1 повинна множитися матриця C_{Π} , в якій є відповідні елементи.

Таким чином, матриця f_d' для “опорного” кола перетинів може бути визначена за формулою:

$$f_d' = C_{\Pi} F_d^1 C_{\Pi}. \quad (3.23)$$

IV стадія.

Відновлення розділених гілок. Необхідно використовувати розділені гілки і їх діагональну матрицю пропускних здатностей. Необхідне об'єднання “опорного” кола перетинів і розділених гілок. Матрицю l_d^{-1} необхідно додати до матриці f_d' , тоді отримаємо для матриці обернених пропускних здатностей F_d повного кола перетинів наступний вираз:

$$F_d = f_d' + l_d^{-1} = C_{\Pi} F_d^1 C_{\Pi} + l_d^{-1}. \quad (3.24)$$

Представлене співвідношення справедливе, коли певними каналами здійснюється перерозподіл навантаження в мережі. Тут перерозподіл навантаження відбувається у вхідному вузлі, тому приймається $l_d^{-1}=0$, а, отже:

$$F_d = f_d'. \quad (3.25)$$

Перетворення матриці F_d . Матриця F_d має кількість рядків і стовпців, рівну кількості розімкнених контурів, тоді зворотну матрицю F_d для підсистем можна обчислити як:

$$L' = F_d^{-1}. \quad (3.26)$$

Але оскільки

$$\det |f_d'|=0, \quad (3.27)$$

то, враховуючи (3.25), очевидно, що визначити L' неможливо.

П'ятий етап. Алгоритм розрахунку матриці значень часових затримок.

Для виконання даного алгоритму маємо наступні вихідні данні:

1. У вихідній системі задані наступні навантаження [Мбіт]:

$$H = \begin{array}{c|c} 1 & 140 \\ 2 & 120 \\ 3 & 100 \end{array}. \quad (3.28)$$

Коли навантаження у вузлах кожної підсистеми є однаковими, тоді спостерігається баланс потоків і перерозподілу навантаження не буде.

2. Необхідно знайти вектор T значень часових затримок у вузлах вихідної системи.

Відповідно до алгоритму [5, 16, 274] розглянемо основні кроки для знаходження часових затримок для заданої кільцевої топології :

1. $T_1 = F_d' H$ – час затримки передачі даних, коли перерозподіли навантаження H не здійснювалися [с] (рис.3.5)

$$T_1 = \begin{array}{c|c} 1 & 0.452 \\ 2 & 0.387 \\ 3 & 0.323 \end{array}.$$

2. $t = -C_{\pi} T_1$. визначає різницю часових затримок між різними каналами [с],

$$t = \begin{array}{c|c} 1^{(2)}2^{(1)} & -0.065 \\ 1^{(3)}3^{(1)} & -0.129 \\ 2^{(3)}3^{(2)} & -0.065 \end{array}.$$

3. $h = L' t$ – навантаження показує як буде здійснюватися перерозподіл навантаження по каналам.

4. $H^t = C_{\pi} h$. – навантаження, яке показує наскільки змінюється навантаження у каналах. Враховуючи, що в розглянутому випадку L' не визначалися, то $H^t = C_{\pi} h^*$, де в h^* кожна компонента обернена до параметра,

визначеного за формулою $F_d^{I't^*}$, де в t^* - кожна компонента обернена до t . Таким чином, отримується [Мбіт]:

$$H^t = \begin{array}{c|c} 1 & -20 \\ 2 & 0 \\ 3 & 20 \end{array}.$$

5. $T_2 = F_d^I H^t$ – час, що показує, на яких каналах покращується і погіршується передача даних при перерозподілі навантаження [с]:

$$T_2 = \begin{array}{c|c} 1 & -0.065 \\ 2 & 0 \\ 3 & 0.065 \end{array}.$$

6. $T = T_1 + T_2$ – час передачі даних при перерозподілі навантаження між вхідним і транзитним вузлами рис.3.5 [с]:

$$T = \begin{array}{c|c} 1 & 0.387 \\ 2 & 0.387 \\ 3 & 0.387 \end{array}.$$

Аналогічний час передачі буде і у всіх інших підсистемах множини J_2 : 4-5-6, 7-8-9 та 10-11-12, відповідно час T буде однаковий для всіх J_1 і становитиме 0,387 с згідно розглянутого прикладу, а весь час від вхідного вузла до вихідного вузла – $4 T = 1.548$ с.

3.3.2. Алгоритм дослідження багат шарової структури транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM

Технологія IP/MPLS у поєднанні з DWDM дозволяє об'єднати всі переваги використання технологій DWDM та MPLS в одній мережі [4, 282]. Тому за основу досліджень багат шарової структури транспортної мережі була обрана технологія IP/MPLS/DWDM (рис. 3.9). Кожен із шарів відповідає технології, яка в ньому використовується. Між шарами існують логічні, фізичні та функціональні зв'язки.

Однак залишаються проблеми впровадження та розвитку багат шарової транспортної мережі із застосуванням нових алгоритмів досліджень з врахуванням сумісності різних телекомунікаційних технологій. Для

зниження складності математичних моделей пропонується використовувати метод діакоптики [39, 274].

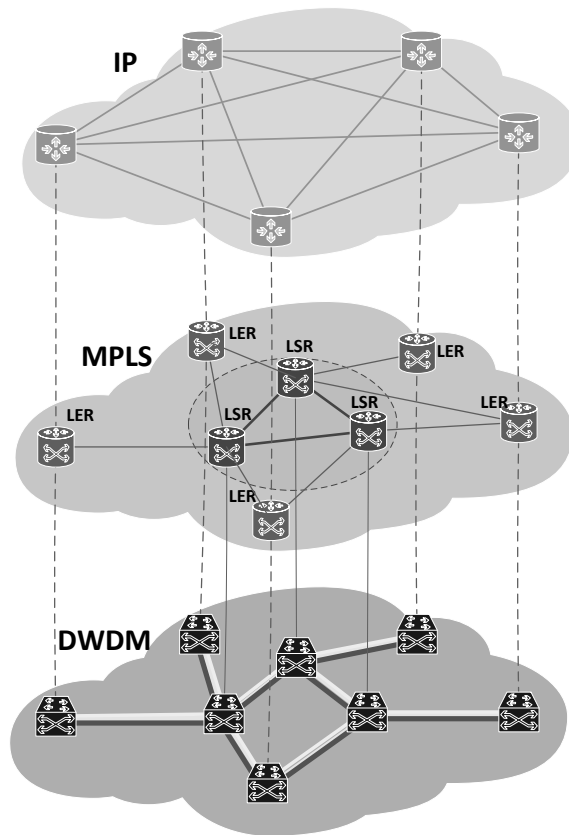


Рис. 3.9. Структурна схема транспортної мережі IP/MPLS/DWD

Багатошарові телекомунікаційні структури можуть включати різні за своїм призначенням вузли.

У транспортній мережі IP потік навантаження представлений у вигляді пакетів різного розміру. Для спрощення топологічної моделі транспортної мережі IP представимо її у вигляді графа (рис.3.10).

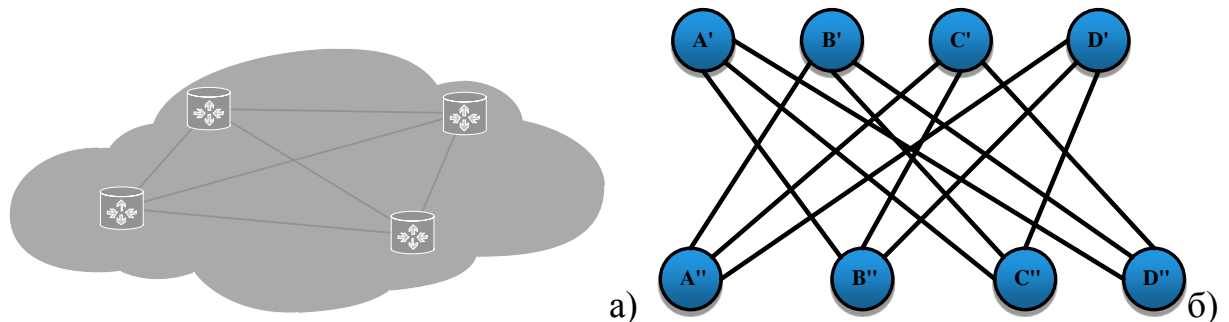


Рис 3.10. Схема транспортної мережі IP[39]:

а) у загальному вигляді; б) у вигляді графа

Пропонуємо кожен вузол на рівні IP умовно розглядати як дві незалежні частини одного вузла (окремий вхідний та вихідний пристрій). Для уникнення петель очевидним є те, що дані вузли не повинні бути з'єднані.

Дослідження на рівні IP проводиться за критерієм параметрів якості обслуговування, а саме: часу затримки та ймовірності втрат.

Транспортна мережа IP побудована з використанням топології «кожен з кожним», тоді як для мереж MPLS та DWDM необхідно враховувати транзитні вузли.

Транспортна мережа MPLS була розглянута в п. 1.3.2. та представлена на рис.1.9, її пропонується розділити на три підмережі (рис.3.11).

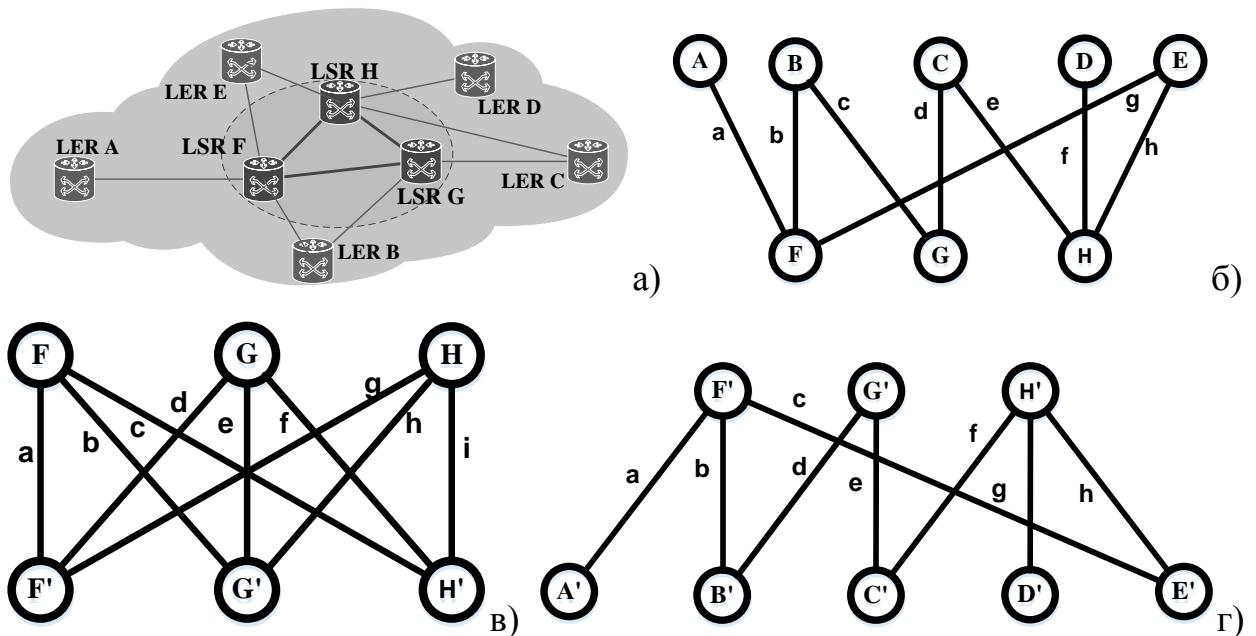


Рис. 3.11. Схема транспортних мереж з врахуванням транзитних вузлів [39]:

а) для загального випадку; у вигляді графа з умовним поділом б) підмережа

Ingress LSR - Intermediate LSR; б) ядро MPLS (Intermediate LSR);

в) підмережа Intermediate LSR - Egress LSR

Для рівня MPLS необхідно розглядати передачу даних спочатку в підмережі Ingress LSR – Intermediate LSR (рис.3.11 б), потім в підмережі, яка представляє ядро MPLS (Intermediate LSR) (рис.3.11 в)) і вкінці – підмережу Intermediate LSR - Egress LSR (рис.3.11 г) [27].

Для DWDM рівня пропонуємо аналогічним чином, як і для MPLS, розділити мережу на три підмережі (рис.3.11). Тут необхідно розглядати спочатку підмережу складену із зв'язків між вхідними і транзитними вузлами (рис.3.11б), потім підмережу, яка представляє взаємозв'язок між транзитними вузлами (рис.3.11в), і вкінці підмережу складену із зв'язків між транзитними і вихідними вузлами (рис.3.11г).

Після проведення досліджень кожної з підмереж рис. (3.11б-г) відновлюємо зв'язок між ними та усуваємо неузгодженості, якщо вони присутні.

Сучасні мультисервісні телекомунікаційні мережі є багат шаровими та вимагають в процесі створення або модернізації визначення їх структури одночасно на декількох рівнях, які утворені накладеними мережами.

В даному алгоритмі пропонуємо проводити перевірку на необхідну кількість вільних ресурсів в транспортній мережі на нижніх її рівнях для обслуговування навантаження з верхнього рівня, що забезпечує необхідний рівень QoS на всіх рівнях.

Для визначення загального часу затримки, який витрачається на обробку навантаження у вузлах транспортної мережі, та на проходження його маршруту користуємось:

$$T_{1П} = T_{B1} + T_{Г} + T_{B2}. \quad (3.29)$$

де T_{B1} - час затримки у вхідному вузлі; $T_{Г}$ - час затримки у гілці, що з'єднує вхідний і вихідний вузол; T_{B2} - час затримки у вихідному вузлі.

Розрахунок часу затримки для ядра MPLS (Intermediate LSR, рис.3.11 в) та підмережі Intermediate LSR - Egress LSR (рис.3.11 г) проводиться аналогічним чином, як першої підмережі.

Після проведення розрахунків часу затримки для трьох ізольованих підмереж визначаємо сумарний час затримки для наскрізного проходження навантаження через всю транспортну мережу, користуючись:

$$T = T_{1П} + T_{2П} + T_{3П}, \quad (3.30)$$

де $T_{1П}$, $T_{2П}$, $T_{3П}$ - часи затримок у першій, другій та третій підмережах, відповідно.

3.3.3. Апробація методу лінійного програмування на основі транспортної задачі

Метод лінійного програмування можна широко використовувати в мережі [13, 70, 274]. Зокрема в роботі лінійне програмування на основі транспортної задачі методом діакптики ефективно використано при дослідженні технології IP/MPLS/DWDM та в методі перколяції PTN на основі OBS.

Для прикладу розглянемо випадок оптимізації мережі MPLS між LER та LSR маршрутизаторами згідно рис.3.11,б [13]. Для даного прикладу використовуємо (2.62) .

Досліджувана мережа. На рис. 3.12 показані три точки A_l , B_l , C_l , що відповідають LER маршрутизаторам, на які поступає навантаження, і п'ять точок D_l , E_l , F_l , G_l , H_l , що утворюють ядро мережі MPLS (LSR). Час перебування одиничного навантаження – 0,01 с/Гбіт, по п'ятнадцяти маршрутам (рис.3.12) визначені матрицею

	D_l	E_l	F_l	G_l	H_l
A_l	3	2	1	2	3
B_l	5	4	3	1	1
C_l	1	2	3	4	5

$$M_s = \begin{vmatrix} A_l & B_l & C_l \\ 1 & 5 & 7 \end{vmatrix}, \quad M_r = \begin{vmatrix} D_l & E_l & F_l & G_l & H_l \\ 3 & 3 & 3 & 2 & 2 \end{vmatrix}. \quad (3.31)$$

де M_s – кількість відправленого та M_r – отриманого навантаження представлено за допомогою вагових коефіцієнтів, що відповідають кількості 100 Мбіт [13]. Зокрема, спочатку вважається, що навантаження є тільки на вузлах, що відповідає (3.31), а на гілках – рівне нулю. Базис систем координат – вузли чи гілки, для яких навантаження не рівне нулю.

Одночасно час перебування одиничного навантаження на вузлах дорівнює M (див. п.2.3.3).

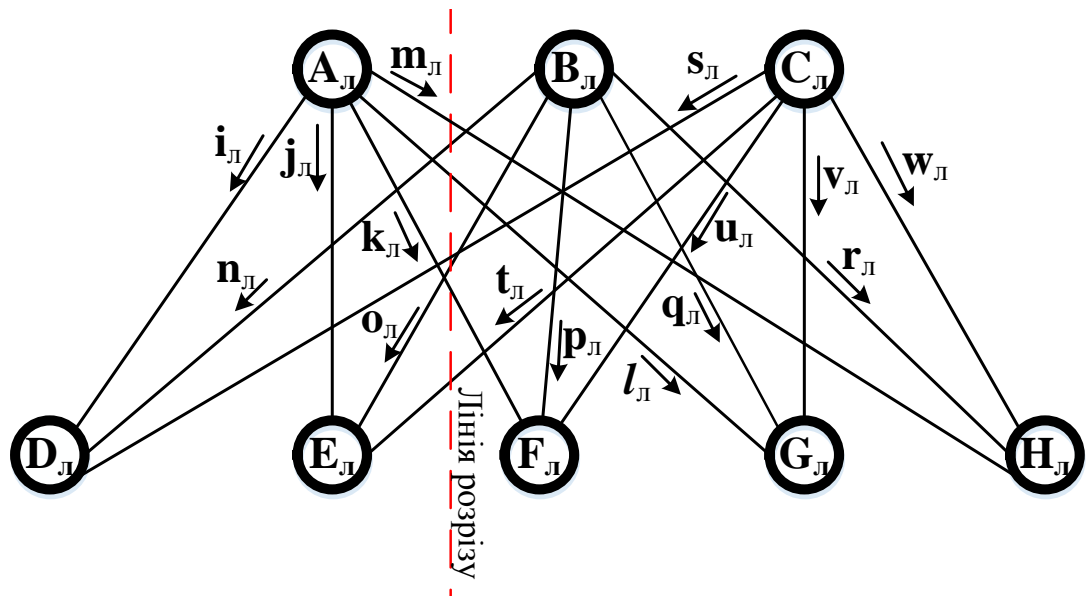


Рис.3.12. Транспортна мережа

Припустимо, що топологічна мережа розділена на дві частини, як показано на рис.3.12. Усунемо тимчасово всі розділені контури. Для першої підмережі вихідна таблиця може бути отримана безпосередньо з рис.3.13,а як:

$$A_{10}^{(1)} = \begin{array}{c|ccc|cc} & H & A_l & D_l & E_l & i_l & j_l \\ \hline A_l & 1 & 1 & & & 1 & 1 \\ D_l & 3 & & 1 & & 1 & \\ E_l & 3 & & & 1 & & 1 \\ \hline & -7M & & & & 3 & 2 \\ & & & & & -2M & -2M \end{array} .$$

Зазначимо, що тут таблиця відповідає (2.78) і використовувані позначення представлені в [274] та п.2.3.2. Рядки, крім останнього, розглядаються як базиси описаної системи координат, де стовбець H відповідає параметру $\tilde{\mathbf{a}}$, а решта стовбців – параметру $\tilde{\mathbf{b}}$ в (2.78). Останній рядок заповнюється таким чином, що перше число відповідає цільовій функції дослідженої мережі, середня частина – нульовим значення, а остання частина визначається за допомогою:

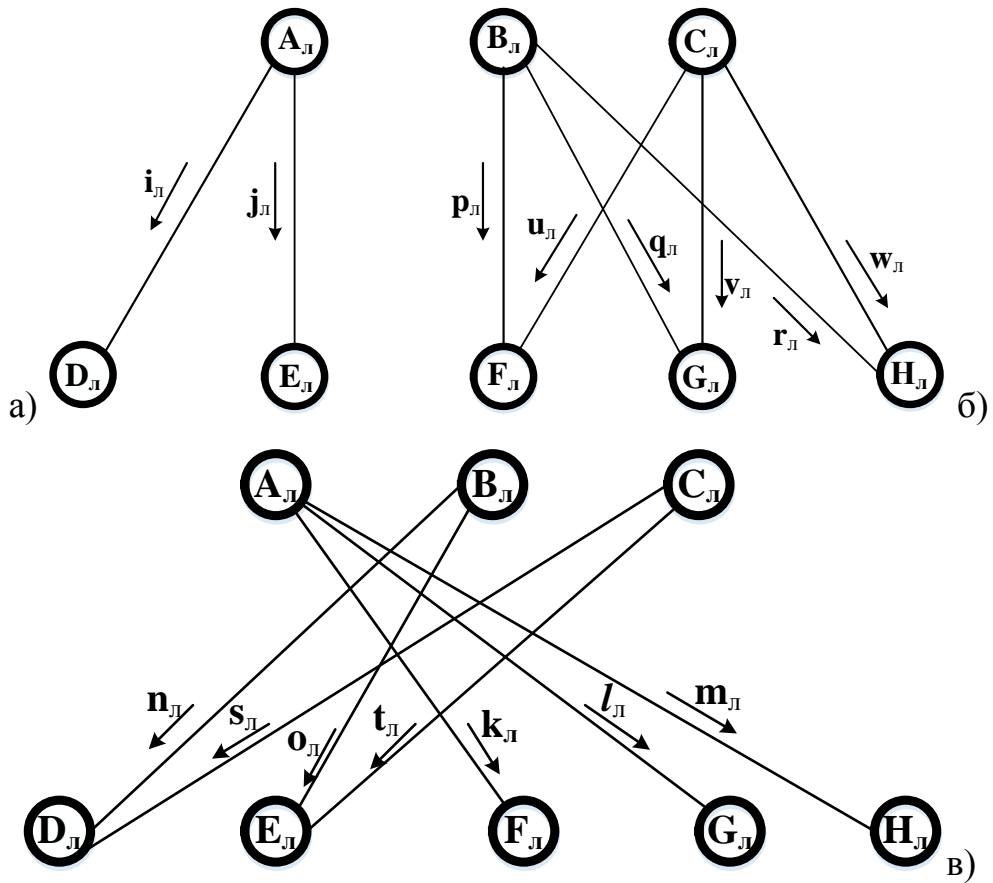


Рис. 3.13. Ізольовані підмережі до оптимізації: а) перша підмережа, б) друга підмережа, в) підмережа перетинань до оптимізації

$$-A_0 \tilde{b}_i + \tilde{b}_m, \quad (3.32)$$

де \tilde{b}_i і \tilde{b}_m – час перебування одиничного навантаження на базисах i на гілках, відповідно. Цільова функція визначається як (2.80).

Вихідна таблиця для другої підмережі (рис.3.13,б):

$$A_{10}^{(2)} = \begin{array}{c|cccccc|cccccc} & H & B_l & C_l & F_l & G_l & H_l & p_l & q_l & r_l & u_l & v_l & w_l \\ \hline B_l & 5 & 1 & & & & & 1 & 1 & 1 & & & \\ C_l & 7 & & 1 & & & & & & & 1 & 1 & 1 \\ F_l & 3 & & & 1 & & & 1 & & & 1 & & \\ G_l & 2 & & & & 1 & & & 1 & & & 1 & \\ H_l & 2 & & & & & 1 & & & 1 & & & 1 \\ \hline & -19M & & & & & & 3 & 1 & 1 & 3 & 4 & 5 \\ & & & & & & & -2M & -2M & -2M & -2M & -2M & -2M \end{array}.$$

Таблиця підмережі перетинів (рис. 3.13,в) має вигляд:

	H	k_l	l_l	m_l	n_l	s_l	o_l	t_l
A_l	1	1	1	1				
D_l	3				1	1		
E_l	3						1	1
B_l	5				1		1	
$A_{10}^i = C_l$	7					1		1
F_l	3	1						
G_l	2		1					
H_l	2			1				
	$-26M$	1	2	3	5	1	4	2
		$-2M$	$-2M$	$-2M$	$-2M$	$-2M$	$-2M$	$-2M$

Тут останній рядок визначався також за допомогою (3.32), але A_0 відповідає всій таблиці A_{10}^i , останнього рядка.

Елементи кожного стовпця вказують, з якими вузлами з'єднані розділені контури.

Оптимізація підмереж. Згідно методу лінійного програмування на основі транспортної задачі п.2.3.2, міняємо місцями вузол A_l і контур j_l за допомогою матриці переходу $A_{21}^{(1)}$, після чого:

$$A_{20}^{(1)} = A_{21}^{(1)} A_{10}^{(1)},$$

отримаємо результуючу матрицю з'єднань. Матриці $A_{21}^{(1)}$ і $A_{20}^{(1)}$ матимуть вигляд:

$$A_{21}^{(1)} = \begin{array}{c|ccc} & a_l & D_l & E_l \\ J_l & 1 & & \\ D_l & & 1 & \\ E_l & -1 & & 1 \\ \hline & -2 & & \\ & 2M & & \end{array}, \quad A_{20}^{(1)} = \begin{array}{c|cccc|cc} & H & a_l & D_l & E_l & i_l & J_l \\ J_l & 1 & 1 & & & 1 & 1 \\ D_l & 3 & & 1 & & 1 & \\ E_l & 2 & -1 & & 1 & -1 & \\ \hline & -2 & -2 & & & 1 & \\ & -5M & 2M & & & & \end{array}.$$

Алгоритм оптимізації полягає у тому, що за ординату вибирається гілка, для якої час перебування одиничного навантаження є найменшим, що представлено в останньому рядку. Розглядаються ординати старої системи координат, від яких нова ордината (в даному випадку гілка J_l) була залежною в старій системі координат (вузли A_l та D_l). Стара ордината, в якій є

найменше навантаження (вузол A_l), замінюється новою ординатою. Здійснюється алгебраїчне перетворення таким чином, що в стовпчику для J_l в $A_{20}^{(1)}$ маємо нульові значення, крім рядка, який відповідає базису для J_l , де має значення одиниця.

Оскільки в матриці немає негативних значень часу перебування одиничного навантаження, то перша підмережа вже оптимізована. Результуючі шляхи показані на рис.3.14, а. Стовпець a_l показує, що контур a_l включає вузли J_l та E_l (рис.3.12, а).

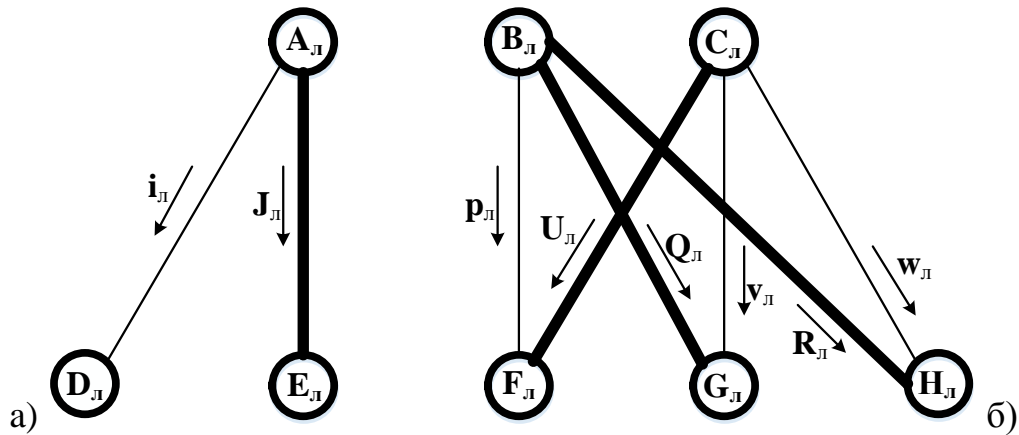


Рис. 3.14. Підмережі після оптимізації: а) перша підмережа; б) друга підмережа

При оптимізації другої підмережі, необхідно виконати три послідовних перетворення. Вузли G_l , H_l , F_l перетворюються в контури q_l , r_l , u_l відповідно. Визначивши матрицю переходу $A_{41}^{(2)}$ отримаємо оптимізовану матрицю з'єднань:

$$A_{40}^2 = \begin{array}{c|cccc|cccc|cc} & H & B_l & C_l & f_l & g_l & h_l & p_l & Q_l & R_l & U_l & v_l & w_l \\ \hline B_l & 1 & 1 & & & -1 & -1 & 1 & & & & -1 & -1 \\ C_l & 4 & & 1 & -1 & & & -1 & & & & 1 & 1 \\ U_l & 3 & & & 1 & & & 1 & & & 1 & & \\ Q_l & 2 & & & & 1 & & & 1 & & & 1 & \\ R_l & 2 & & & & & 1 & & & 1 & & & 1 \\ \hline & -13 & & & -3 & -1 & -1 & & & & & 3 & 4 \\ & -5M & & & 2M & 2M & 2M & & & & & & \end{array} .$$

Оптимальні шляхи показані на рис. 3.14,б.

Підмережа перетинань складається з усіх видалених гілок мереж (рис.3.12,в). Реакцію від оптимізації підсистем на підмережу перетинань можна обчислити, використовуючи матриці переходу $A_{21}^{(1)}$ та $A_{41}^{(2)}$, тоді отримаємо для підмережі перетинів результуючу матрицю з'єднань (рис.3.15,а):

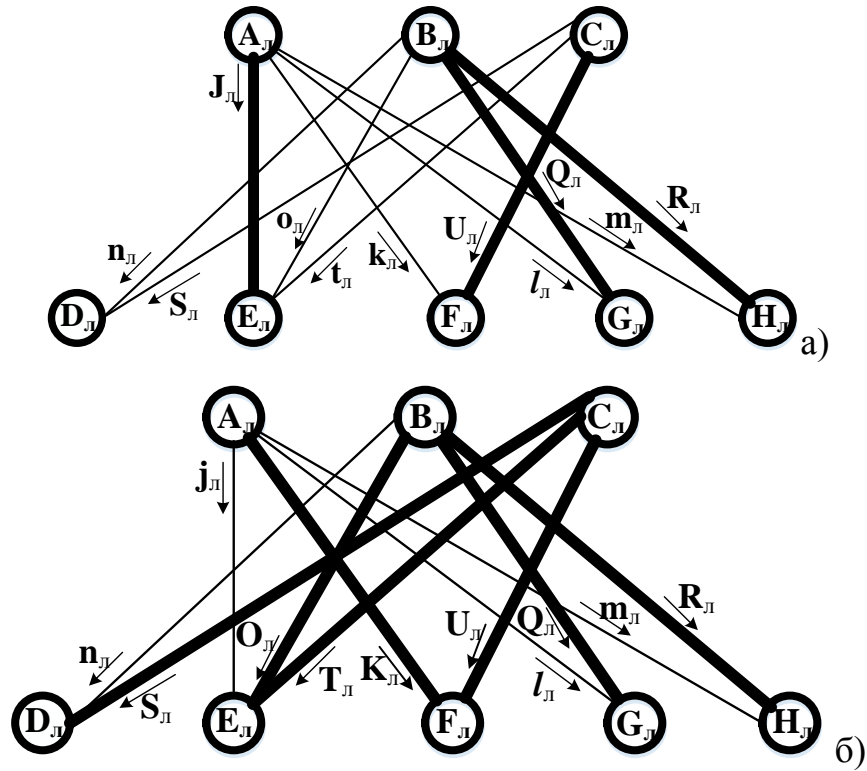


Рис.3.15. Підмережа перетинань: а) до її оптимізації, але після оптимізації підмереж; б) після її оптимізації

	k_l	l_l	m_l	n_l	s_l	o_l	t_l	H
J_l	1	1	1					1
D_l				1	1			3
E_l	-1	-1				1	1	2
B_l		-1	-1	1		1		1
$A_{50}^i = C_l$	-1				1		1	4
U_l	1							3
Q_l		1						2
R_l								2
	-4	-1		5	1	4	2	-15
	$2M$	$2M$	$2M$	$-2M$	$-2M$	$-2M$	$-2M$	$-10M$

В розглянутому прикладі загальний час затримки представлений абсолютним значенням негативного числа. На початку оптимізації він дорівнював -26М мс. Загальний час затримки зменшився до 15 + 10М мс.

Зворотна двоїста оптимізація відрізняється від стандартної оптимізації наступним чином:

- 1) при заміні контура на вузол в матриці перетворення на перетині відповідних строк та стовпця записувати не +1, а -1;
- 2) порядок перетворень змінюється на обернений.

В результаті чотирьох послідовних перетворень всі негативні параметри часу перебування одиничного навантаження зникнуть, а саме, контури s_l , t_l , o_l , k_l послідовно переставляються з парами вузлів D_l , C_l , B_l , J_l відповідно. В результаті отримуємо:

$$A_{09} = \begin{array}{c|ccccccc|c} & j_l & l_l & m_l & n_l & d_l & b_l & c_l & H \\ \hline J_l & -1 & & & & & & & \\ D_l & & & & & -1 & & & \\ E_l & & & & & 1 & -1 & -1 & \\ \hline B_l & & & & & & -1 & & \\ C_l & & & & & & & -1 & \\ U_l & -1 & -1 & -1 & & & & & 2 \\ Q_l & & 1 & & & & & & 2 \\ R_l & & & & & & & & 2 \\ \hline K_l & -1 & -1 & -1 & & & & & -1 \\ l_l & & 1 & & & & & & \\ m_l & & & 1 & & & & & \\ n_l & & & & 1 & & & & \\ S_l & & & & -1 & -1 & & & -3 \\ O_l & & 1 & 1 & -1 & & -1 & & -1 \\ T_l & -1 & -1 & -1 & 1 & 1 & & -1 & -2 \\ \hline & 2 & 7 & 6 & 3 & 2 & -4 & -2 & -15 \\ & & & & & & 2M & 2M & \end{array}$$

Відповідна топологічна модель приведена на рис. 3.15,б. Знаки у всіх нових рядках матриці $A_{09}^{(i)}$, як і $\tilde{\gamma}$, слід замінити на протилежні, щоб

напрямки векторів відповідали рис. 3.15,б. Загальний час затримки – 22 мс.

При оптимізації підмережі перетинань чотири вузли $D_{л}$, $C_{л}$, $B_{л}$ і $J_{л}$, які були частинами ізольованих підмереж, стали контурами, але є вузлами підмереж на рис. 3.14. Для уникнення взаємного впливу між підмережами необхідно зберегти їх в якості вузлів як в підмережах, так і в підмережі перетинів.

Кожен з заново створених чотирьох контурів в підмережі перетинань буде розділений на дві пари вузлів.

- 1) Базиси представлятимуть короткі пари вузлів (к.п.в.).
- 2) Решта контурів представлятимуть довгі пари вузлів (д.п.в.). Дві пари вузлів утворюють замкнутий контур.

Одиниці в чотирьох рядках ($D_{л}$, $C_{л}$, $B_{л}$ і $J_{л}$) підмереж досі представляли к.п.в. Через д.п.в. не проходить навантаження H . Для того, щоб врахувати нове представлення чотирьох елементів мережі, необхідно замінити значення компонент вектора контурів підмереж. Решта рівнянь підмереж залишаються без зміни, але їхні вектори H замінюють векторами підмережі перетинів. Заміна к.п.в. на д.п.в. визначається наступним співвідношенням:

$$\tilde{\gamma}_{дпв} = \tilde{\gamma}_к + \tilde{\gamma}_{кпв}.$$

Розглянемо вектор $\tilde{\gamma}_m$ в матриці A_{09}^j для оптимізованої підмережі перетинань:

- 1) виберемо чотири часи перебування одиничного навантаження з нових контурних стовпців $j_{л}$, $d_{л}$, $b_{л}$, $c_{л}$;
- 2) розташуємо їх у тому ж порядку, в якому вони розташовані в стовпцях підмереж;
- 3) помістимо одиничну матрицю над кожним вектором;
- 4) утворені матриці є матрицями зворотної реакції.

Змінні к.п.в. перетворюються, в змінні д.п.в. за допомогою одиничної матриці. Змінні д.п.в. позначаються штрихом.

Обчисливши вираз $A_{40}^{(1)} = A_{20}^{(1)} A_{42}^{(1)}$, отримаємо для першої підмережі з д.п.в.:

$$A_{40} = \begin{array}{c|ccc|cc} & H & a_l & D_l' & E_l & i_l & J_l' \\ \hline J_l' & 0 & 1 & & & 1 & 1 \\ D_l' & 0 & & 1 & & 1 & \\ E_l & 0 & -1 & & 1 & -1 & \\ \hline & 0 & & 1 & 1 & 4 & 2 \\ & & & & & & 2M \end{array}.$$

Перетворення полягає в множенні кожного стовпця на вектор $\tilde{\gamma}_m$, отримані скалярні вирази поміщаються в останньому рядку. Інші рядки не відрізняються від відповідних рядків вихідної матриці. Контури і пари вузлів показані на рис. 3.16. Контур a_l включає тепер д.п.в. J_l' (замість короткої) і вузол E_l . Контурне значення інтенсивності поступлення навантаження в канал становить: $\tilde{\gamma}_a=2M$.

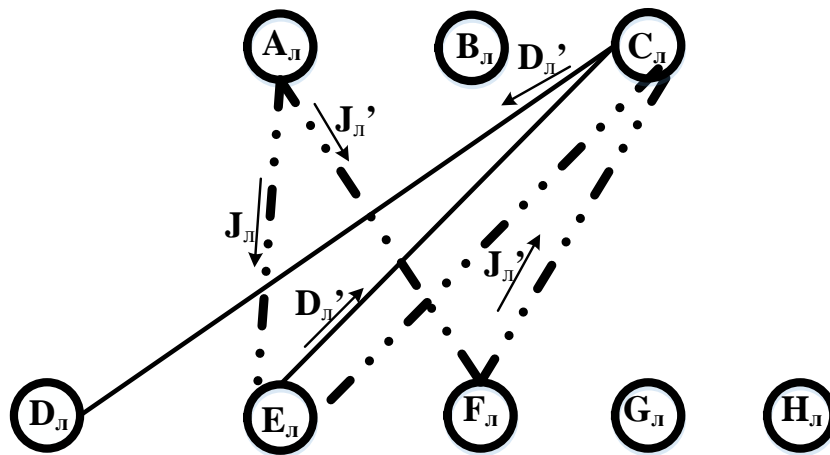


Рис. 3.16. Довгі пари вузлів в першій підмережі

Перетворення для другої підмережі і підмережі перетинів відбувається аналогічним чином.

Також є негативні параметри часу перебування одиничного навантаження, які повинні бути ліквідовані. Оскільки перша підмережа не має негативних $\tilde{\gamma}$, то оптимізується тільки друга. Здійснимо заміну контуру r_l на д.п.в. B_l' . Загальна мета оптимізації полягає в тому, щоб в якості базису виступали контури, а не вузли.

Останні два етапи у другому циклі. Міняємо місцями вузол O_l з контуром b_l . Всі $\tilde{\gamma}$ - позитивні, значить оптимізація підмережі перетинань

закінчена. Наступний крок - знайти зміни в підмережі перетинань, що з'явилися в результаті оптимізації підмереж.

Позбавимось від д.п.в., через які проходить навантаження H . Через д.п.в. $C_{л'}$ (яка включає вузол) проходить навантаження H , тому краще замінити д.п.в. на к.п.в.

Тепер через к.п.в. $C_{л}$ навантаження H не проходить, крім того, негативних $\tilde{\gamma}$ немає. У другому циклі загальний час затримки зменшився з 22 мс одиниць до 20 мс. Оптимізація підмережі перетинань здійснювалася в два етапи:

1. Вузол $O_{л}$, що належить підмережі перетину, замінювався на контур. Оскільки через $O_{л}$ проходить тільки контурне навантаження підмережі перетинань, то цей етап не дає зворотної реакції на підмережі.

2. Д.п.в. $C_{л'}$ змінювалась на к.п.в. $C_{л}$, аналогічна зміна має бути зроблена в підмережах. Проводимо заміну д.п.в. $C_{л'}$ у другій підмережі на к.п.в., яка протилежна перетворенню.

Негативних координат у вектора $\tilde{\gamma}'$ не виникло. Зворотної реакції на першу підмережу немає і в ній відсутні негативні координати у вектора $\tilde{\gamma}'$, т.ч. оптимізація по частинах завершена.

Повний час затримки дорівнює сумі добутків навантажень H на відповідні $\tilde{\gamma}$: $T_{чз}=20$ мс. Отже, оптимізовано проходження навантаження за критерієм оптимальності часу затримки (рис. 3.17).

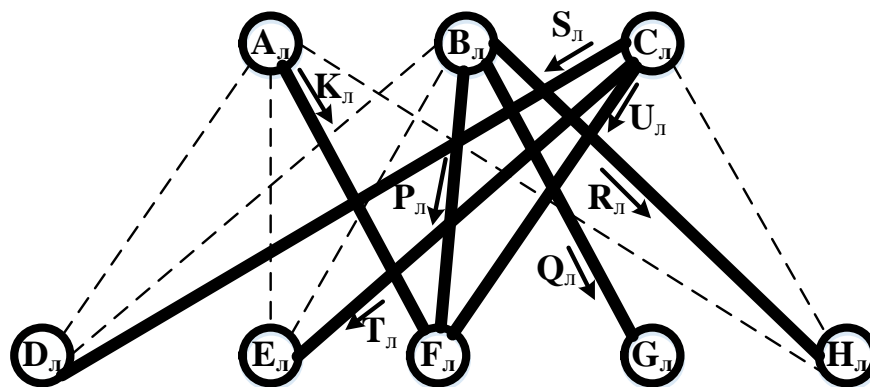


Рис. 3.17. Оптимальне проходження навантаження

3.4. Дослідження 3D-аналізу просторової анізотропії кристалофізичних параметрів

3.4.1. Побудова вказівних поверхонь коефіцієнта електромеханічного зв'язку

Єдиною можливістю визначення ефективного зрізу матеріалів для п'єзоперетворювача є 3D-аналіз просторової анізотропії [8, 9, 30], який для коефіцієнта електромагнітного зв'язку обмежувався лише дослідженнями перерізів на головних площинах [162, 283].

Для проведення досліджень для кристалів LiNbO_3 були використані параметри отримані в роботі [30]: коефіцієнти пружної жорсткості $C_{11}=199,2$, $C_{12}=54,7$, $C_{13}=70$, $C_{14}=7,9$, $C_{33}=240$, $C_{44}=59,9$ ГПа; значення компонент тензора діелектричної проникливості $\epsilon_{11}=\epsilon_{22}=44$ і $\epsilon_{33}=27,9$, п'єзоелектричні константи $e_{15}=3,67$, $e_{22}=2,38$, $e_{31}=0,34$, $e_{33}=1,6$ Кл/м² і значення густини $\rho_m=4,628 \cdot 10^3$ кг/м³. Тут коефіцієнти пружної жорсткості та п'єзоелектричні константи представлені у матричному вигляді. Перехід із тензорного запису в матричний вигляд прийнято визначати співвідношеннями [162] $C_{nfp} = C_{mw}$ та $e_{pnf} = e_{pm}$.

Із формул визначення коефіцієнта електромеханічного зв'язку (1.25)-(1.29), найбільш простою для 3D-аналізу є формула (1.28). Алгоритм визначення просторового розподілу є відносно простим. Для довільного напрямку за допомогою рівнянь (1.20) та (1.21) визначаються швидкості акустичних хвиль без врахування та з врахуванням п'єзоелектричного зв'язку. Отримані значення підставляємо в (1.28) і отримуємо коефіцієнт електромеханічного зв'язку у вибраному напрямку. Необхідно зазначити, що (1.28) є наближеною формулою і справедлива, коли κ_m має малі значення, але в деяких напрямках поширення акустичної хвилі може бути $\kappa_m > 1$, що з огляду на означення і (1.26) принципово не може бути.

Враховуючи (1.25)-(1.29) і рівнянь (1.20) та (1.21) можна отримати загальне співвідношення визначення коефіцієнта електромеханічного зв'язку тензорному вигляді [75]:

$$\kappa_M = \sqrt{\frac{(e_{lmi}a_l a_m f_i)(e_{pqk}a_p a_q f_k)}{(C_{ilk}a_l a_m f_i f_k)(\epsilon_{rs}a_r a_s) + (e_{lmi}a_l a_m f_i)(e_{pqk}a_p a_q f_k)}}. \quad (3.33)$$

Останнє співвідношення можна спростити і привести до матричного вигляду (1.29). Зауважимо, що необхідно враховувати різні переходи з тензорного вигляду у матричний, і навпаки, для розглянутих параметрів [162].

Отже, користуючись (3.33), можна побудувати вказівну поверхню коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Алгоритм визначення даного параметра в напрямку радіуса вектора:

1. вибираємо напрям радіуса-вектора, який співпадає з напрямком поширення акустичної хвилі;

1. за допомогою рівняння Гріна-Крістофеля (1.21) визначаємо три швидкості акустичних хвиль;

2. підставляючи отримані значення з швидкостей в (1.21), визначаємо напрям кожної поляризації $\mathbf{f}(q_a)$;

3. підставляємо в (3.31) значення векторів $\mathbf{r} \parallel \mathbf{a}$ з (2.89) та $\mathbf{f}(q_a)$, отримане в попередньому пункті.

Отже, користуючись (3.31), отримано графік залежності (рис. 3.18), який узгоджується з [213, 283]. Представлений рис. 3.18 має велике практичне значення і використовується для визначення напрямків зрізів для п'єзоперетворювача на основі кристалів LiNbO_3 , таким чином алгоритм побудови вказівної поверхні є адекватний з точки зору отриманих раніше результатів. Важливо зауважити, що вихідні параметри використані в даних дослідженнях і в [283] є різними. При порівнянні з [213, 283] аналогічно спостерігаємо, що коефіцієнт електромеханічного зв'язку для однієї поперечної акустичної поляризації завжди дорівнює нулю і відповідає напрямку поляризації вздовж X_1 (називають просто поперечна поляризація, для якої кут зсуву дорівнює нулю). На рис. 3.18 дві криві відносяться до квазіпоздовжньої і квазіпоперечної поляризацій (кут зсуву не дорівнює

нулю). Як зазначалося в наших дослідженнях, для 3D-аналізу поперечні акустичні поляризації (в довільних напрямках вони є в більшості випадках квазіпоперечними) розрізняються за швидкістю поширення. З рис.3.18 спостерігаємо, що від 30° до 39° і від 63° до 90° від осі X_2 квазіпоперечна хвиля відповідає випадку $q_a=1$, тобто поперечній хвилі з меншою швидкістю, а для всіх інших випадків – акустичній хвилі з поляризацією $q_a=2$.

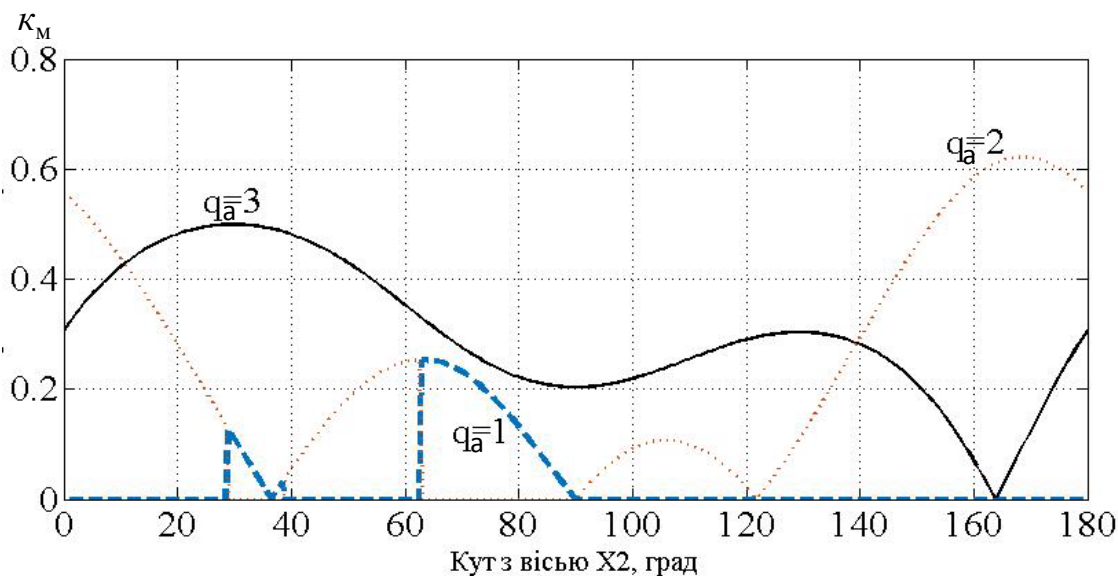


Рис. 3.18. Залежність коефіцієнта електромеханічного зв'язку для різних акустичних поляризацій в залежності від напрямку поширення акустичної хвилі в площині X_2X_3 кристалів $LiNbO_3$

Користуючись представленим алгоритмом, побудовано вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку для різних акустичних поляризацій (рис.3.19) [75]. Аналізуючи рис.3.19, бачимо, що у поверхнях для поперечних поляризацій є різкі зміни значень коефіцієнта електромеханічного зв'язку, що можна пояснити наявністю акустичних осей, які показано на рис.3.18. З рис.3.19 бачимо, що коефіцієнт електромеханічного зв'язку для $q_a=1$ є значно меншим, ніж для $q_a=2$ і $q_a=3$, які між собою є співрозмірні. Для побудованих вказівних поверхонь визначено максимальні значення, які представлені в табл. 3.1, де вказані напрямки поширення акустичних хвиль та відповідні поляризації.

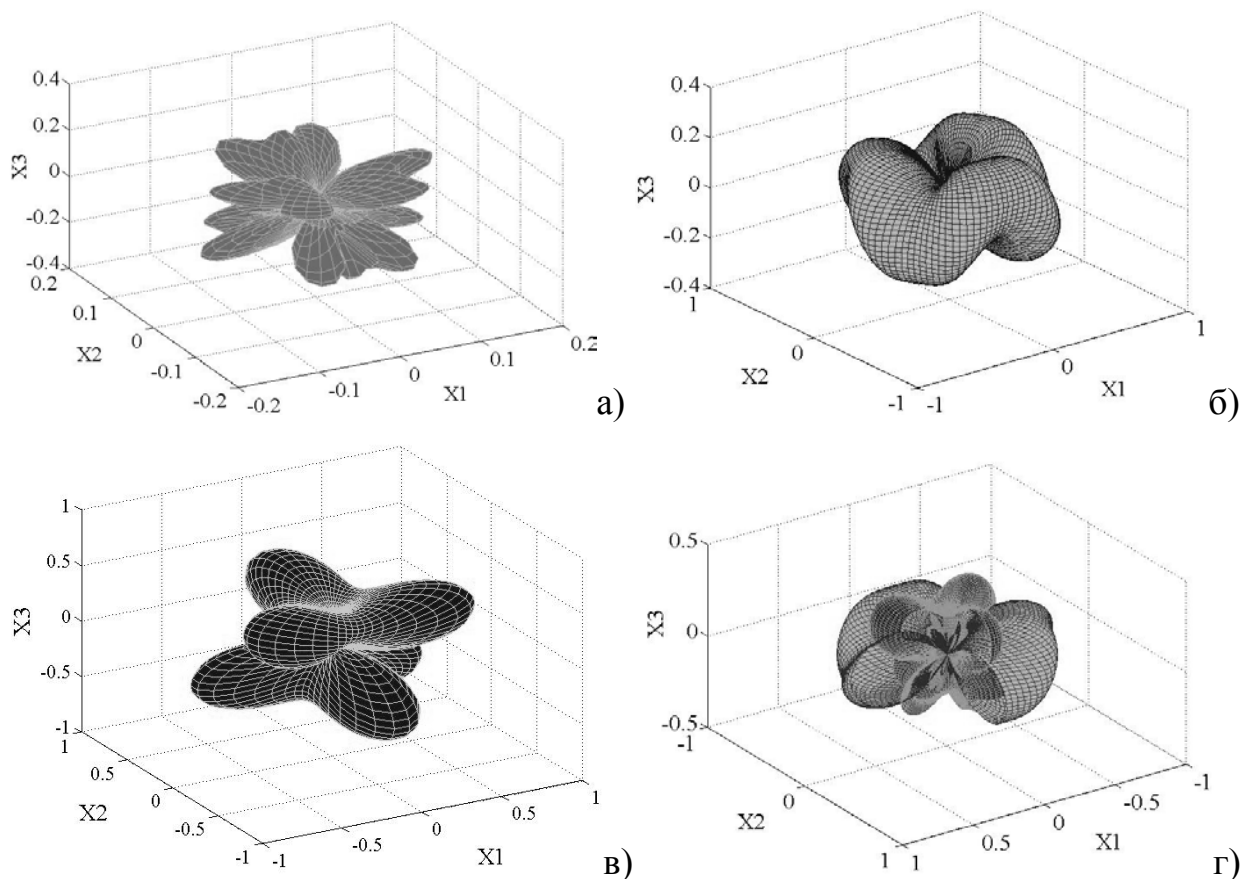


Рис. 3.19. Вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку для кристалів LiNbO_3 : а) $q_a=1$; б) $q_a=2$; в) $q_a=3$; г) $q_a=1,2$ і 3 з частковим перерізом

З рис.3.19 та табл. 3.1 спостерігаємо, що представлені вказівні поверхні не є фігурами обертання, що узгоджується з теоремою Германа [284]. Вони також зберігають, згідно принципу Кюрі-Неймана [165], основні елементи симетрії, тобто вісь симетрії третього порядку і три перпендикулярні до рисунка площини симетрії, що характерно для кристалів класу симетрії $3m$. Слід зауважити, що екстремальні значення побудованих вказівних поверхонь спостерігаються, коли кут $\varphi=30^\circ$ і, де $u \in Z$ (див.табл. 3.1), що характерно для кристалів LiNbO_3 [9, 30].

Напрямки, в яких коефіцієнт електромеханічного зв'язку, має ненульові значення лише для однієї акустичної поляризації має особливе практичне значення, оскільки в цих напрямках можливе збудження лише однієї акустичної поляризації п'єзоперетворювачем. На практиці коефіцієнт

електромеханічного зв'язку для інших акустичних поляризацій може бути $\kappa_M > 0$, але досить малим $\kappa_M < 0.01$.

Таблиця 3.1.

Максимальні значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку кристалів
LiNbO₃ [75]

Поляризація акустичної хвилі	Напрямок вектора a		Напрямок вектора f (q _a)		κ_M
	θ , град	φ , град	θ , град	φ , град	
q _a =1	27	30, 150, 270	66	-90, 30, 150	0.25
	153	90, 210, 330	114	-30, 90, 210	
q _a =2	90	0, 120, 240	37.6	-91, 29, 159	0.68
q _a =3	60	90, 210, 330	55	90, 210, 330	0.5
	120	30, 150, 270	125	30, 150, 270	

Проводячи такі дослідження виявлено, що напрями поширення акустичних хвиль при $\kappa_M > 0.1$ для q_a=1 і водночас при $\kappa_M < 0.01$, для q_a=2 і q_a=3 у кристалах LiNbO₃ не спостерігаються взагалі. Для поляризацій q_a=2 і q_a=3 аналогічні випадки мають місце, причому найбільша кількість таких зрізів є для поздовжньої хвилі.

Для поздовжньої поляризації найбільш ефективним є напрям, представлений на рис.3.18, який і використовується [213], коли $\kappa_M = 0,49$. В сферичній системі координат згідно принципу Кюрі-Неймана отриманий результат відповідає напрямкам $\theta = 54^\circ$, коли $\varphi = 0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ і $\theta = 126^\circ$ та коли $\varphi = 60^\circ, 180^\circ, 300^\circ$. Для поперечної хвилі, згідно рис.3.18, використовують напрямки, коли $\kappa_M = 0,62$ [213]. З приведених досліджень визначено, що максимальне значення коефіцієнта електромеханічного зв'язку при поперечній поляризації, коли для інших поляризацій $\kappa_M < 0,01$, становить 0,65. Напрямок поширення акустичної хвилі відповідає $\theta = 79^\circ$, коли $\varphi = 44^\circ$ і $76^\circ; 164^\circ$ і $196^\circ; 284^\circ$ і 316° , а також $\theta = 101^\circ$, коли -16° і $16^\circ; 104^\circ$ і $146^\circ; 224^\circ$ і 356° . Зауважимо, що кут φ відхиляється на 16° від напрямів $60^\circ, 180^\circ, 300^\circ$ при $\theta = 79^\circ$ і від $0^\circ, 120^\circ, 240^\circ$ при $\theta = 101^\circ$.

Останні результати показують можливість енергоефективніше (на 3 %) використовувати п'єзоперетворювач на основі кристалів LiNbO_3 при отриманні поперечних акустичних хвиль. Крім того, отримані значення орієнтації зразка переконують у доцільності проведення 3D-аналізу коефіцієнта електромеханічного зв'язку і для інших п'єзоелектричних матеріалів.

3.4.2. Побудова вказівних поверхонь коефіцієнта акустооптичної якості в фотонних кристалах

В залежності від поставленого технологічного завдання розглядають різні коефіцієнти АО якості [68, 285]. Переважно для визначення перспективи застосування різних матеріалів в АО пристроях розглядається коефіцієнт АО якості (1.19).

ФК являють собою композитні матеріали, оптичні властивості яких періодично модульовані з періодом порядку довжини хвилі світла. Електромагнітну хвилю, що поширюється у середовищі з періодичним набором тонких шарів дворівневих систем, можна розкласти на дві складові електромагнітних полів (рис.3.20) [286].

В [287] запропоновано для двохмірних ФК визначати параметри в залежності від вмісту різних матеріалів. Наприклад, для пружнооптичного тензора p_{ijkl} , та коефіцієнта пружної жорсткості C_{mnl} , які для двохмірних ФК визначаються згідно:

$$p_{ijkl} = w p_{ijkl}^{(1)} + (1-w) p_{ijkl}^{(2)},$$
$$C_{mnl} = w C_{mnl}^{(1)} + (1-w) C_{mnl}^{(2)},$$

де w – коефіцієнт заповнення, верхній індекс (1) відноситься до одного матеріалу включень, а (2) – до іншого матеріалу.

Проведено дослідження на основі кристалів LiNbO_3 (відповідає індексу 1) та $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$ (відповідає індексу 2). Вхідні параметри взяті з робіт [7, 30], так для $\text{LiNbO}_3:\text{Mg}$: коефіцієнти пружної жорсткості $C_{11}=205.4$, $C_{12}=57.2$,

$C_{13}=74.3$, $C_{14}= 7,9$, $C_{33}=249.3$, $C_{44}=60.9$ ГПа; п'єзоелектричні константи $e_{15}=3.75$, $e_{22}=2.32$, $e_{31}=0.4$, $e_{33}=1.1$ Кл/м², значення густини $\rho_m= 4,638 \cdot 10^3$ кг/м³, показники заломлення $n_o =2.2841$; $n_e =2.1994$ і пружнооптичні коефіцієнти $p_{11}=-0.015$; $p_{12}=0.058$; $p_{13}=0.174$; $p_{31}=0.155$; $p_{33}=0.154$; $p_{14}=-0.044$; $p_{41}=-0.149$; $p_{44}=0.136$. Пружнооптичні коефіцієнти для кристалів LiNbO₃ $p_{11}=-0.021$; $p_{12}=0.06$; $p_{13}=0.172$; $p_{31}=0.141$; $p_{33}=0.118$; $p_{14}=-0.052$; $p_{41}=-0.109$; $p_{44}=0.121$.

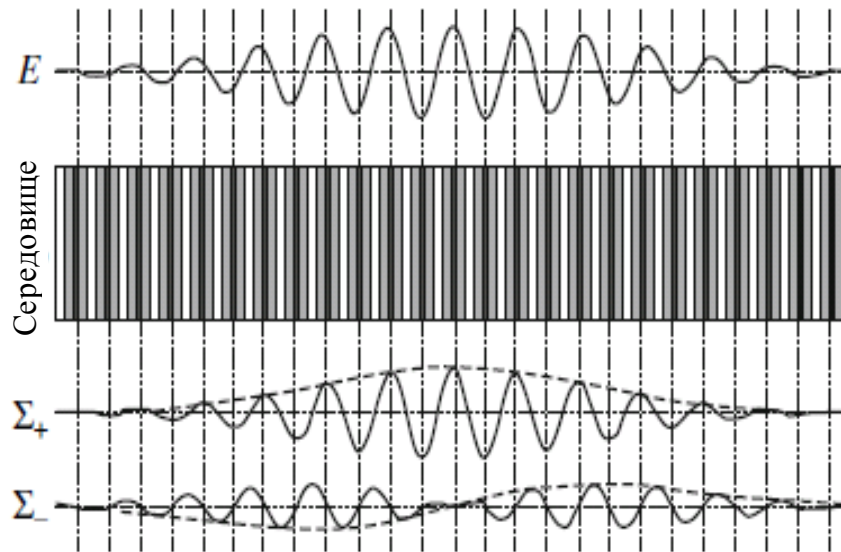


Рис. 3.20. Схема опису періодичної структури і розклад електричного поля на моди Σ_+ і Σ_- .

В табл. 3.2 представлено максимальні значення коефіцієнта АО якості, коли $w= 0,25$; $0,5$; $0,75$, та для кристалів LiNbO₃ та LiNbO₃:MgO [30], коли $w=1$; 0 , відповідно. Наприклад, коли $w= 0,25$, це означає, що товщина шару ФК з кристалів LiNbO₃ є втричі меншою, ніж з кристалів LiNbO₃:MgO.

Представлені результати показують, що коефіцієнти АО якості M_2 залежать від w лінійно. Хоча в [287] зазначається про інші випадки, але і в даних дослідженнях при анізотропній дифракції, коли $i_u \parallel \mathbf{r}$, $i_v \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{j}_1$ і $q=1$, при різних w значення коефіцієнта АО якості M_2 змінюється нелінійно. Матеріали LiNbO₃ та LiNbO₃:MgO мають однакову симетрію і більшість значень є близькими. Можна припустити, що при різних кристалах та з різною симетрією можна отримати неочікувані та цікаві результати.

Екстремальні значення параметра АО якості M_2 для кристалів LiNbO_3

Вид дифракції	Взаємне розміщення векторів	w	q=1	q=2	q=3
ізотропна	$\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{r}$	0	5,3	9.5	8.1
		0,25	5.22	8.78	7.69
		0,5	5.09	8.1	7.24
		0,75	4.92	7.46	6.8
		1	4.7	6.9	6.4
ізотропна	$\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{r}, \mathbf{a} \parallel \mathbf{j}_1$	0	9.5	1.9	6.2
		0,25	8.35	1.86	5.75
		0,5	7.29	1.78	5.3
		0,75	6.28	1.71	4.86
		1	5.4	1.6	4.4
ізотропна	$\mathbf{a} \parallel \mathbf{r}, \mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{j}_1$	0	2.2	2.2	2.8
		0,25	2.33	2.3	2.8
		0,5	2.48	2.42	2.847
		0,75	2.64	2.5	2.9
		1	2.8	2.5	2.9
анізотропна	$\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{r}, \mathbf{i}_\nu \parallel \mathbf{j}_1$	0	20.6	10.5	0.63
		0,25	19.4	10	0,61
		0,5	18.2	9.56	0,59
		0,75	17	9.1	0,57
		1	15.8	8.6	0.55
анізотропна	$\mathbf{i}_\mu \parallel \mathbf{r}, \mathbf{i}_\nu \parallel \mathbf{a} \parallel \mathbf{j}_1$	0	2	9.6	2.2
		0,25	1,94	8,88	1,98
		0,5	1,9	8,15	1,74
		0,75	1,92	7,44	1,52
		1	1.97	6.8	1.3

Висновки до розділу 3

1. 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 доцільно його розкласти на симетричний і антисиметричний тензори.

2. Набула подальшого розвитку тензорна модель багатошляхової маршрутизації у PTN для випадку використання двостороннього зв'язку між транзитними вузлами шляхом оцінювання необхідності врахування напряму передавання інформаційних потоків у мережній структурі. Врахування особливості двохстороннього зв'язку між транзитними вузлами дозволяє зменшити час затримок передачі даних в більшості випадків на 10-30%.

3. Наведений приклад для дослідження PTN з перерозподілом навантаження за допомогою методу діакоптики при багатошляховій маршрутизації. В роботі представлено алгоритм дослідження багатосарової структури транспортної мережі на основі технологій IP/MPLS/DWDM.

4. Проведена апробація методу діакоптики для MPLS мережі між LER та LSR маршрутизаторами шляхом розв'язання транспортної задачі за допомогою лінійного програмування. Здійснено оцінку якості обслуговування за критерієм мінімізації часу затримки з використанням формули Літла.

5. В роботі розвинуто 3D-аналіз коефіцієнта електромеханічного зв'язку, що дозволяє визначати орієнтацію зрізів для п'єзоперетворювачів в АО пристроях за критерієм енергетичної ефективності. Вперше побудовано вказівні поверхні коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Показано адекватність отриманих результатів за допомогою аналізу проведених раніше досліджень на площині X_2X_3 на основі кристалів LiNbO_3 . Визначено максимальні значення для побудованих поверхонь. Визначено зрізи енергоефективного використання кристалів LiNbO_3 для акустичних

пристроїв. 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.

6. Проаналізовано можливості використання ФК в OTN при АО взаємодії. На основі отриманих результатів бачимо, що параметри АО якості M_2 залежать від частки використаних однорідних кристалів LiNbO_3 та $\text{LiNbO}_3:\text{MgO}$.

РОЗДІЛ 4. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОЦІНКА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ

4.1. Розробка методики визначення енергоспоживання оптичної транспортної мережі

4.1.1. Загальний принцип визначення параметру енергоефективності

Для виявлення найбільш енергоємних елементів мережі і їх вдосконалення для початку здійснено розрахунок витрат електроенергії для мережі доступу/агрегації і транспортної мережі при передачі одного IP пакету довжиною 1000 байт. Розрахунок проводився за мережевою структурою, яка представлена на рис.4.1, з використанням обладнання компаній Cisco, Huawei, EOspace. Кінцевий користувач має доступ до мережі за допомогою модемної технології ADSL(Asymmetric Digital Subscriber Line) зі швидкістю 10Мбіт/с. Швидкість передавання всередині ядра мережі становить 10 Гбіт/с.



Рис. 4.1. Досліджувана структура телекомунікаційної мережі

В табл. 4.1 представляє енергетичне споживання телекомунікаційного обладнання.

Енергоспоживання телекомунікаційних пристроїв

Обладнання	Енергоспоживання, Вт/год	Марка моделі, виробник
DSLAM	187,38	Huawei MA 5016 DSLAM
Ethernet switch	170	Cisco ME 2600x Ethernet Switch
BNG	425	Cisco ASR 9001-S Router
Edge router	150	Cisco 7210 Router
ООО комутатор	0,0094	EOspace Electro-optic switch
Обладнання	Енергоспоживання, пВт/біт	Посилання
Core router	2,7	[223]
Транспортна технологія	0,27	[223]
Оптоелектроне перетворення	0,336	[288]
Електрооптичне перетворення	0,722	[289]
Комутаційна фабрика ОЕО	0,405	[223]

Розрахунок витрат електроенергії здійснювався на прикладі передачі одного IP пакету від кінцевого користувача до дата-центру, включаючи лише частини телекомунікаційної мережі (мережі доступу/агрегації і транспортної мережі). Для кожного обладнання знайдено витрату електроенергії на обробку одного біта інформації на основі параметрів енергоспоживання обладнання і максимального навантаження, яку він може обробити за одиницю часу. Після цього визначаємо витрату електроенергії для передачі

пристроєм одного IP пакета, середня довжина якого становить 1000 байт. Розрахунки проведені для двох режимів роботи: з ОЕО перетворенням на проміжних вузлах і без нього, тобто відкриттям наскрізного каналу між двома кінцевими вузлами транспортної мережі. В останньому випадку на верхньому рівні, тобто рівні, де працює транспортна технологія і ядрові маршрутизатори, передається лише службова інформація IP пакету (заголовок пакету - 20 байт), а не весь пакет, як в режимі із оптичноелектронним перетворенням. Також приймаємо, що пакет проходить три проміжних вузла в ядрі мережі. В результаті отримуємо сумарну витрату електроенергії для передачі одного пакету, детальний склад якої представлений в табл. 4.2.

Таблиця 4.2.

Визначення параметру енергоефективності для оптичної транспортної мережі для режимів із ООО і з ОЕО

Частина мережі	Режим із ОЕО	Режим без ОЕО
ОЕО	5,603	1,088
ООО	0	0,783
Транспортний рівень	2,216	0,555
Ядрові маршрутизатори	13,85	5,543
Сумарна витрата електроенергії	21,669	7,969

З табл. 4.2. бачимо, що при видаленні проміжного ОЕО перетворення витрати електроенергії для OTN зменшились на 63%.

Результати дослідження показують, що видалення ОЕО перетворення з переходом до повністю оптичних мереж є ключовим підходом щодо зменшення енергетичного споживання OTN.

4.1.2. Математична модель визначення параметру енергоефективності

Енергоспоживання вузлів мережі визначається їхньою архітектурою (як програмних, так і апаратних частин). Слід окремо виділити граничні та

проміжні вузли, оскільки їх енергоспоживання відрізняється через спосіб обробки даних (див рис. 4.2 – «вверх», «вниз»). Для трьохрівневої структури OTN енергоспоживання визначається:

$$P_{p.c.} = M_{bl}(2 P_{Edge} + N_{ef} P_O + K_{ef} P_E + P_{ROE} + P_{d_time}) + P_{transp}, \quad (4.1)$$

де $P_{p.c.}$ – загальне енергоспоживання мережі при передачі даних, P_{Edge} – споживання електроенергії на граничному вузлі, P_O і P_E – енергоспоживання проміжних вузлів без і з проміжним ОЕО перетворенням, відповідно, N_{ef} і K_{ef} – кількість вузлів без і з проміжним ОЕО перетворенням, M_{bl} – кількість блоків даних, P_{ROE} – витрата електроенергії на регенераційне обладнання.



Рис. 4.2. Трьохрівнева структура транспортної телекомунікаційної мережі

При визначенні $P_{p.c.}$ в (4.1) вперше враховуються параметри: P_{transp} – витрата електроенергії на відкриття наскрізних каналів, P_{d_time} – потужність, яка витрачається при роботі обладнання на холостому ході. Всі потужності представлені в Вт.

На рис. 4.2 зображено модель вузла, який представлений трьома рівнями: ядровий маршрутизатор, який виконує функції третього рівня;

обладнання транспортної технології, що виконує функції каналного рівня; DWDM обладнання, що виконує функції фізичного рівня. В роботах [90, 92, 290] описано середнє енергоспоживання обладнанням відповідних рівнів для даного вузла, яке представляється функцією:

$$f_{\text{ef}}(x) = P_{\text{node(Edge,O,E)}}(P_{\text{IP}}, P_{\text{Tr.l.}}, P_{\text{DWDM}}), \quad (4.2)$$

де P_{IP} – енергоспоживання електроенергії пристроями мережевого рівня, $P_{\text{Tr.l.}}$ – каналного рівня, P_{DWDM} – фізичного рівня.

Розроблена модель враховує параметри оптичного та електричного домену при різних конфігураціях мережі. Тут доменом виступає фізична частина мережі, яка представляється наявністю (електричний) чи відсутністю (оптичний) оптоелектронного перетворення. Враховуючи, що мережа є багат шаровою, енергоефективність можна визначати як сумарну витрату електроенергії кожного із рівнів, яка є узагальнюючою до визначення (4.1):

$$P_{\text{e.c.}} = P_{\text{S_IP}} + P_{\text{S_Tr.l.}} + P_{\text{S_DWDM}},$$

де $P_{\text{S_IP}}$ – сумарна витрата електроенергії пристроями мережевого рівня, $P_{\text{S_Tr.l.}}$ – каналного рівня, $P_{\text{S_DWDM}}$ – фізичного рівня. В роботі здійснюється розрахунок енергоспоживання згідно моделі, яка визначається за допомогою формули (4.1).

Підвищення точності вимірювання параметру енергоефективності дозволить оператору конфігурувати параметри мережі для підвищення її енергоефективності.

4.1.2.1. Розмір і кількість блоків даних

Для підвищення точності визначення даного параметру необхідно враховувати службові дані та заголовки. Тому в роботі прийнято, що визначення параметра енергоефективності здійснюється відносно довжини транспортного блоку (нВт/біт)

$$P_{\text{bit}} = \frac{P_{\text{p.c.}}}{L_{\text{block}}}, \quad (4.3)$$

де L_{block} – довжина блоку, що вимірюється кількістю біт.

В роботі для підвищення точності визначення параметру енергоефективності враховується службове навантаження каналного і мережевого рівня, тому обчислення даного параметру здійснюється відносно блоку даних каналного рівня.

4.1.2.2. Тип використаного обладнання

Енергоспоживання телекомунікаційних мереж визначає в основному виробник обладнання. Для електричних частин мережі витрати електроенергії для обробки одного блоку даних становлять [10]:

$$P_{\text{equip.el(IP, tr.l)}} = \frac{P_{\text{max}}}{N_{\text{max}}}, \quad (4.4)$$

де P_{max} – витрата електроенергії пристроєм при його максимальному завантаженні (Вт/с), N_{max} – кількість блоків даних, яку може обробити пристрій за 1 с.

Для лінійного терміналу PTN потужність, яка витрачається для обробки одного блоку даних, визначається:

$$P_{\text{op}} = P_{\text{equip.op}(t)} \cdot \frac{L_{\text{block}}}{V}, \quad (4.5)$$

де $P_{\text{equip.op}(t)}$ – витрата електроенергії пристроєм за одиницю часу, V – швидкість передачі в мереж (біт/с).

4.1.2.3. Наявність проміжних оптоелектронних перетворень

Для граничних вузлів енергетичне споживання визначається наступним чином:

$$P_{\text{Edge}} = P_{\text{IP}} + P_{\text{tr.l}} + P_{\text{DWDM}}. \quad (4.6)$$

Наявність чи відсутність ОЕО перетворення на DWDM рівні говорить про тип комутації, а також режим передачі даних. При здійсненні ОЕО перетворення на проміжних вузлах в більшості випадків сигнал «піднімається» на верхній рівень для її обробки, а потім – «опускається» вниз, де перетворюється назад в оптичний сигнал. Відповідно енергетичне споживання проміжного вузла з ОЕО перетворенням для обробки одного блоку даних становить:

$$P_E = P_{IP} + 2 \cdot P_{tr.l.} + 2 \cdot P_{DWDM}. \quad (4.7)$$

При відсутності проміжного ОЕО перетворення відкривається наскрізний канал. При відкритті наскрізного каналу на певний час резервуються часові і спектральні ресурси мережі. Для його відкриття відсилається певна кількість службових блоків даних ($N_{служ}$), для обробки яких витрачається P_{transp} потужності, що враховується у визначенні параметру енергоефективності (4.1). Відповідно витрачена енергія на вузлі без ОЕО перетворення буде становити:

$$P_O = P_{sw} + 2 \cdot P_{DWDM}, \quad (4.8)$$

$$P_{transp} = N_{служ} \cdot P_E, \quad (4.9)$$

де P_{sw} – витрачена енергія оптичного комутатора.

Енергетична ефективність оптичних комутаторів визначається:

$$P_{sw} = (P_s + P_{wc}) \cdot \frac{L_{block}}{V}, \quad (4.10)$$

де P_s – витрата електроенергії оптичним комутатором, P_{wc} – витрата електроенергії оптичним хвильовим конвертором при зміні довжини хвилі за одиницю часу, V – швидкість передачі. Очевидно, що зі збільшенням швидкості передачі витрати електроенергії оптичними пристроями будуть меншими.

Необхідно врахувати використання оптичних підсилювачів та 3R регенераторів, звідки визначаємо витрату електроенергії на один блок даних:

$$P_{ROE} = \frac{L_{block}}{V} \cdot (N_{opt.amp} \cdot P_{OA} + T_{3R} \cdot P_{3R}), \quad (4.11)$$

де $N_{opt.amp}$ – кількість використаних оптичних підсилювачів від пункту А до пункту Б, T_{3R} – кількість використаних 3R регенераторів від пункту А до пункту Б, P_{OA} – витрата електроенергії оптичним підсилювачем за одиницю часу, P_{3R} – витрата електроенергії електричним регенератором за одиницю часу.

4.1.3. Визначення енергоефективності мережі

Представимо приклад розрахунку енергоефективності телекомунікаційної мережі згідно розробленого математичного апарату, де використані вихідні параметри представлені в табл. 4.3 – 4.5.

Таблиця 4.3.

Параметри розрахунку енергоефективності телекомунікаційної мережі

<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>	<i>Параметр</i>	<i>Значення</i>
Кількість проміжних вузлів	3	Вид використовуваного обладнання	Cisco, Huawei, Mikrotik, EOspace, Fujitsu Flashwave, FINISAR, HiLink
Архітектура вузла	трьохрівнева	Кількість проміжних ОЕО перетворень, $K_{\text{эф}}$	0
Вид транспортної технології	OTN	Тип комутації	оптична
Розмір блоку даних, в бітах L_{block}	122368 (OTN); 8000 (IP)	Використання хвильових конверторів	немає
Швидкість передачі даних в Гбіт/с, V	10 (транспортна мережа)	Кількість оптичних підсилювачів, $N_{\text{opt.amp}}$	6
Кількість блоків даних, $M_{\text{бл}}$	100	Кількість регенераторів, T_{3R}	2

Відповідно до даної методики знаходимо витрати електроенергії на обробку одного блоку даних згідно формули (4.4), результати представлено

Таблиця 4.4.

Енергоспоживання телекомунікаційного обладнання
(електричний домен)

Обладнання (електричного домену)	Енергоспо- живання, Вт/год	N_{max} , кількість блоків/с	Марка моделі, виробник
Core router	60	$8 \cdot 10^6$ IP пакетів	Mikrotik Cloud Core Router 1036-12G-4S
Equipment of transport level (transponder)	50	163440 блоків (OTU)	Cisco ONS 15454 10-Gbps Multirate Enhanced Transponder

Таблиця 4.5.

Енергоспоживання телекомунікаційного обладнання
(оптичний домен)

Обладнання (оптичного домену)	Енергоспоживання, Вт/год	Марка моделі, виробник
Equipment of DWDM level	811 (на хвилю)	Fujitsu Flashwave
Оптичний комутатор	0,0094	EO space Electro
Optical EDFA amplifier	2.5	FINISAR single Channel Micro EDFA
3R regeneration	24	3R Regeneration technology XFP Module Optics

в табл. 4.6. Встановлено, що робочий блок даних - OTU контейнер розміром 15296 байт вміщує 15 IP пакетів із довжиною 1000 байт. Відповідно

$P_{ip}=15*P_{block}=31.25$ нВт, $P_{tr.l.}=0,84978$ Вт, де P_{block} витрата енергії на блок.

Таблиця 4.6.

Результати енергоефективності для електричного домену

Тип обладнання	P_{max} Вт/с	N_{max} , кількість блоків/с	P_{block} , нВт
Core router	0.016667	8000000 (IP пакетів)	2,08333
Transport level	0.013889	163440 (OTU фрейм)	0,84978

При визначенні витрат на електроенергію в оптичному домені будемо вважати, що режим передачі даних в даному випадку є прозорий – перед передачею даних необхідно відіслати блок даних, який на кожному вузлі зарезервує необхідні частотні і часові ресурси, що враховано у формулі (4.8). Швидкість передачі всередині мережі становить 10 Гбіт/с. Згідно умови кількість хвильових конверторів дорівнює 0, відповідно $P_{wc}=0$. Обчислення здійснюється за допомогою (4.8) – (4.11), а результати наведено в табл. 4.7. На основі (4.6) – (4.9) знаходимо, що $P_{Edge}=2.8729$ мкВт, $P_O=16,99$ мкВт, $P_{transp.}=1,026$ мкВт $P_{ROE}=0,21414$ мкВт. На основі (4.1)- (4.3) знаходимо $P_{p.c.}=113.683$ мкВт, $P_{bit}=9.289$ нВт.

Таблиця 4.7.

Результати енергоефективності для оптичного домену

Тип обладнання	P_{max} Вт/с	P_{block} , нВт
DWDM	0,225278	2756,68(P_{DWDM})
Optical switch	$2,61*10E-6$	0,0031951(P_{sw})
Електричні регенератори та оптичні підсилювачі	0,000694(O)+ +0,006667(3R)	214.144(P_{ROE})

Згідно моделі [90], також було визначено параметр енергоефективності транспортної мережі для аналогічних вихідних даних. В даному випадку параметр енергоефективності обчислюється відносно витрати електроенергії

обладнанням трьох рівнів для обробки одного біта інформації. Використані потужності: $P_{IP}=10$ нДж, $P_{tr.l.}=1$ нДж, $P_{DWDМ}=0.1$ нДж [92]. Враховуючи особливості обробки інформації на граничних і проміжних вузлах згідно (4.6) і (4.7), було обчислено параметр енергоефективності для моделі [90]: для блоку даних і одного біта інформації: $P_{p.c.}=105,2$ мкВт, $P_{bit}=8,6$ нВт, відповідно.

Модель, запропонована в [90], неточно оцінює параметр енергоефективності, оскільки не враховує особливості обладнання від різних виробників, типу комутації, швидкості передачі, вид транспортної технології і регенераційне обладнання.

4.1.4. Визначення параметру енергоефективності на прикладі електро- та акустооптичних пристроїв

На основі запропонованого математичного апарату розрахунку енергоефективності розроблено програмне забезпечення в середовищі LabVIEW [55]. Розроблений програмний продукт дозволяє оцінити використання електро- та АО пристроїв з точки зору енергоефективності. Програмне забезпечення дозволяє оцінити параметр енергоефективності, динамічно змінюючи параметри мережі заданої топології.

4.1.4.1. Вплив електрооптичного коефіцієнта на енергетичне споживання пристрою

Напруга, при якій фаза електромагнітної хвилі при виході з ЕОК змінюється на 180° , називається півхвильовою напругою, і визначається [291].

$$U_{\lambda/2} = \frac{\tilde{\lambda} \cdot d_a}{2 \cdot n^3 \cdot \gamma_{ij} \cdot L_a}, \quad (4.12)$$

де $\tilde{\lambda}$ - довжина хвилі, d_a - товщина зразка, n - показник заломлення, γ_{ij} - ЕО коефіцієнт, L_a - довжина кристала.

Як видно із формули (4.12), ЕО коефіцієнт обернено пропорційний прикладеній напрузі. Таким чином існує необхідність визначення максимального значення по модулю ЕО коефіцієнта. В [7] визначено

орієнтацію кристалу ніобату літію з екстремальними значеннями r_{ij} . Крім того, проведено розрахунок параметру півхвильової напруги для кристалу ніобату літію для ЕО коефіцієнтів [291] і для екстремальних значень вказівних поверхонь [7]. Вихідними даними для розрахунку є $d_a=13,4$ мм, $L_a=18,5$ мм. Показник заломлення n визначався на основі формули (1.11).

Згідно [291] при $r_{ij}=32,2 \cdot 10^{-12}$ м/В параметр півхвильової напруги $U_{\lambda/2}=634$ В. На основі [7], коли ЕО коефіцієнт може спостерігатися $r_{ij}=39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В, отримаємо значення $U_{\lambda/2}=510,9$ В, що на 12,1 % менше від попереднього значення.

4.1.4.2. Вплив акустичних параметрів на енергетичне споживання пристрою

Як зазначалось в 1.4.7, ефективність АО дифракції в режимі Брега визначається за допомогою χ , який знаходять із співвідношення (1.15), (1.18) або (1.24) і пов'язаний із P_a . З (1.24) випливає, що залежність χ від P_a з певним наближенням є лінійною. Акустичну потужність визначають [206]:

$$P_a = 6,4 \cdot b_a \cdot l_a \cdot Z_{зв} \cdot f_p^2 \cdot d_{ij}^2 \cdot Q_m^2 \cdot U^2, \quad (4.13)$$

де b_a і l_a - ширина і довжина звукового стовпа, $Z_{зв}$ - акустичний опір матеріалу звукопроводу, f_p - резонансна частота п'єзоперетворювача, d_{ij} - п'єзомодуль матеріалу п'єзоперетворювача, Q_m - механічна добротність п'єзоперетворювача, U - керуюча напруга.

З формул (1.24) і (4.13) легко бачити, що при більшому значенні параметру АО якості M_2 необхідна менша акустична потужність і, відповідно, менша керуюча напруга для досягнення необхідного коефіцієнта передачі пристрою. На основі формул (1.24) і (4.13) отримується значення керуючої напруги:

$$U = \frac{\tilde{\lambda}}{\pi \cdot f_p \cdot d_{ij} \cdot Q_m} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \eta \cdot H_{\Pi}}{M_2 \cdot L_a \cdot 6,4 \cdot b_a \cdot l_a \cdot Z_{зв}}}, \quad (4.14)$$

В роботі визначено параметр керуючої напруги кристалу ніобату літію на основі [163] і для екстремальних значень вказівних поверхонь [9]

коефіцієнта АО якості. Вихідні дані для розрахунку є $f_p=18,5$ МГц, $d_{ij}=17,1 \cdot 10^{-12}$ м²/В, $Q_m=200$, $\eta=85\%$, $H_{п}=1$ мм, $L_a=6$ мм, $b_a=11$ мм, $l_a=6$ мм, $Z_{зв}=29,1 \cdot 10^3$ кг/с. В роботі [163] при $M_2=7 \cdot 10^{-15}$ с³/кг визначено значення керуючої напруги для АО пристрою, яке становить $U=57,8$ В. В роботі [9] за допомогою вказівних поверхонь визначено орієнтацію зразка ніобату літію, коли коефіцієнт АО якості становить $M_2=15,9 \cdot 10^{-15}$ с³/кг, що дозволяє отримати значення керуючої напруги $U=38,35$ В, яке на 33,6% менше від попереднього значення.

За допомогою формул (4.12) і (4.14) було проведено моделювання для знаходження параметру енергоефективності. Для АО пристроїв параметр енергоефективності при $M_2=7 \cdot 10^{-15}$ с³/кг становить 88,5879 пВт/біт, а при $M_2=15,9 \cdot 10^{-15}$ с³/кг становить 87,8551 пВт/біт. З отриманих значень встановлено, що параметр M_2 , як і АО пристрій, на мережу в цілому суттєво не впливає.

Користуючись проведеними дослідженнями в п.3.4.1, визначено енергоефективності АО комутатора для коефіцієнта електромеханічного зв'язку – $\kappa_m = 0,62$ і $\kappa_m = 0,65$, отриманих при поперечній акустичній поляризації.

За основу використано формулу (1.25), і нехай при зміні коефіцієнта електромеханічного зв'язку κ_m (1.25) акустична потужність залишається постійною ($P_a = \text{const}$). Водночас розглянемо зміну електричної потужності, споживаної п'єзоелектриком від джерела P_v в залежності від коефіцієнта електромеханічного зв'язку κ_m , оскільки параметр P_v безпосередньо впливає на ефективність роботи п'єзоперетворювача. З (1.25) отримуємо, що при двох значеннях коефіцієнта електромеханічного зв'язку: 0,62 і 0,65, відношення між електричними потужностями P_v становить $P_{v1}=1,098 \cdot P_{v2}$, де P_{v1} при $\kappa_m=0,62$, а P_{v2} при $\kappa_m=0,65$. Звідси, очевидно, підтверджується, що збільшення коефіцієнта електромеханічного зв'язку зменшує необхідну кількість електроенергії для роботи п'єзоперетворювача.

На основі розробленої програмної моделі [12] для визначення

енергоефективності АО комутатора та вхідних даних (параметрів контролера, кристалу, генератора та п'єзоперетворювача) здійснюємо моделювання роботи АО комутатора при двох значеннях коефіцієнта електромеханічного зв'язку. Результати моделювання показують, що при переході від $\kappa_M = 0,62$ до знайденого значення $\kappa_M = 0,65$ відбувається зменшення енергетичного споживання АО комутатора на 5,17%.

4.2. Визначення параметру енергоефективності для маршрутизатора транспортної оптичної мережі

В [10] представлено енергоспоживання граничних і проміжних вузлів PTN. Кожен з даних вузлів залежить від енергоспоживання пристроїв, які працюють на третьому рівні OSI (Open Systems Interconnection Basic Reference Model - базова еталонна модель взаємодії відкритих систем) - маршрутизаторів. Енергоспоживання пристроїв електричного домену визначається за допомогою (4.4).

Для маршрутизатора параметр енергоспоживання P_{max} визначається як [292]:

$$P_{max}(v) = P_{Chas}(v) + \sum_{u=0}^{U_{Proc}} P_{Proc}(v_u) + \sum_{i=0}^{N_{LC}} P_{LC}(v_i), \quad (4.15)$$

де v визначає тип шасі, контролера, встановлених лінійних карт, конфігурації і профілю трафіку пристрою в залежності від швидкості передачі даних в компонентах маршрутизатора. Функція $P_{Chas}(v)$ визначає енергетичне споживання шасі, U_{proc} – кількість використовуваних контролерів, $P_{proc}(v_u)$ визначає енергетичне споживання певного типу контролера, N_{LC} – кількість використовуваних лінійних карт, $P_{LC}(v_i)$ визначає енергоспоживання всіх лінійних карт в базовій конфігурації (фізичних інтерфейсів, портових адаптерів, комутаційних фабрик і модулів управління). Суму P_{LC} можна представити у вигляді:

$$\sum_{i=0}^{N_{LC}} P_{LC}(v_i) = \sum_{j=0}^{J_{PLIM}} P_{PLIM}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{SW}} P_{SW}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{MSC}} P_{MSC}(v_j), \quad (4.16)$$

де $P_{PLIM}(v_j)$ – енергоспоживання інтерфейсних модулів і портових адаптерів PLIM (Physical Layer Interface Module), $P_{SW}(v_m)$ – енергоспоживання комутаційних фабрик SW (Switch Fabric), $P_{MSC}(v_k)$ – енергоспоживання модулів управління MSC (Modular Services Card).

Відповідно функцію, яка визначає енергоспоживання маршрутизатора, можна представити наступною формулою:

$$P_{max}(v) = P_{Chas}(v) + \sum_{u=0}^{U_{Proc}} P_{Proc}(v_u) + \sum_{j=0}^{J_{PLIM}} P_{PLIM}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{SW}} P_{SW}(v_j) + \sum_{j=0}^{J_{MSC}} P_{MSC}(v_j), \quad (4.17)$$

Збільшення швидкості передачі вимагає більш продуктивних і швидкодіючих елементів. При збільшенні швидкості передачі відбувається досить суттєве збільшення енергоспоживання контролера і лінійних карт маршрутизатора.

Шасі є найбільш енергоємним елементом таких маршрутизаторів. Воно може визначати до 80% їхнього енергоспоживання [292]. Енергоспоживання шасі визначається заповненням лінійними картами (наскільки заповнено шасі – повністю чи частково). Для прикладу шасі Cisco CRS-3 24-Slot Fabric-Card Chassis [293] при завантаженні лише на третину споживає 3,244 кВт, а при повному – 7,66 кВт. Підвищення швидкості передавання даних (використання лінійних карт з більш швидкісними інтерфейсами) не приведе до суттєвого підвищення енергоспоживання шасі. Це приведе до більш раціонального використання енергоресурсів таких маршрутизаторів.

Ключовим елементом в маршрутизаторі є центральний контролер (CPU-central processing unit). Для багатостійкових маршрутизаторів енергоспоживання контролерів близько 2% енергоспоживання стійки [294], проте в моноблочних маршрутизаторах це значення може досягати 45% [223]. Енергоспоживання мережових CPU визначається сумою енергоспоживання наступних елементів: арифметично-логічного пристрою (ALU- arithmetic and logic unit), тактового генератора, кешу і елементів

пам'яті. Енергоспоживання кожного елемента визначається наступною формулою [295]:

$$P_{elem_proc} = C_{em} \cdot U_{dd}^2 \cdot a_e \cdot f, \quad (4.18)$$

де C_{em} – агрегаційна ємність навантаження для кожного компонента, U_{dd} – робоча напруга, a_e – активність кожного елемента для кожного такту генератора ($0 \leq a_e \leq 1$), f – тактова частота контролера.

Збільшення швидкості передачі даних на інтерфейсах маршрутизатора ставить вищі вимоги до мережевого CPU. Це приводить до зростання параметру активності елементів ($a_e \rightarrow 1$) і до лінійного підвищення енергоспоживання CPU (4.18). Збільшення тактової частоти генератора також приводить до лінійного зростання енергетичного споживання контролера.

Енергоспоживання всіх лінійних карт в базовій конфігурації (фізичних інтерфейсів, портових адаптерів, комутаційних фабрик і модулів управління) визначається виробником обладнання. На рис. 4.3 представлено діаграми, які показують зміну енергоспоживання маршрутизаторів (з врахуванням їх максимального завантаження і комплектації) при переході від 40 до 100 Гбіт/с компаній Cisco [296] і Huawei [297].

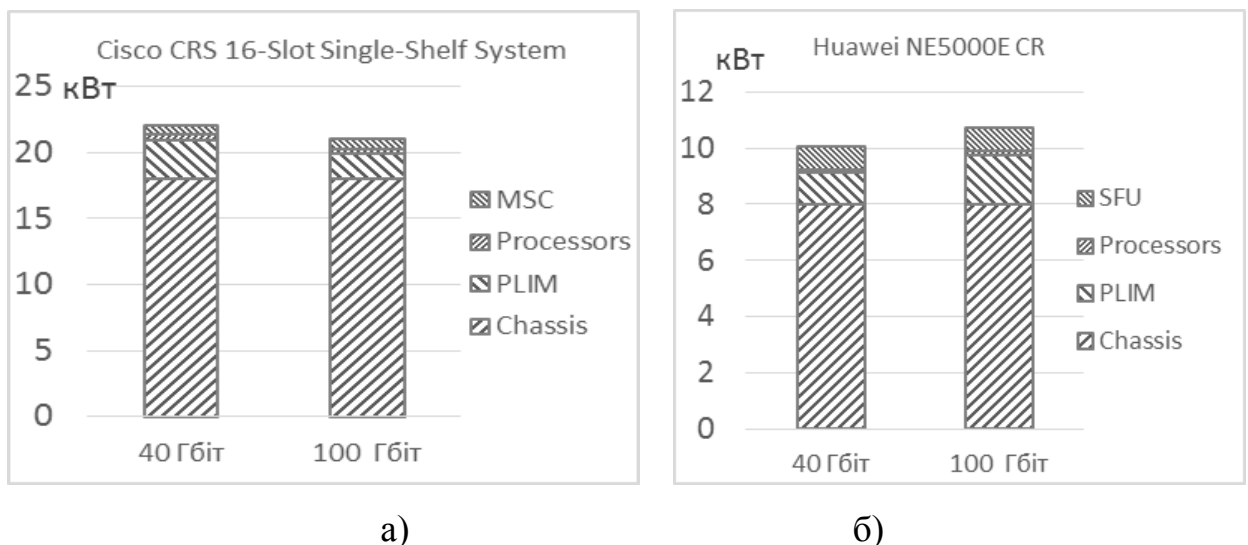


Рис. 4.3. Енергоспоживання ядрових маршрутизаторі компаній:

а) Cisco; б) Huawei

Для лінійних карт Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System значення

енергоспоживання зменшується при збільшенні швидкості передачі, для Huawei ситуація є протилежною. Збільшення швидкості передачі даних в будь-якому випадку приведе до збільшення енергоспоживання цілої системи маршрутизатора. Проте як показують діаграми (див рис. 4.3) параметр енергоефективності не зростає зі збільшенням швидкості передачі.

4.3. Визначення параметру енергоефективності для акустооптичного комутатора

Оптичні модулятори і комутатори визначають енергоспоживання пристроїв DWDM рівня. Розглянемо залежність енергоспоживання АО комутатора від швидкості передачі даних.

Енергетичне споживання запропонованої архітектури пристрою визначається за наступною формулою:

$$P_{switch}(v) = P_{proc}(v) + P_{genV}(v) + P_{wave}(v) + P_{cool}(v), \quad (4.19)$$

де $P_{proc}(v)$ – енергоспоживання контролера (4.18), $P_{genV}(v)$ – енергоспоживання генератора напруги, $P_{wave}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на хвильову конвертацію, $P_{cool}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на охолодження комутатора і визначається:

$$P_{cool}(v) = k_e \cdot (P_{proc}(v) + P_{genV}(v) + P_{wave}(v)), \quad (4.20)$$

В [290] зазначено, що при споживанні мережевим пристроєм 1 Вт електроенергії витрачається до 1 Вт електроенергії на його охолодження. Приймаємо параметр k_e в межах $0,5 \leq k_e \leq 1$, який визначає частку електроенергії, що припадає на охолодження від сумарного енергоспоживання комутатора.

Енергоспоживання генератора напруги $P_{genV}(v)$ визначається із загального означення потужності - добутку напруги і струму:

$$P_{genV}(v) = \int I \cdot U_{manag}(t) dt, \quad (4.21)$$

де значення керуючої напруги АО комутатора змінюється в діапазоні $0 < U_{manag} < U_{acous}$. Максимально допустима керуюча напруга генератора U_{acous}

необхідна для забезпечення режиму Брега і визначається (4.14).

4.3.1. Визначення параметру енергоефективності при зміні швидкості передачі даних

Визначено вплив зміни орієнтацій зразка АО комутатора на енергетичне споживання цього пристрою. Оцінка параметру енергоефективності здійснювалась за двома значеннями параметра акустичної якості M_2 : при прямому зрізі зразка $7 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ [163]; при оптимальній орієнтації зразка, визначеній за допомогою вказівної поверхні, $15,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ [9].

Вхідні дані представлені в табл.4.8. Результати моделювання показують, що збільшення швидкості передачі даних приводить до збільшення параметру активності елементів контролера ($a_e \rightarrow 1$) та енергетичного споживання комутатора.

Результати моделювання представлено в табл. 4.9. При $M_2=7 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ і при збільшенні швидкості передачі даних від 10 до 100 Гбіт/с енергоспоживання контролера збільшилось на 69,4%, системи охолодження – на 29,8%.

При використанні АО комірки з параметром $M_2=15,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ енергоспоживання контролера при збільшенні швидкості передачі до 100 Гбіт/с збільшилось на 71,2%, системи охолодження – на 36,9%. В обох випадках енергоспоживання генератора напруги майже не змінилось, а загальне енергоспоживання збільшилось на понад 130 Вт.

З рис. 4.4 (а, б) і табл. 4.9 спостерігаємо зменшення енергоспоживання АО комутатора майже на 20% при оптимальній орієнтації зразка з $M_2=15,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, коли швидкість передачі даних становить 100 Гбіт/с. Зменшення енергетичного споживання такого пристрою вдалось досягнути за рахунок того, що збільшення параметру акустичної якості M_2 приводить до зменшення керуючої напруги АО взаємодії. Крім того, зменшення керуючої напруги АО комірки збільшить експлуатаційний ресурс даного пристрою.

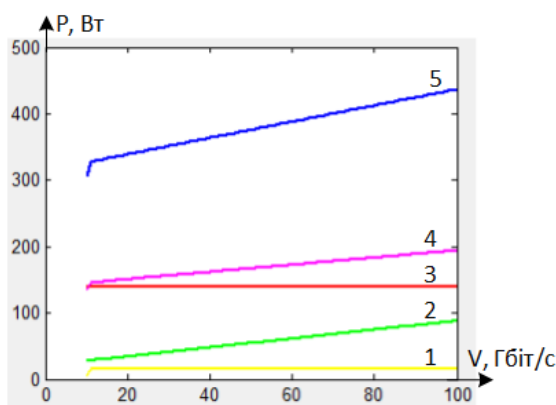
Таблиця 4.8.

Вхідні дані для моделювання

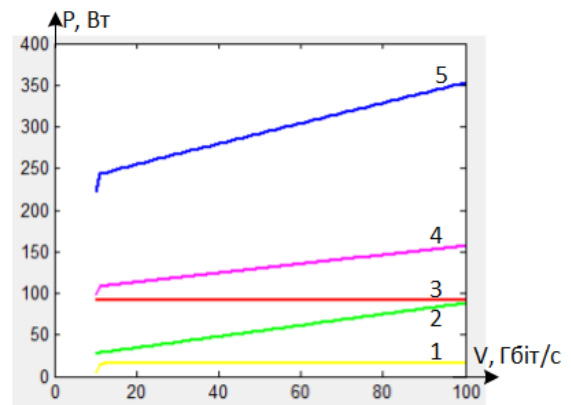
Параметр	Значення	Параметр	Значення
Контролер		Параметри кристалу і генератора	
Напруга, U	1,25 В	Акустичний опір матеріалу звукопроводу, Z_{sn}	29100 кг/с
Тактова частота, f	2,8 ГГц	Ширина акустичного стовпа, b_a	11 мм
СЄН (сукупна ємність навантаження) ALU, C_{ALU}	310 пФ	Довжина акустичного стовпа, l_a	6 мм
СЄН тактового генератора, C_{clk}	3330 пФ	Довжина акустичної взаємодії, L_a	6 мм
СЄН кешу C_C	957 пФ	Коефіцієнт передачі, η	85%
СЄН кешу і шин C_{mchl}	0,088 фФ	Параметр АО якості, M_2	$7 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$ $15,9 \cdot 10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$
Параметри п'єзоперетворювача			
Резонансна частота п'єзоперетворювача, f	18,5 МГц	Механічна добротність п'єзоперетворювача, Q_m	200
П'єзомодуль матеріалу п'єзоперетворювача, d_{ij}	17,1 м ² /В	Висота ультразвукового п'єзоперетворювача, H_p	1 мм
Параметри оптичного тракту			
Кількість волокон	4	Кількість оптичних хвиль в одному волокні	10

Результати моделювання (при зміні орієнтацій зразка комутатора)

Швидкість	Елементи модулятора	$M_2=7*10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$	$M_2=15,9*10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$
		Енергетичне споживання, Вт	
10 Гбіт/с	$P_{proc}(v)$	26,9	25,3
	$P_{genV}(v)$	138,6	89,2
	$P_{wave}(v)$	4,6	4,5
	$P_{cool}(v)$	136,1	98,7
	$P_{switch}(v)$	306,3	222,1
100 Гб/с	$P_{proc}(v)$	87,8	87,9
	$P_{genV}(v)$	140,5	91,9
	$P_{wave}(v)$	15,8	15,9
	$P_{cool}(v)$	193,9	156,6
	$P_{switch}(v)$	436,2	352,4



а)



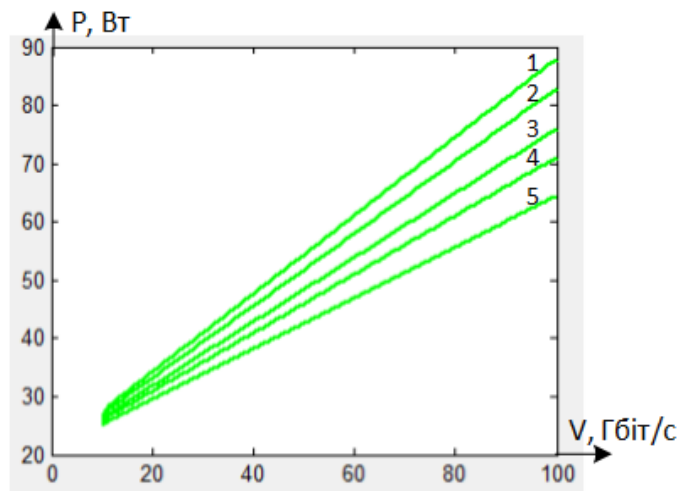
б)

Рис.4.4. Залежність енергоспоживання від швидкості для а) $M_2=7*10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$, б) $M_2=15,9*10^{-15} \text{ с}^3/\text{кг}$. 1 – хвильовий конвертор, 2 – контролер, 3 – генератор напруги АО комірки, 4 – охолодження, 5 – сумарне

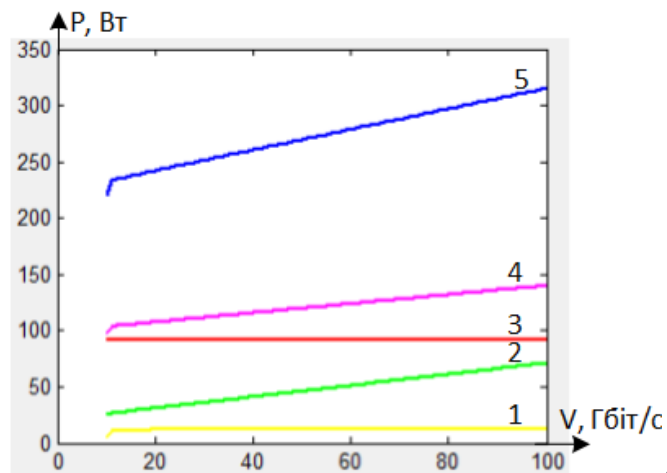
4.3.2. Параметр енергоефективності комутатора в залежності від кількості наскрізних каналів

В імітаційній моделі використано п'ять наборів наскрізних каналів

передачі. В результаті моделювання отримано, що при збільшенні кількості наскрізних каналів передачі від 0 до 15 відбувається зменшення енергетичного споживання контролера на 19% (рис. 4.5 (а) і табл. 4.10-4.11). Це пояснюється тим, що збільшення кількості наскрізних каналів приводить до зменшення кількості службових даних, яку обробляє контролер на один блок даних. При 15 каналах зменшилось енергетичне споживання комутатора на 10,7%. Крім того, зменшення енергетичного споживання контролера збільшить час роботи пристрою.



а)



б)

Рис.4.5. Залежність енергоспоживання від швидкості а) контролера АО комутатора, де 1 відповідає 0, 2 – 3, 3 – 7, 4 – 10, 5 – 15 наскрізних каналів передачі даних; б) всіх елементів комутатора: 1 – хвильових конверторів, 2 – контролера, 3 – генератора напруги АО комірки, 4 – охолодження, 5 – сумарне

Таблиця 4.10.

Результати моделювання, коли $M_2=15,9*10^{-15}$ с³/кг,
(при зміні кількості наскрізних каналів передачі даних)

Швидкість	Елементи модулятора	0 наскрізних каналів передачі	10 наскрізних каналів передачі
		Енергетичне споживання, Вт	
10 Гбіт/с	$P_{proc}(v)$	26,9	25,5
	$P_{switch}(v)$	222,4	220
100 Гб/с	$P_{proc}(v)$	87,9	71,1
	$P_{switch}(v)$	352,5	314,8

Таблиця 4.11.

Результати моделювання (при зміні кількості наскрізних каналів передачі даних – енергоспоживання виключно для контролера)

Кількість наскрізних каналів передачі	Енергетичне споживання контролера, Вт	
	швидкість 10 Гбіт/с	швидкість 100 Гбіт/с
0	26,9	87,8
3	26,5	82,7
7	25,9	75,9
10	25,5	71,0
15	24,9	64,4

При оптимальній орієнтації зразка з параметром акустичної якості $M_2=15,9*10^{-15}$ с³/кг і використанні 15 наскрізних каналів передачі даних вдалось досягнути сумарного зменшення енергетичного споживання комутатора на 27,8%.

4.3.3. Вплив кільцевої топології транспортної мережі на енергетичне споживання акустооптичного комутатора

Проведено дослідження АО комутаторів для топології мережі на

рис. 4.6. В досліджуваній топології кожна лінія зв'язку (оптичний тракт) включає 4 ООВ на прийом і передачу, кожне з яких містить 10 довжин хвиль. Відповідно всі вузли даної топології (рис. 4.6), які являються собою АО комутатори, містять в собі по 4 порти входу/виходу. Енергетичне споживання компонентів і пристрою вцілому визначається на основі АО комутатора (див. табл. 4.8) і описаного в п.6.1 та рис.6.1. Вузли на рис.4.6 є АО комутаторами і містять по 4 вхідних/вихідних порти, крім вузла 7, який містить 8 портів. Тому проведено моделювання для оцінки енергоефективності вузла 7 у порівнянні з іншими вузлами даної топології.

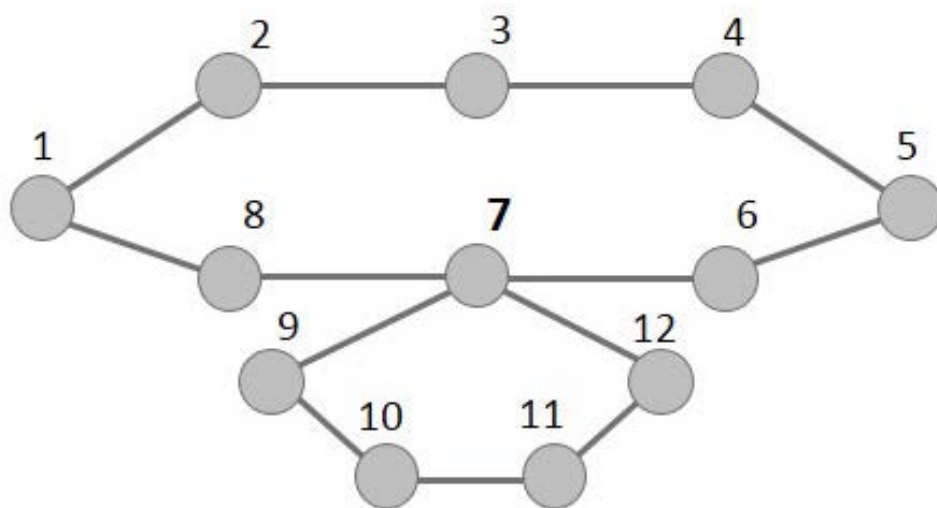


Рис.4.6. Приклад топології

В результаті моделювання отримано, що збільшення кількості вхідних/вихідних портів в два рази (з 4 до 8) привело до збільшення енергетичного споживання АО комутатора на 87,16 % (рис.4.7). Збільшення кількості портів приводить до зростання сумарного енергетичного споживання генераторів напруг АО комірок (див. табл.4.12) за рахунок збільшення кількості самих комірок. Енергетичне споживання однієї такої комірки становить менше 3 Вт [298].

Крім того, вузол 7, що на рис.4.6 (при його аварії зупиниться робота двох кілець) для надійної роботи і підтримки необхідної якості

обслуговування повинен мати повну доступність вихідних портів. Це досягається за допомогою оптичних хвильових конверторів. Слід зазначити, що економія на хвильових конверторах не є суттєвою з точки зору енергоспоживання (див. табл. 4.12). В імітаційній моделі було використано конвертори, які базуються на чотирьоххвильовому змішуванні, які споживають до 0,5 Вт електроенергії [299]. Хвильові конвертори несуттєво впливають на енергетичне споживання цілого пристрою, тому доцільно їх використовувати з точки зору енергоспоживання.

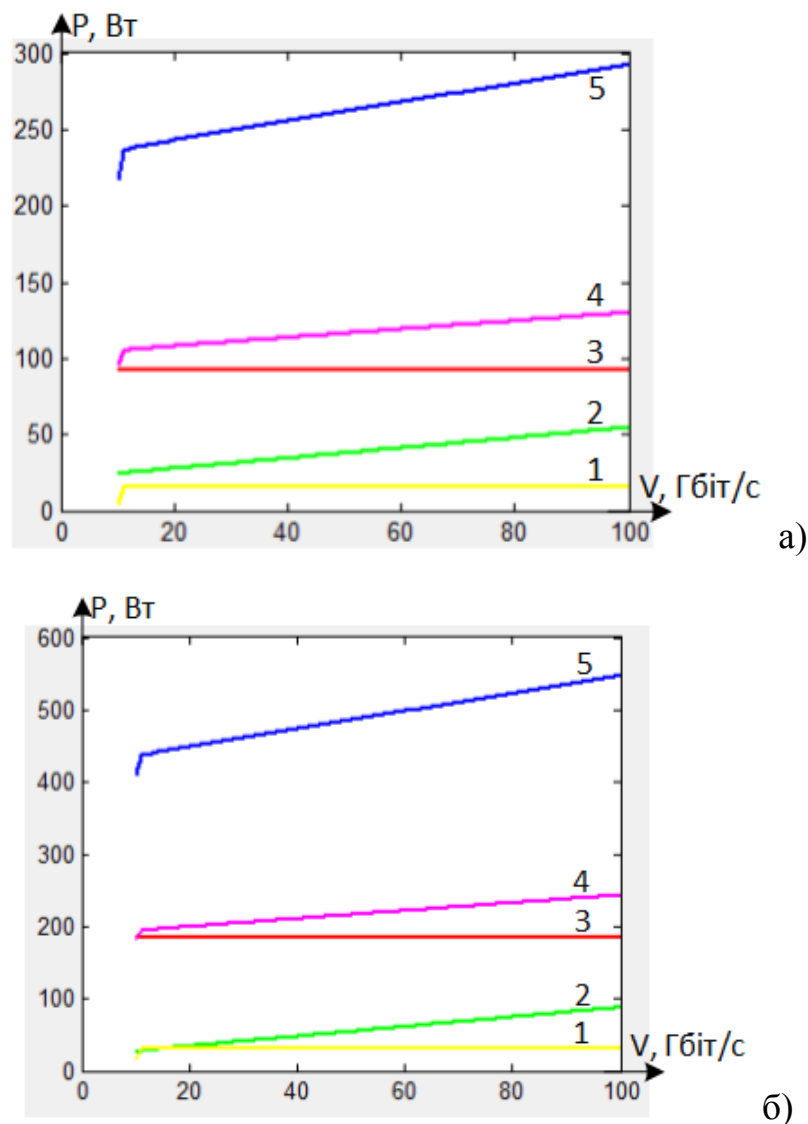


Рис. 4.7. Залежність енергоспоживання АО комутатора від швидкості передачі даних в мережі при а) 4 вхідних/вихідних портах; б) 8 вхідних/вихідних портах: 1 – хвильових конверторів, 2 – контролера, 3 – генератора напруги АО комірки, 4 – охолодження, 5 – сумарне

Результати моделювання АО комутатора, коли швидкість 100 Гбіт/с

Елемент комутатора	Енергетичне споживання, Вт	
	чотири	вісім
$P_{proc}(v)$	54,4	87,9
$P_{genV}(v)$	91,9	183,9
$P_{wave}(v)$	15,8	31,8
$P_{cool}(v)$	129,8	243,0
$P_{switch}(v)$	292,1	546,7

4.4. Визначення параметру енергоефективності для електрооптичного модулятора

Виходячи із структури ЕО модулятора (рис.1.17), енергоспоживання рівний

$$P_{mod}(v) = P_{proc}(v) + P_{genV}(v) + P_{cool}(v), \quad (4.21)$$

де $P_{proc}(v)$ – енергоспоживання контролера, яке визначається енергоспоживанням контролера (4.18), $P_{genV}(v)$ – енергоспоживання генератора напруги, $P_{cool}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на охолодження модулятора і визначається

$$P_{cool}(v) = k_e \cdot (P_{proc}(v) + P_{genV}(v)), \quad (4.22)$$

Відповідно енергоспоживання модулятора буде визначатись:

$$P_{mod}(V) = (k_e + 1) \times (P_{proc}(v) + P_{genV}(v)), \quad (4.23)$$

Миттєве енергоспоживання генератора $P_{genV}(v)$ рівне добутку миттєвих значень напруги і струму. Півхвильова напруга $U_{\lambda/2}$ рівна (4.12) і є максимальним значенням керуючої напруги $U_{manag}(t)$ для симетричної структури ЕО модулятора на основі інтерферометра Маха-Цендера (рис. 1.17). Загальне енергетичне споживання генератора напруги визначається наступною формулою:

$$P_{genV}(v) = \int I \cdot U_{manag}(t) dt, \quad (4.24)$$

де $0 < U_{\text{manag}} < U_{\lambda/2}$.

Енергоспоживання кожного елемента контролера визначається згідно (4.18).

Здійснено імітаційне моделювання загального енергоспоживання модулятора з вхідними даними табл. 4.13. Моделювання проведене для двох значень швидкості передачі (10 Гбіт/с і 100 Гбіт/с) і двох значень ЕО коефіцієнта: $r_{ij}=32.2 \cdot 10^{-12}$ м/В з [291]; $r_{ij}=39.7 \cdot 10^{-12}$ м/В з [8].

Таблиця 4.13.

Вхідні дані для моделювання

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Контролер		Параметри кристалу і генератора	
Напруга, U	1,25 В	Показник заломлення, n	2,2378
Тактова частота, f	2,8 ГГц	Довжина хвилі, $\tilde{\lambda}$	632,8 нм
СЄН ALU, C_{ALU}	310 пФ	ЕО коефіцієнт, r_{ij}	$32.2 \cdot 10^{-12}$ м/В $39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В
СЄН тактового генератора, C_{clk}	3330 пФ	Товщина зразка, d_a	13.4 мм
СЄН кешу C_C	957 пФ	Довжина зразка, L_a	18,5 мм
СЄН кешу і шин C_{mchl}	0,088 фФ	Значення струму генератора, I	20 мА

Результати моделювання в табл. 4.14 демонструють, що при збільшенні швидкості передачі даних від 10 до 100 Гбіт/с енергоспоживання контролера зросло на 71,4 %, енергоспоживання системи охолодження зросло на 21,1 %. Загальне енергоспоживання зросло на 32,4 Вт, тобто на 26 % (при $r_{ij}=32.2 \cdot 10^{-12}$ м/В). При використанні ЕОК з параметром $r_{ij}=39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В енергоспоживання контролера також збільшилось на 71,4 %. Загальне енергоспоживання зросло на 32,3 Вт, тобто у 2,4 рази.

Таблиця 4.14.

Енергетичне споживання елементів електрооптичного модулятора при різних швидкостях передачі

Швидкість	Елементи модулятора	$r_{ij}=32,2 \cdot 10^{-12}$ м/В	$r_{ij}=39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В
		Енергетичне споживання, Вт	
10 Гбіт/с	$P_{proc}(v)$	7,2	7,2
	$P_{genV}(v)$	6,3	5,1
	$P_{cool}(v)$	10,9	9,9
	$P_{modul}(v)$	24,5	22,3
100 Гб/с	$P_{proc}(v)$	25,2	25,2
	$P_{genV}(v)$	6,9	5,1
	$P_{cool}(v)$	25,3	24,3
	$P_{modul}(v)$	57,4	54,6

Як видно із графіків на рис. 4.8, збільшення швидкості передачі

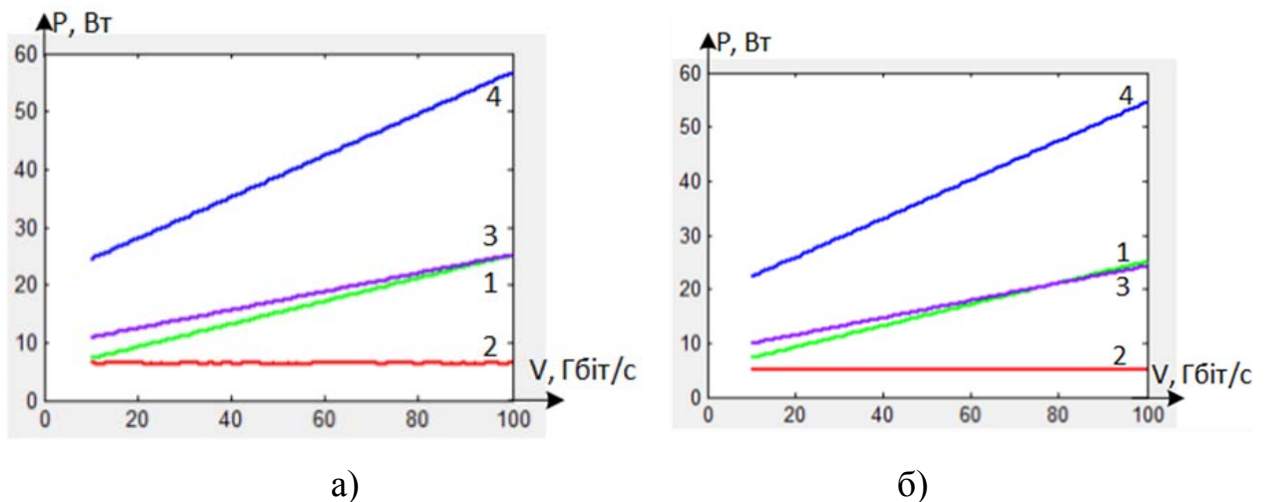


Рис.4.8. Енергоспоживання ЕО модулятора і його компонент в залежності від швидкості передачі даних при а) $r_{ij}=32,2 \cdot 10^{-12}$ м/В б) $r_{ij}=39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В (1 – контролер, 2 – генератор напруги ЕОК, 3 – охолодження, 4 – сумарне)

приводить до лінійного зростання енергетичного споживання ЕО

модулятора. Енергоспоживання контролера збільшується при підвищенні швидкості передачі даних за рахунок підвищення активності кожного елемента ($a_e \rightarrow 1$). Енергоспоживання генератора напруги практично не змінюється при зміні швидкості передачі.

На основі отриманих результатів представлених в табл. 4.14 можна визначити, що енергоспоживання ЕО модулятора зменшилось на 4,8% при використанні ЕОК із параметром $r_{ij}=39,7*10^{-12}$ м/В порівняно з випадком $r_{ij}=32,2*10^{-12}$ м/В, коли швидкість передачі даних становить 100 Гбіт/с.

4.5. Вплив типу модуляції на енергетичне споживання фотонних транспортних мереж

Для забезпечення високих швидкостей передачі використання типової ООК (on-off keying) модуляції є неефективним. При швидкості 100 Гбіт/с така модуляція характеризується низькою спектральною ефективністю 0,5 біт/с/Гц [300]. Схематична структура модулятора, який використовує ООК, представлена на рис.4.9(а).

Для забезпечення швидкості передачі 100 Гбіт/с переважно використовується РМ-QPSK модуляція [300-302], яка характеризується спектральною ефективністю порядку 2 біт/с/Гц. Схематична структура модулятора, який використовує РМ-QPSK модуляцію, представлена на рис.4.9(б).

Для швидкості 200 Гбіт/с, 400 Гбіт/с і вище використовуються аналогічні структури модуляторів (рис.4.9,б) із множенням кількості відповідних робочих частин пристрою [300]. Наприклад, для досягання швидкості передачі даних порядку 200Гбіт/с використовується РМ-QPSK модулятор, де швидкість передачі даних на модуляторах Маха-Цендера становить 50Гбіт/с. Тобто порівняно із швидкістю модуляції 100 Гбіт/с в РМ-QPSK на модуляторах Маха-Цендера відбувається перехід від 25 до 50Гбіт/с. Для забезпечення швидкості 400Гбіт/с використовується 16QAM (Polmultiplexing - 16 Quadrature Amplitude Modulation – поляризаційне

мультиплексування - 16 квадратурної амплітудної модуляції) модулятор, який побудований шляхом дублювання обладнання PM-QPSK модулятора із швидкістю передачі на модуляторах Маха-Цендера 50Гбіт/с.

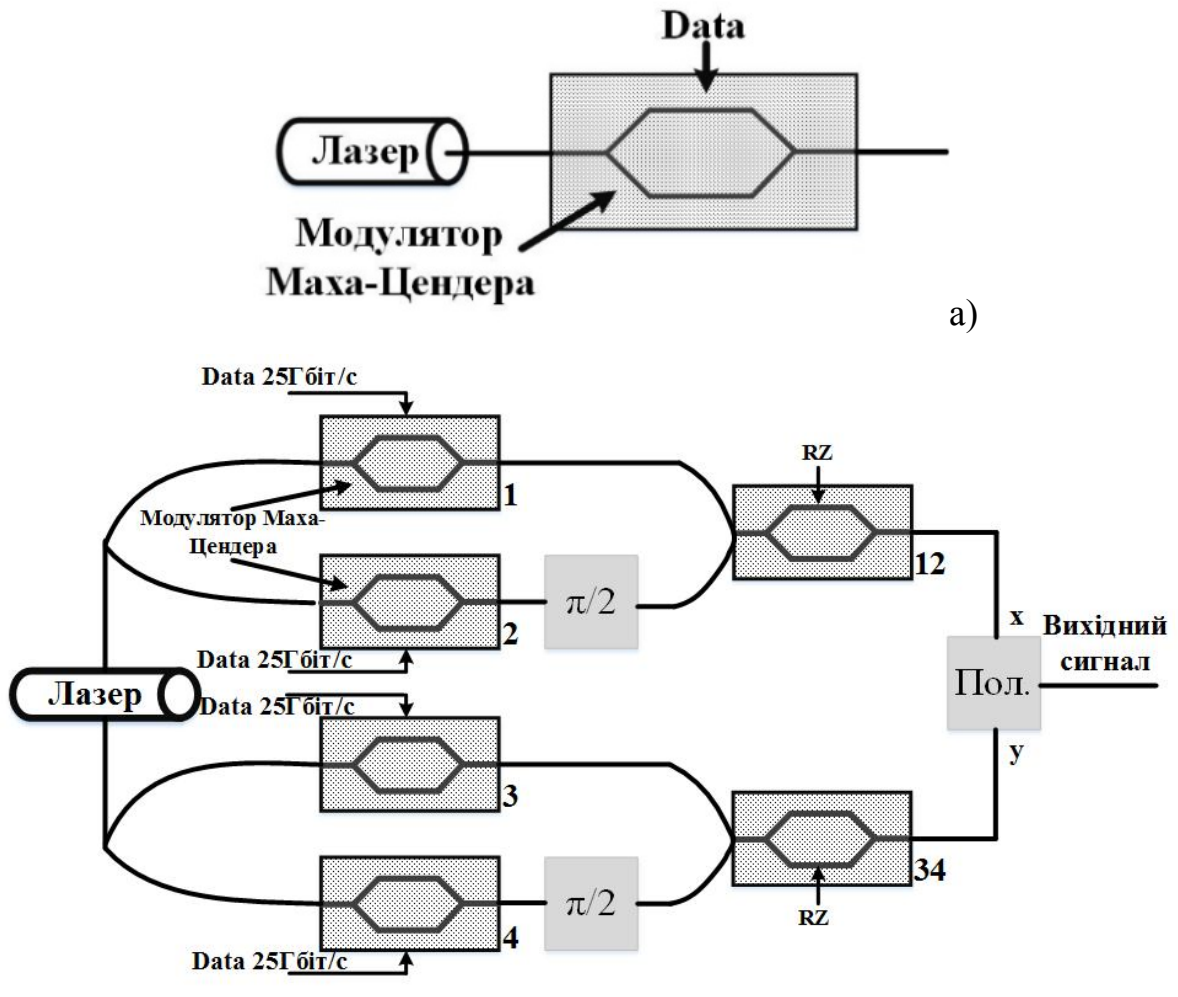


Рис. 4.9. Структура ОЕО компонент типового передавача:

а) OOK; б) PM-QPSK

Ключовими елементами в таких пристроях є інтерферометр Маха-Цендера (модулятор), контролер, генератор напруги ЕОК, суматори і фазообертачі.

Параметр енергоефективності ЕО модуляторів визначається за формулою (4.21) [303].

Для трьох структур ЕО модуляторів: OOK, PM-QPSK та PM-16QAM, проведено моделювання для визначення параметру енергоефективності.

Структура пристроїв для PM-16QAM модуляції аналогічна рис.4.9,б) із дублюванням відповідних модуляторів і фазообертачів.

Вхідні дані для моделювання представлені в табл. 4.15.

Таблиця 4.15.

Вхідні дані для моделювання

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Контролер		Параметри кристалу і генератора	
Напруга, U	1,25 В	Показник заломлення, n	2,2378
Тактова частота, f	2,8 ГГц	Довжина хвилі, $\tilde{\lambda}$	632,8 нм
СЄН ALU, C_{ALU}	310 пФ	ЕО коефіцієнт, r_{ij}	$39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В
СЄН тактового генератора, C_{clk}	3330 пФ	Товщина зразка, d_a	13.4 мм
СЄН кешу C_C	957 пФ	Довжина зразка, L_a	18,5 мм
СЄН кешу і шин C_{mchl}	0,088 фФ	Значення струму генератора, I	20 мА

Збільшення швидкості передачі даних приводить до збільшення енергетичного споживання мережевих пристроїв [12, 223], що і спостерігається для PM-16QAM модулятора (400 Гбіт/с, табл. 4.16). Однак енергоспоживання не залежить лінійно від швидкості передачі [12]. Встановлено, що при використанні PM-16QAM модулятора параметр енергоефективності зменшується на 0.77нВт (41,6%) по відношенню до PM-QPSK модулятора (див. табл.4.16, рис.4.10).

Але необхідно дослідити, чи вигреш енергоефективності перекриє втрати за рахунок зменшення часу експлуатації таких модуляторів.

Результати моделювання – енергетичне споживання модуляторів

Елементи модулятора	OOK (100 Гбіт/с)	PM-QPSK (100 Гбіт/с)	PM-16QAM, (400 Гбіт/с)
$P_{proc}(v)$	25.2 Вт	25.2 Вт	85.1 Вт
$P_{genV}(v)$	12.8 Вт	77.3 Вт	154.5 Вт
$P_{cool}(v)$	30.2 Вт	82.0 Вт	191.6 Вт
$P_{modul}(v)$	68.5 Вт	184.5 Вт	431.1 Вт
Параметр енергоефективності	0,685 нВт/біт	1,845 нВт/біт	1,078 нВт/біт

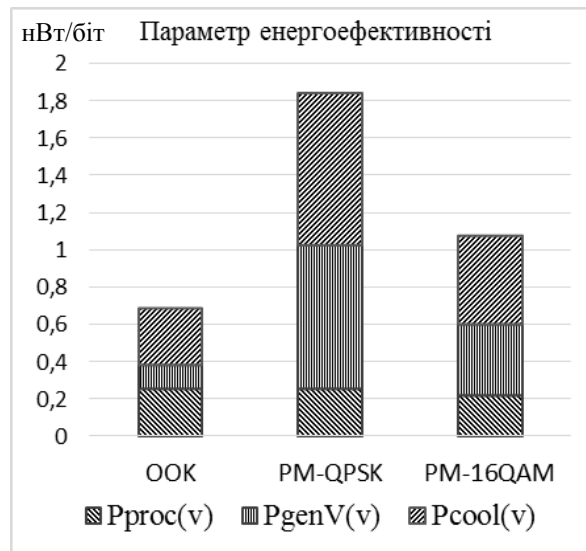


Рис. 4.10. Складові параметру енергоефективності для різних типів модуляції

4.5.1. Вплив ймовірності відмови пристроїв на енергоефективність мережі

Для оцінки терміну експлуатації мережевих пристроїв необхідно оцінити ймовірність відмови пристрою. Така ймовірність для OOK модулятора визначається:

$$P_{БР}(t) = P_{proc}(t) \cdot P_{ЕОС}(t) \cdot P_{gener}(t), \quad (4.25)$$

де $p_{БР}(t)$ – ймовірність відмови модулятора, $p_{proc}(t)$ – ймовірність відмови контролера модулятора, $p_{ЕОК}(t)$ – ймовірність відмови ЕОК, $p_{gener}(t)$ – ймовірність відмови керуючого генератора напруги.

Для PM-QPSK модулятора (рис.4.9(б)) ймовірність відмови визначається:

$$p_{БР}(t) = p_{proc}(t) \cdot (((p_1(t) \cdot p_{gener_1}(t) + p_2(t) \times p_{gener_2}(t)) \cdot p_{12}(t) \cdot p_{gener_12}(t)) + ((p_3(t) \cdot p_{gener_3} + p_4(t) \cdot p_{gener_4}) \cdot p_{34}(t) \cdot p_{gener_34})) \cdot p_{Пол}(t), \quad (4.26)$$

де $p_{proc}(t)$ – ймовірність відмови роботи контролера модулятора, $p_{proc}(t)$ – ймовірність відмови роботи поляризатора, $p_j(t)$ – ймовірність відмови відповідних ЕОК (див. рис. 4.9) $j=1,2,3\dots$, $p_{gener_i}(t)$ – ймовірність відмови керуючого генератора напруги.

Для PM-16QAM модулятора ймовірність безвідмовної роботи визначається:

$$p_{БР}(t) = p_{proc}(t) \cdot (((p_1(t) \cdot p_{gener_1} + p_2(t) \cdot p_{gener_2}) \times p_{12}(t) \cdot p_{gener_12}) + ((p_3(t) \cdot p_{gener_3} + p_4(t) \cdot p_{gener_4}) \times p_{34}(t) \cdot p_{gener_34}) + ((p_5(t) \cdot p_{gener_5} + p_6(t) \cdot p_{gener_6}) \times p_{56}(t) \cdot p_{gener_56}) + ((p_7(t) \cdot p_{gener_7} + p_8(t) \cdot p_{gener_8}) \times p_{78}(t) \cdot p_{gener_78})) \cdot p_{Пол}(t). \quad (4.27)$$

При використанні ООК і PM-QPSK модуляторів параметр активності компонентів контролера не зростає, оскільки вони працюють із однаковими вихідними швидкостями передачі (це встановлено при моделюванні параметру енергоефективності). Ймовірність відмови контролера для цих модуляторів не змінюється: $p_{proc_ООК}(t) = p_{proc_PM-QPSK}(t)$.

Час роботи генератора напруги ЕОК залежить від кількості перемикачів, зокрема зі збільшенням швидкості передачі даних збільшується ймовірність відмови його роботи $p_{gener_i}(t)$. Отже, в PM-QPSK модуляторах, генератори напруги, що працюють із швидкостями 25 і 50 Гбіт/с, мають кращі експлуатаційні характеристики, ніж в модуляторі ООК, де ЕОК працює із швидкістю 100 Гбіт/с.

Припустимо, що зміна частоти прикладання електричного поля не вплине на експлуатацію ЕОК, тому $P_{j_PM-16QAM}(t) = P_{j_PM-QPSK}(t)$. Енергетичне

споживання контролера у модуляторі PM-16QAM збільшується порівняно із PM-QPSK модуляторами. Це пов'язано із збільшенням параметру активності елементів контролера за рахунок переходу від 100 до 400 Гбіт/с, що приводить до нагрівання контролера і зменшення часу роботи пристрою. При підвищенні температури процесора на 10 градусів вище допустимого рівня його час роботи зменшується в два рази, а продуктивність зменшується на 1,5% [304]. Для забезпечення малої ймовірності відмови PM-16QAM модулятора треба використовувати контролери із високою тактовою частотою та малою ймовірністю відмови системи охолодження.

Збільшення швидкості передачі приводить до зменшення довжини регенераційної ділянки за рахунок впливу дисперсій та низки нелінійних ефектів. Отже, збільшення швидкості передачі даних при ускладненні модуляції приводить до зменшення довжини регенераційної ділянки [305]. Для PM-QPSK модуляції дальність передачі без використання регенераторів становить 3000 км, а для PM-32QAM модуляції – 350 км. Це приводить до частішого використання оптичних підсилювачів і 3R регенераторів, що в свою чергу приводить до збільшення ймовірності відмови оптичного лінійного тракту і підвищення енергетичного споживання. Тому доцільно оцінити параметр енергоефективності телекомунікаційних систем при різних модуляціях.

В роботі [306] запропоновано збільшити ємність ООВ шляхом збільшення кількості несучих довжин хвиль, що досягається об'єднанням С і L діапазонів ООВ і зменшенням міжканального інтервалу між оптичними несучими до 33 ГГц (0,3 нм). Це дозволяє отримати 250 хвиль по 100 Гбіт/с, кожна з використанням PM-QPSK модуляції і, відповідно, 25 Тбіт/с пропускної здатності оптичного тракту. Тому доцільно оцінити капітальні і експлуатаційні витрати при використанні PM-32QAM модуляції, яка може забезпечити пропускну здатність оптичного лінійного тракту 24 Тбіт/с.

Досліджувана структура телекомунікаційної системи представлена на рис.4.11. Для визначення параметру енергоефективності система побудована

на основі реального обладнання. Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System є маршрутизатором і формує (приймає) транспортні модулі технології OTN. Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform забезпечує необхідний тип модуляції оптичної несучої, дальність передачі без регенерації 3000 км при швидкості 100 Гбіт/с, а також здійснює спектральне ущільнення каналів. Детальне визначення параметру енергоефективності для кожного із елементів системи представлено в роботі [307].

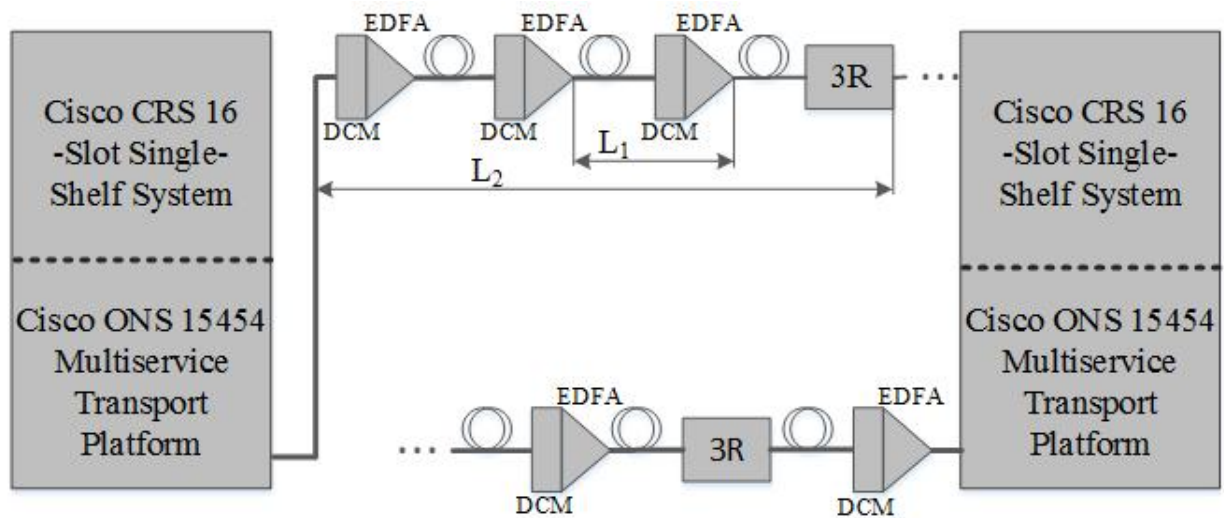


Рис. 4.11. Досліджувана структура телекомунікаційної системи передачі

Параметр енергоефективності для даної системи:

$$P_{total} = 2 \cdot N_F \cdot (k_1 \cdot P_{IP,link} + k_2 \cdot P_{DWDM}) + N_{opt.amp} \cdot P_{opt.amp} + N_{3R} \cdot N_\lambda \cdot P_{3R}, \quad (4.28)$$

де N_F – необхідна кількість кінцевого обладнання (Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System та Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform) для забезпечення необхідної пропускної здатності F_Σ ; k_1, k_2 – коефіцієнти продуктивності кожного обладнання (в даному випадку $k_1=1, k_2=0,666$ – [294, 308]); $P_{IP,link}, P_{DWDM}$ – енергетичне споживання обладнання, яке працює на мережевому, каналному і DWDM рівні; $N_{opt.amp}$ – кількість оптичних підсилювачів, яка визначається довжиною регенераційної ділянки L_1 (рис.4.10); $P_{opt.amp}$ – енергетичне споживання оптичних підсилювачів; N_{3R} – кількість електричних регенераторів, яка визначається дальністю

телекомунікаційних систем передачі L_2 (рис.4.11); N_λ – кількість електричних регенераторів, яка визначається кількістю довжин хвиль в оптичному лінійному тракті; P_{3R} – енергетичне споживання електричних регенераторів.

Для досліджуваної структури телекомунікаційної системи (рис.4.11), енергетичного споживання її елементів (див. табл. 4.17), співвідношення (4.28) різних видів модуляції (PM-QPSK, PM-32QAM) та запропонованого методу перегрупування оптичних каналів з міжканальною відстанню 33 ГГц, визначено параметр енергоефективності (табл. 4.18).

Таблиця 4.17.

Енергетичне споживання елементів досліджуваної телекомунікаційної системи передачі

Обладнання/елементи	Енергетичне споживання, Вт
Enhanced Chassis Cisco CRS 16-Slot	18 000 [309]
4-Port 100GE LAN/OTN interface module Cisco CRS 16-Slot	120 [309]
Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform (з використанням 100Gbps Coherent DWDM Trunk Card)	1500 [119]
AVARA EDFA	20 [310]
3R (на основі transponder Cisco ONS 15454)	120 [308]

При переході модуляторів, які забезпечують вищу пропускну здатність, довжина регенераційної ділянки зменшується [305], що приводить до збільшення енергетичного споживання за рахунок використання більшої кількості 3R регенераторів. Зокрема, при переході від PM-QPSK до PM-32QAM модуляції відбувається зростання параметру енергоспоживання на 25,2%. Необхідно врахувати, що збільшення кількості хвиль в ООВ також призводить до збільшення кількості 3R регенераторів.

Таблиця 4.18.

Результати обчислень при довжині тракту 9500км, коли $L_1 = 100$ км

Тип модуляції (міжканальний інтервал)	Кіль- кість хвиль	L_2 , км	P_{total} , кВт	F_{Σ} Тбіт/с	Параметр енергоефективності нВт/біт
PM-QPSK (50 ГГц)	64	3000	55,20	6,4	8,62
PM-32QAM (50 ГГц)	64	350	276,21	25,6	10,79
PM-QPSK (33 ГГц)	250	3000	238,17	25,0	9,30

Смуга роботи EDFA підсилувача тут розглядається в С і L діапазоні.

Перехід до міжканального інтервалу 33 ГГц при використанні PM-QPSK модуляції збільшує пропускну здатність до $F_{\Sigma}=25$ Тбіт/с, як і при PM-32QAM модуляції із 50 ГГц міжканальним інтервалом (0,4 нм). Ущільнення DWDM сітки хоч і збільшує енергетичне споживання DWDM обладнання і 3R регенераторів за рахунок збільшення кількості хвиль, але параметр енергоспоживання зменшується на 14% стосовно систем з PM-32QAM модуляцією. Запропоноване рішення є кращим, оскільки зменшує в 2,4 рази кількість 3R регенераторів. Крім того, при відмові одного оптичного порта PM-QPSK модулятора втрати в об'ємі інформації будуть в чотири рази менші, ніж при PM-32QAM модуляції (швидкість несучої в першому випадку 100 Гбіт/с, а в другому – 400 Гбіт/с). Ймовірність відмови запропонованого рішення зменшується за рахунок збільшення кількості використовуваних каналів та зменшення кількості обладнання.

4.5.2. Вплив часу безвідмовної роботи на енергоефективність мережі

Як було встановлено на початку п.4.5, використання PM-16QAM модулятора зменшує параметр енергоефективності на 42% по відношенню до PM-QPSK модулятора. Необхідно здійснити оцінку доцільності

покращення енергоспоживання внаслідок впливу його на ймовірність відмови пристрою [311]:

$$p_{БР} = \frac{k_{eq} \cdot P_{eq} \cdot C_{kWh}}{k_{eq} \cdot P_{eq} \cdot C_{kWh} + \frac{FR}{10^6} (MTTR \cdot P_{ers} \cdot C_m + C_{eq})}, \quad (4.29)$$

де k_{eq} – відсоток зменшення енергоспоживання пристрою, P_{eq} – енергетичне споживання пристрою в активному режимі, C_{kWh} – вартість електроенергії \$/кВт, FR – кількість відмов пристрою за 10^9 годин роботи, $MTTR$ – час відновлення роботи пристрою, P_{ers} – кількість працівників, необхідна для відновлення роботи пристрою, C_m – часова ставка працівника – в \$/год, C_{eq} – ціна елемента.

Перш за все необхідно визначити параметр FR для PM-16QAM модулятора. Ймовірне значення кількості відмов 100 гігабітної лінійної карти за 10^9 годин роботи становить 8600 [311]. Як було встановлено (див. п.4.5.1), меншу ймовірність відмови елемента модуляторів має керуюча напруга генератора. При переході від PM-QPSK до PM-16QAM вихідні потоки ЕОК зростають вдвічі, тому ймовірність відмови керуючого генератора також зростає вдвічі ($2 \cdot p_{gener_j}(t)$).

Використовуючи співвідношення (4.27), оцінимо вплив швидкості ЕОК на ймовірність відмови PM-16QAM модулятора. Вважаємо, що ймовірність відмови ЕОК і керуючих генераторів, які працюють із однаковими швидкостями, є однаковими: $p_1(t) = p_2(t) = \dots = p_j(t)$, $p_{12}(t) = p_{34}(t) = \dots = p_{ij}(t)$, $p_{gener_1}(t) = p_{gener_2}(t) = \dots = p_{gener_i}(t)$, $p_{gener_12}(t) = p_{gener_34}(t) = \dots = p_{gener_ij}(t)$. Відповідно ймовірність відмови PM-QPSK модулятора спрощується:

$$p_{БР1} = 4 \cdot p_{proc}(t) \cdot p_1(t) \cdot p_{gener_1}(t) \cdot p_{12}(t) \cdot p_{gener_12}(t) \cdot p_{пол}(t). \quad (4.30)$$

Для PM-16QAM модулятора ймовірності відмови керуючого генератора напруги рівна $2 \cdot p_{gener_j}(t)$. Тоді ймовірність відмови PM-16QAM модулятора становить:

$$p_{БР2} = 16 \cdot p_{proc}(t) \cdot p_1(t) \cdot p_{gener_1}(t) \cdot p_{12}(t) \cdot p_{gener_12}(t) \cdot p_{пол}(t). \quad (4.31)$$

Перехід до 400 Гбіт/с підвищить ймовірність відмови модулятора в чотири рази за рахунок керуючих генераторів напруги, відповідно для такого модулятора: $FR_{400} = 4 * FR_{100} = 4 * 8600 = 34400$. На основі даного параметру визначаємо на скільки можливо збільшити ймовірність відмови модулятора, щоб виграш, отриманий за рахунок енергоефективності, покрив ці втрати. Для обчислення використовуємо формулу (4.29) і вхідні дані для неї (див. табл. 4.19). Отримано, що допустиме збільшення ймовірності відмови пристрою за рахунок переходу від 100 до 400 Гбіт/с (перехід від використання PM-QPSK до PM-16QAM типів модуляторів) становить 63,1%.

Таблиця 4.19.

Вхідні дані для розрахунку допустимого зменшення часу роботи пристрою

Параметр	Значення	Параметр	Значення
$k_{eq}, \%$	42	MTTR, год	2
P_{eq}, Bm	431	$P_{er}, ocib$	1
$C_{kWh}, \$/kBm$	0.039	$C_m, \$$	10
FR	34400	$C_{eq}, \$$	100

4.6. Енергоефективність мережі при використанні фотоннокристалічних волокон

Розглянуті в п.1.5.1 ФКВ можуть бути широко використані в оптичних підсилювачах EDFA, легованих ербієм [303]. На сьогоднішній день провідні компанії по виготовленню EDFA підсилювачів: Agiltron Inc, Alfa Photonic SAS, Fiberinthebox, Finisar, AVARA Technologies, Fiber Store, забезпечують підсилення оптичних несучих від 23 до 35 дБп. ФКВ, леговані ербієм, підсилюють оптичні несучі до 54,8 дБп [312] при $d/\Lambda=0,33$ і зберігають одномодовий і лінійний режими роботи. Отже, доцільно оцінити параметр енергоефективності оптичного лінійного тракту при підсиленні оптичних несучих на 54,8 і 35 дБп при PM-QPSK модуляції.

При використанні ФКВ у EDFA підсилювачах вдається зменшити енергетичне споживання оптичного лінійного тракту на 5,2% відносно

звичайних EDFA підсилювачів. Ймовірність відмови тракту зменшиться в 1,58 рази за рахунок зменшення кількості EDFA підсилювачів (табл. 4.20). При використанні телекомунікаційної системи передачі із міжканальним інтервалом 33 ГГц вдається досягти зменшення енергетичного споживання оптичного тракту з використанням ФКВ EDFA на 9,5% по відношенню до звичайних підсилювачів за рахунок збільшення доступного підсилення EDFA ФКВ підсилювачів на 57%. (табл. 4.20).

Таблиця 4.20.

Результати обчислення при довжині тракту 9500 км і $L_2 = 3000$ км

Тип підсилювача	Тип модуляції	Кількість хвиль	L_1 , км	P_{total} , кВт	F_{Σ} Тбіт/с	Параметр енерго-ефективності, нВт/біт
Типовий EDFA	PM-QPSK (50 ГГц)	64	100	13,36	6,4	2.09
EDFA із ФКВ		64	156,5	12,68		1.98
EDFA із ФКВ	PM-QPSK (33 ГГц)	250	156,5	47,32	25	1,89

Запропонована структура системи (див. рис. 4.12) дещо відрізняється від попередньої на рис.4.11. Перш за все пропонується використовувати DWDM 250-ти канальну сітку для забезпечення пропускну здатності тракту 25 Тбіт/с. Швидкість передачі кожної несучої становить 100 Гбіт/с за рахунок PM-QPSK модуляції. Оскільки ФКВ характеризуються великою ефективною площею, їх пропонується використовувати для стикування потужних лазерів. Для зменшення енергетичного споживання такої системи і зменшення ймовірності відмови її пропонується використовувати підсилювачі EDFA з компенсаторами дисперсії DCM (Dispersion Compensation Module) на основі ФКВ.

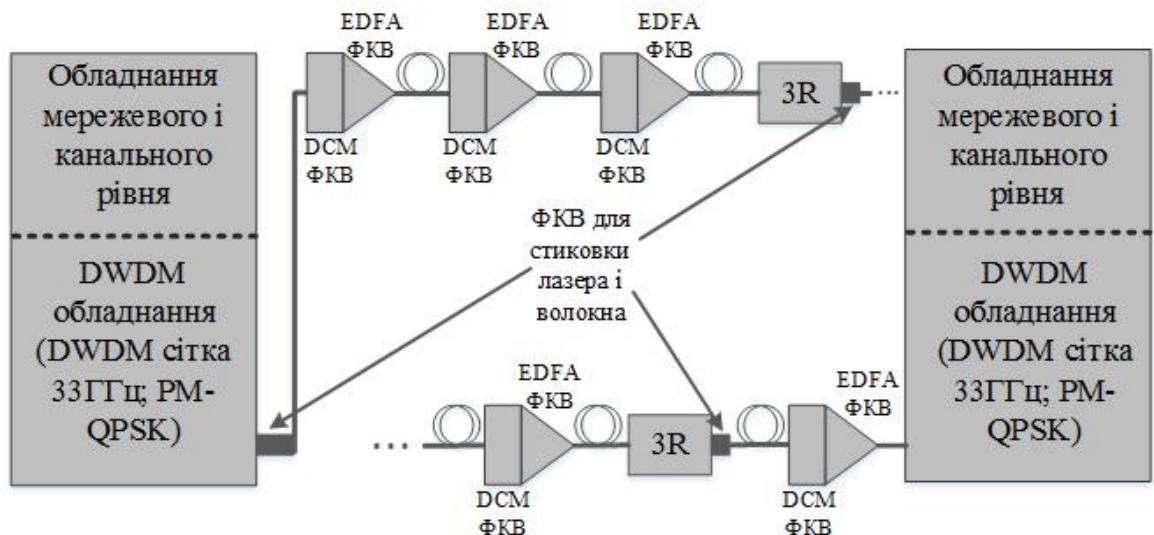


Рис. 4.12. Запропонована структура телекомунікаційної системи передачі

4.7. Дослідження енергоефективності транспортних оптичних мереж на основі технологій GMPLS

4.7.1. Оцінка енергоефективності GMPLS мережі на основі технології об'єднання міток

PTN постійно нарощують кількість OOB і збільшують кількість хвиль, тому треба раціональніше використовувати оптичні ресурси мережі. Крім того, GMPLS Bidirectional LSP, що забезпечує створення резервного LSP для забезпечення меншої ймовірності відмови системи, накладає додаткові умови для вільних оптичних ресурсів мережі. Тому використовується GMPLS Link Bundling – об'єднання кількох LSP в одну. Даний механізм виник для збільшення ефективності використання оптичних ресурсів. Наприклад, недоцільно передавати потік із швидкістю 100 Мбіт/с, використовуючи при цьому оптичний канал 10 Гбіт/с. Це зменшує експлуатаційні витрати при передачі блоку даних за рахунок: зменшення кількості службових даних; звільнення оптичних несучих, які використовуються неефективно; зменшення кількості елементів вузлів (лінійні карти, регенератори та інш).

Опис вимог для об'єднання LSP представлено в [117, 119]:

- всі LSP починаються і завершуються у спільних вузлах;

- LSP повинні мати однаковий тип передачі – point to point or multicast;
- всі LSP повинні мати однакову метрику трафіку (смугу пропускання та інш.);
- всі LSP повинні мати однакову комутаційну ємність – PSC (Packet-switch capable- комутація пакетів), TDMC (Time Division Multiplexing Capable – мультиплексування з розділенням по часу), LSC (Lambda Switch Capable – комутація оптичних хвиль), FSL (Fiber-Switch Capable- комутація волокон).

В роботі показано вплив використання Link Bundling GMPLS на енергетичне споживання транспортної мережі.

Топологія досліджуваної мережі (рис.4.13) представлена у вигляді складних кілець. Кожен вузол мережі побудований за трьохрівневою архітектурою (див. рис. 4.14) з обладнанням мережевого, каналного та DWDM рівня. Вважаємо, що між вузлами знаходяться три оптичні підсилювачі EDFA. Мережа побудована таким чином, що довжина оптичного тракту між кожними вузлами є однаковою. Електрична регенерація 3R здійснюється виключно у проміжних вузлах (транспондерах). 3R регенерація відбувається через кожні два вузли шляху LSP. Для точнішого визначення параметру енергоефективності в PTN імітаційній моделі використані параметри на основі реального обладнання, що представлено в табл. 4.21. В якості транспортної технології в моделі використано OTN.

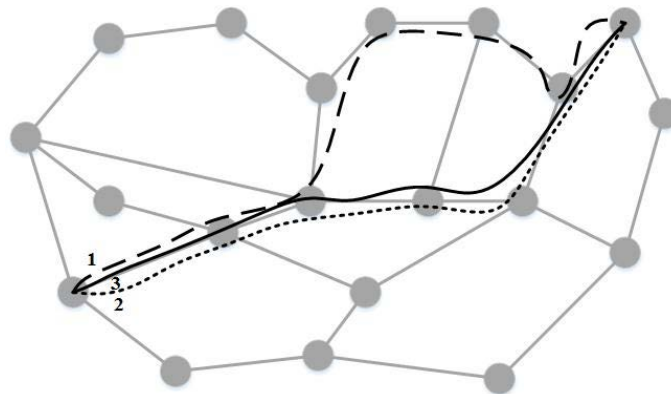


Рис. 4.13. Топологія досліджуваної мережі

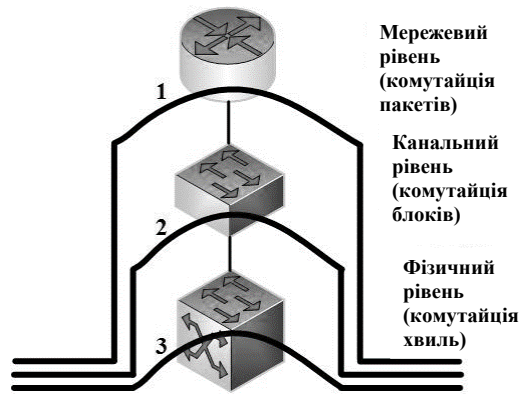


Рис. 4.14. Рівні передавання (комутації) трафіку

Для визначення параметру енергоефективності трьох LSP, показаних на рис. 4.13, використано формулу, отриману в [33, 55, 73]:

$$\begin{aligned}
 P_{\text{DWDM,bit}} &= (P_{t.\text{end}} + P_{t.\text{opt.amp}} + P_{t.3R} + P_{t.\text{int}}) / F_{\lambda} = \\
 &= (2 k_1 P_{IP, \text{link}} + k_2 P_{\text{DWDM}}) + (N_{\text{opt.amp}} - 1) P_{\text{opt.amp}} + \\
 &+ N_{3R} (P_{3R} + 2 P_{\text{OADM}}) N_{3R} P_{t.3R} + N_{\text{int}} (P_{\text{OXC}} + 2 P_{\text{opt.amp}}) / F_{\lambda}, \quad (4.32)
 \end{aligned}$$

де $P_{t.\text{end}}$ – сумарне енергетичне споживання кінцевого обладнання; $P_{t.\text{opt.amp}}$ – сумарне енергетичне споживання оптичних підсилювачів; $P_{t.3R}$ – сумарне енергетичне споживання кінцевого обладнання; $P_{t.\text{int}}$ – енергетичне споживання проміжного обладнання (проведення процесу комутації на проміжних вузлах); k_1, k_2 – коефіцієнти використання продуктивності системи кожного із обладнання (в даному випадку Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System та Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform $k_1=1, k_2=0,666$); $P_{IP, \text{link}}, P_{\text{DWDM}}$ – енергетичне споживання обладнання, яке працює на мережевому, каналному і DWDM рівні; $N_{\text{opt.amp}}$ – кількість оптичних підсилювачів, яка визначається довжиною регенераційної ділянки L_1 ; $P_{\text{opt.amp}}$ – енергетичне споживання оптичних підсилювачів; N_{3R} – кількість електричних регенераторів, яка визначається дальністю телекомунікаційних систем передачі L_2 ; P_{3R} – енергетичне споживання електричних регенераторів; P_{OADM} – енергетичне споживання OADM мультиплектора; N_{int} – кількість проміжних вузлів; P_{OXC} – енергетичне споживання OXC (Optical Cross Connect – оптичні кросс-коммутатори); F_{λ} – швидкість передачі

однієї оптичної несучої.

За допомогою (4.32) і табл. 4.21 досліджено параметр енергоефективності для 1,2,3 LSP згідно рис.4.13. Комутація здійснюється на DWDM рівні з використанням GMPLS міток (Generalized Label). Відповідно для 1 LSP параметр енергоефективності становить 5,275 пВт/біт, 2 LSP – 4,623 пВт/біт, 3 LSP – 2,344 пВт/біт. Отже, 1 LSP та 2 LSP характеризуються сумарною енергоефективністю 9,898 пВт/біт. Водночас агрегований потік для 3 LSP витрачає в 4,22 рази менше електроенергії при передачі 90 Гбіт, ніж два окремих LSP, що передають 40 і 50 Гбіт відповідно.

Таблиця 4.21.

Енергетичне споживання елементів досліджуваної мережі, коли кількість каналів 64

Обладнання/елементи	Енергетичне споживання, Вт	Енергетичне споживання на одну хвилю Вт
Enhanced Chassis Cisco CRS 16-Slot	18 000 [309]	281,25
4-Port 100GE LAN/OTN interface module Cisco CRS 16-Slot	120 [313]	30
Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform (з використанням 100Gbps Coherent DWDM Trunk Card)	1500 [308]	23,44
Шасі Cisco ONS 15454 MSTP	800 [308]	12,5
AVARA EDFA	20 [310]	0,31
3R (на основі transponder Cisco ONS 15454)	120 [308]	60
OXC (Acoustic switching)	445 [12]	6,95
OADM (на сонові Single-Module OADM Cisco ONS)	100 [314]	1,56

Проведено моделювання для визначення впливу кількості вузлів шляху LSP на параметр енергоефективності. Розрахунки проводилися за допомогою (4.32) і вхідних даних для моделі (див. табл. 4.21 - 4.22). Моделювання здійснювалось на основі розробленої нами імітаційної моделі [55, 308]. В [55] імітаційна модель PTN відтворює трьохрівневу архітектуру досліджуваної мережі (рис. 4.14), а також процес передавання певного об'єму даних між двома кінцевими вузлами. За допомогою даної моделі визначається кількість електроенергії, що необхідна кожному пристрою.

Таблиця 4.22.

Параметри телекомунікаційної системи передачі

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Швидкість передачі однієї оптичної несучої, Гбіт/с	100	Швидкість передачі LSP 1	40
Кількість оптичних підсилювачів між вузлами	3	Швидкість передачі LSP 2	50
Дальність безрегенераційної передачі, кількість вузлів	2	Швидкість передачі LSP 3	90

В результаті моделювання встановлено, що при збільшенні кількості вузлів LSP шляху від 4 до 40 параметр енергоефективності зростає в 2,52 рази (табл. 4.23, рис.4.15).

Таблиця 4.23.

Параметр енергоефективності на основі технології LSP для різних випадків

LSP N_{LSP}	Параметр енергоефективності, пВт/біт	
	$N_{int} = 4$	$N_{int} = 40$
LSP1 + LSP 2 (50% + 50%)	7.5396	19.0535
LSP1 + LSP 2 (10% + 90%)	20.9433	52.9264
LSP3 (100%)	1.8849	4.7634

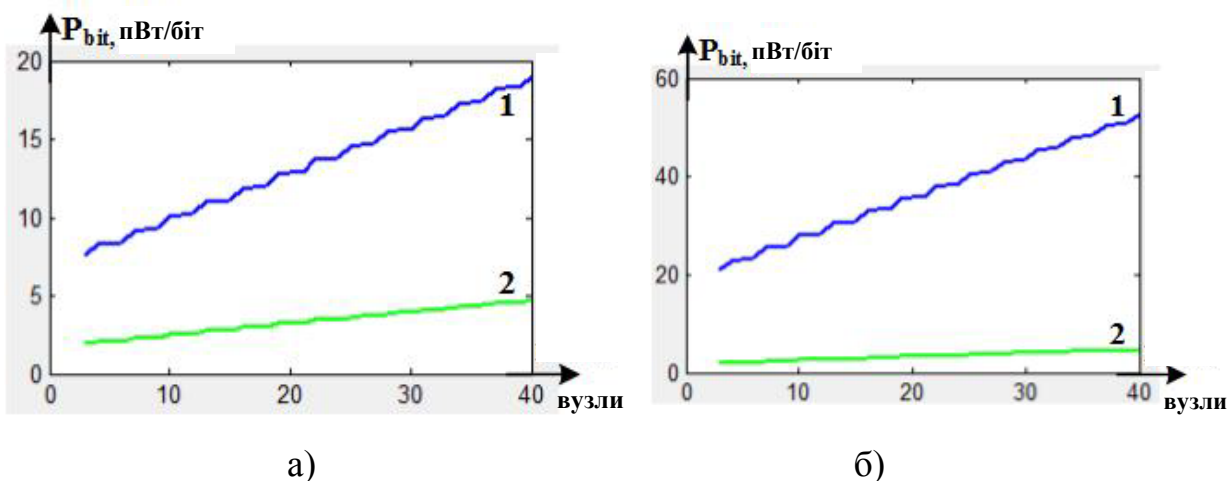


Рис. 4.15. Залежність параметру енергоефективності від кількості вузлів LSP (1 – LSP1+LSP2; 2 – агрегований потік з LSP1 і LSP2) при завантаженні
 а) LSP1=50%, LSP2=50%; б) LSP1=10%, LSP2=90%

На рис.4.16 представлено залежність параметру енергоефективності від відсотку завантаження каналів. При завантаженні каналу вище 45% параметр енергоефективності змінюється в малому діапазоні від 10 пВт/біт до 4,7634 пВт, тобто доцільно і необхідно здійснювати агрегацію навантаження, якщо навантаження каналу становить менше 45% (якщо це не суперечить накладеним умовам протоколу RSVP-TE і механізму GMPLS Link Bundling).

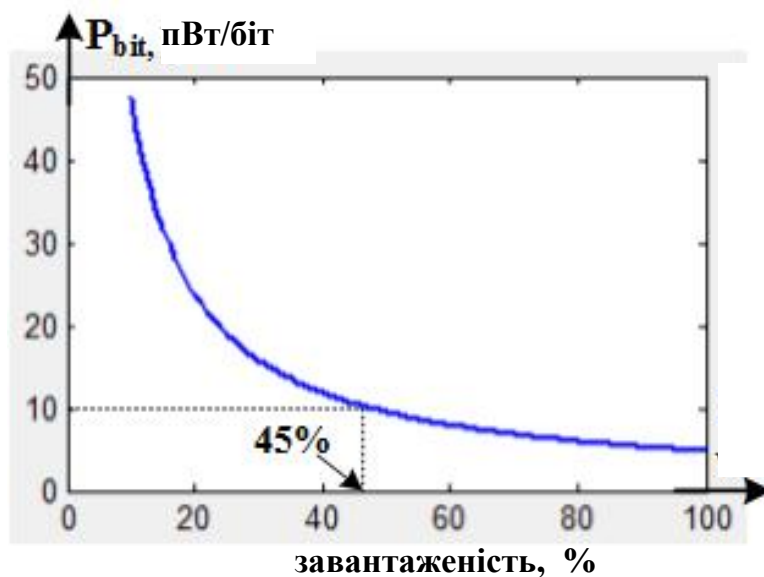


Рис. 4.16. Залежність параметру енергоефективності від відсотку завантаженості оптичної несучої

4.7.2. Визначення енергоефективності з використанням технології комутації різних об'єктів

В моделі процес обробки інформації на проміжних вузлах може здійснюватися з врахуванням Generalized Label GMPLS. Для здійснення повністю оптичної комутації в [12] розроблено імітаційну модель з використанням АО комутатора. Це дозволило відтворити процес оптичної комутації на основі Generalized Label GMPLS в загальній імітаційній моделі PTN.

Використання Generalized Label дозволяє здійснювати комутацію часових блоків, хвиль і ООВ. Здійснено оцінку параметру енергоефективності при комутації часових блоків і комутації хвиль у порівнянні із MPLS комутацією (комутацією пакетів). Доцільність (механізму Generalized Label) впливає з того, що перенесення комутації на нижні рівні (комутації часових блоків, хвиль, волокон) призводить до зменшення енергетичного споживання транспортної мережі. Чим нижче рівень, де здійснюється комутація, тим менше витрачається електроенергії на обробку біта даних на проміжних вузлах [223]. В даній імітаційній моделі визначено параметр енергоефективності при зміні кількості вузлів LSP. Вхідні дані для моделювання використані з табл. 4.21 - 4.22.

Для визначення параметру енергоефективності при здійсненні комутації часових блоків використовуємо наступну формулу:

$$P_{DWD\text{M},\text{bit}} = (2(k_1 P_{IP, \text{link}} + k_2 P_{DWD\text{M}}) + (N_{\text{int}} - 1) P_{\text{opt.amp}} + (N_{\text{int}} - 2)(2(P_{OADM} + P_{\text{opt.amp}}) + P_{\text{transponder}})) / F_\lambda, \quad (4.33)$$

де $P_{\text{transponder}}$ – енергетичне споживання транспондера, N_{int} – кількість проміжних вузлів, k_1 і k_2 – коефіцієнт використання обладнання. В (4.33) враховується оцінка параметру енергоефективності при комутації на рівні DWDM обладнання (використання ОХС).

В імітаційній моделі для визначення параметру енергоефективності при здійсненні комутації IP пакетів (MPLS) використано наступну формулу:

$$P_{MPLS,bit} = (2 \cdot (k_1 \cdot P_{IP,link} + k_2 \cdot P_{DWDM}) + (N_{int} - 1) \cdot P_{opt.amp} + (N_{int} - 2) \cdot (2 \cdot (P_{ROADM} + P_{opt.amp} + P_{transponder}) + P_{IP,link})) / F_\lambda, \quad (4.34)$$

де $P_{transponder}$ – енергетичне споживання транспондера [308].

Результати моделювання за допомогою співвідношень (4.32)-(4.34) представлено в табл. 4.24. Бачимо, що комутація на DWDM рівні (комутація хвиль) є енергоефективніша, ніж комутація блоків (при 40 вузлах є зменшення параметру в 2,33 рази) і комутація пакетів (при 40 вузлах – зменшення в 10,1 рази).

Таблиця 4.24.

Параметр енергоефективності в залежності від типу комутації при різній кількості вузлів

Тип комутації	Параметр енергоефективності, пВт/біт	
	$N_{int} = 4$	$N_{int} = 40$
Комутація пакетів	3,367	53,159
Комутація часових блоків	2,293	12,348
Комутація хвиль	2,094	5,294

Параметр енергоефективності при здійсненні комутації часових блоків незначно переважає параметр енергоефективності при здійсненні комутації хвиль. Збільшення кількості вузлів при комутації пакетів збільшує кількість електроенергії для передачі одного біта даних (див. рис. 4.17). MPLS комутація на кожному проміжному вузлі є неефективним рішенням за параметром енергоефективності, оскільки використовує обладнання кожного рівня (мережевого, каналного, DWDM). Телекомунікаційним операторам та розробникам обладнання можна рекомендувати реалізацію комутації часових блоків і довжин хвиль.

Для коротких LSP (кількість вузлів менше 8) різниця між параметрами енергоефективності для трьох випадків реалізації комутації є незначною. Тому при коротких LSP доцільно використовувати будь-який із можливих видів GMPLS комутації на проміжних вузлах (пакетів, блоків, хвиль).

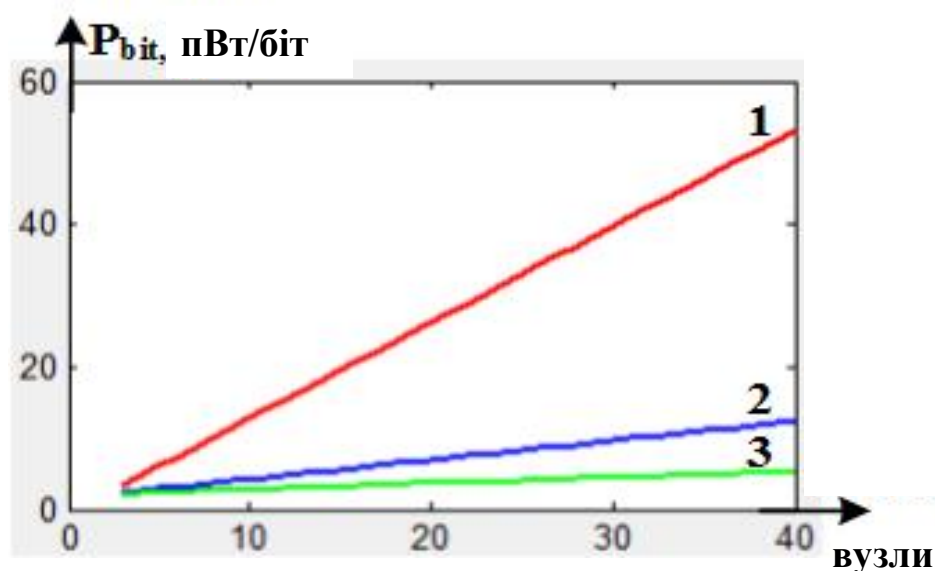


Рис. 4.17. Параметр енергоефективності мережі для трьох LSP при здійсненні комутації на 1 – обладнанні мережевого рівня (MPLS комутація), 2- обладнанні каналного рівня (комутація часових блоків), 3 – обладнанні DWDM рівня (комутація хвиль)

Висновки до розділу 4

1. Представлено загальний підхід визначення параметру енергоефективності для OTN, який дозволив встановити, що ключовим підходом для зменшення енергетичного споживання є видалення проміжного ОЕО перетворення, що дає змогу зменшити енергоспоживання до 63%. Удосконалено математичну модель енергоефективності для оптичної транспортної мережі шляхом урахування параметрів витрат електроенергії на відкриття наскрізних каналів та потужності, яка витрачається мережним обладнанням в режимі холостому ході, що дозволило здійснювати оцінювання його параметрів для ефективного використання мережних ресурсів.

2. Показано, що орієнтація кристалів LiNbO_3 , яка відповідає екстремальним значенням вказівних поверхонь коефіцієнтів ЕО ефекту та АО якості, приводить до економії електроенергії на 12,1 % для ЕО і 33,6 % для АО пристроїв.

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

4. Розроблено математичні й імітаційні моделі визначення параметру енергоефективності в залежності від зміни швидкості передачі даних для маршрутизатора, АО комутатора і ЕО модулятора. Встановлено, що збільшення швидкості передачі призводить до збільшення енергоспоживання цілої системи маршрутизатора, проте параметр енергоефективності не зростає. На основі проведених досліджень енергоефективності PTN, коли швидкість передачі даних становить 100 Гбіт/с, рекомендовано використовувати орієнтацію кристалів LiNbO_3 , яка відповідає максимальному значенню електрооптичного коефіцієнта та коефіцієнта АО якості, що приводить до зменшення енергетичного споживання ЕО модулятора та АО комутатора на 4,8% та 20 %, відповідно. Встановлено, що при швидкості передачі даних 100 Гбіт/с: використання наскрізних каналів передачі даних у АО комутаторі дозволяє зменшити енергетичне споживання на 10,7%, а для зрізу кристалу, що відповідає максимальному значенню коефіцієнта АО якості у PTN, енергетичне споживання комутатора зменшується на 27,8%; збільшення в два рази вхідних/вихідних портів АО комутатора призвело до збільшення енергетичного споживання на 88%.

5. Досліджено телекомунікаційні системи передачі зі швидкістю до 25 Тбіт/с при зміні параметрів енергоефективності та ймовірності відмови. При збільшенні пропускної здатності систем шляхом переходу до вищих порядків модуляцій визначено і оцінено параметр енергоефективності. Перехід від PM-QPSK(100Гбіт/с) до PM-16QAM(400Гбіт/с) модуляторів дозволив зменшити параметр енергоефективності на 42%. Ймовірність відмови PM-16QAM модулятора є в чотири рази вищою, ніж PM-QPSK

модулятора. Проведено оцінку двох варіантів нарощення пропускної здатності 25 Тбіт/с транспортної мережі з використання PM-32QAM модуляції і ущільненням DWDM сітки до 33 ГГц. Спектральне ущільнення по відношенню до використання систем передачі із PM-32QAM модуляцією дозволяє зменшити енергетичне споживання системи на 14% і зменшити її ймовірність відмови шляхом створення великої кількості оптичних каналів (альтернативних шляхів) із меншим навантаженням на кожен із них..

6. Запропоновано використання EDFA підсилювачів на базі ФКВ, що дозволило зменшити енергетичне споживання тракту на 9,5% по відношенню до тракту із звичайними EDFA. Встановлено, що ймовірність відмови роботи оптичного тракту при використанні спектрального ущільнення з EDFA ФКВ підсилювачами зменшилась в 1,6 рази. Запропоновано архітектуру телекомунікаційної системи передачі на базі ущільненої DWDM сітки і використання ФКВ для систем передачі із швидкістю 25 Тбіт/с.

7. Досліджено вплив Link Bundling GMPLS на енергетичне споживання OTN. Встановлено, що для LSP при збільшенні від чотирьох до сорока кількості проміжних вузлів енергетичне споживання зросло в 2,52 рази. Показано, 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 менше 45 %, оскільки нерівномірний розподіл навантаження між каналами може призвести до зростання енергоспоживання мережі.

8. Визначено і оцінено параметр енергоефективності при комутації пакетів, часових блоків, хвиль з використанням Generalized Labels 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 LSP 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.

РОЗДІЛ 5. ДОСЛІДЖЕННЯ ТОПОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕОРІЇ ВИПАДКОВИХ ГРАФІВ

5.1. Моделі фотонної транспортної мережі на основі теорії випадкових графів

5.1.1. Модель Уотса- Строгатса для аналізу середньої довжини шляху та коефіцієнта кластеризації

При дослідженні кільцевої топологія РТН доцільно розглядати теорію випадкового графа в межах моделі «малого світу» (Уотса- Строгатса) п.2.1.3.

У моделі Уотса-Строгатса є зміни в масштабуванні характерної середньої довжини шляху l в залежності від розміру системи та p згідно (2.21). Для малого p середня довжина шляху l масштабується лінійно з розміром системи, тоді як для великих p масштабування логарифмічне. В [315] обґрунтовано швидке падіння середньої довжини шляху l появою гілок (з'єднань) між вузлами. Кожна випадково створена гілка з'єднує розділені частини графа і має значний вплив на характерну довжину шляху всього графа. Параметр l/N^* згідно (2.21) приведено на рис.5.1.

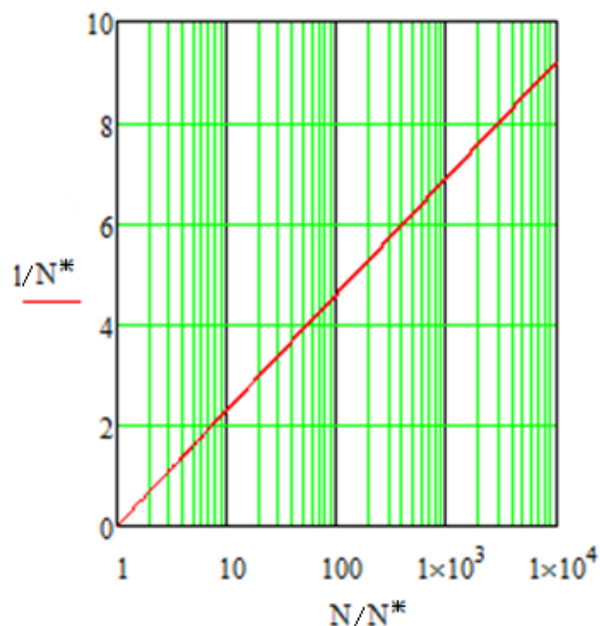


Рис.5.1. Залежність l/N^* від N/N^* у логарифмічно-лінійному масштабі при великих N/N^*

Користуючись (2.21), визначено графік залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів, коли $p=0,1$ (рис.5.2). Для моделі Уотса-Строгатса розглядалися три випадки розмірностей решіток: $d^*=1$; $d^*=2$; $d^*=3$, які визначені в п.2.1.3. Отже, при кільцевій топології PTN різко зростає середня довжина шляху при збільшенні розмірності решіток. З отриманих результатів бачимо, що зі збільшенням кількості вузлів l зростає.

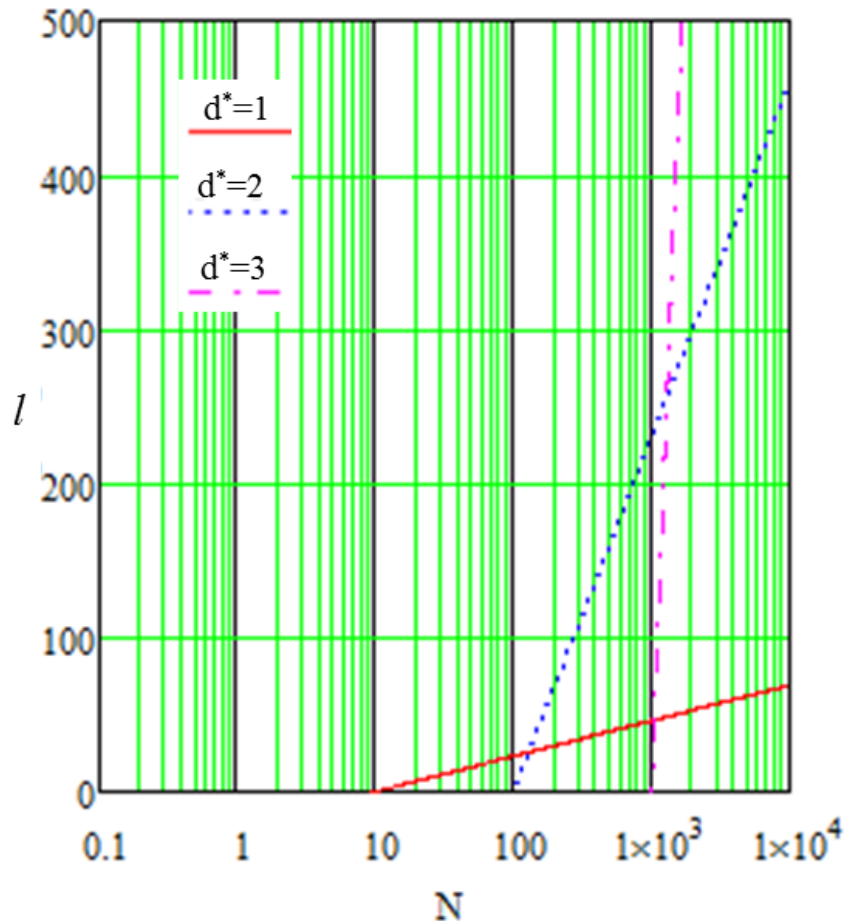


Рис. 5.2. Графік залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів, коли $p=0,1$

На рис. 5.3 та рис. 5.4 показано графіки залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів при різних значеннях параметра p .

Бачимо, що параметр p суттєво впливає на середню довжину шляху, причому при малих значеннях, наприклад рис.5.4, параметр l зі збільшенням N різко збільшується. Це пов'язано з тим, що коли p є малим (з'єднані лише

найближчі вузли), зв'язок між віддаленими вузлами довший, і збільшується із зростанням кількості вузлів.

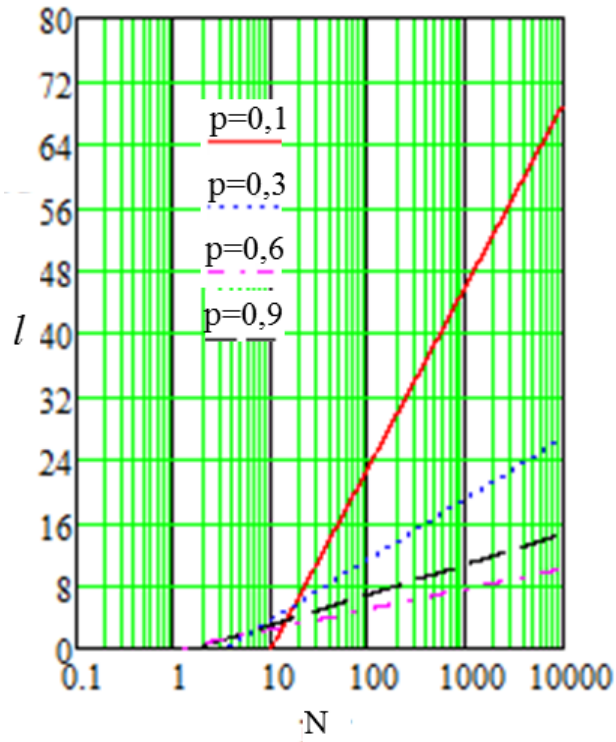


Рис. 5.3. Графік залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів, коли $d^*=1$

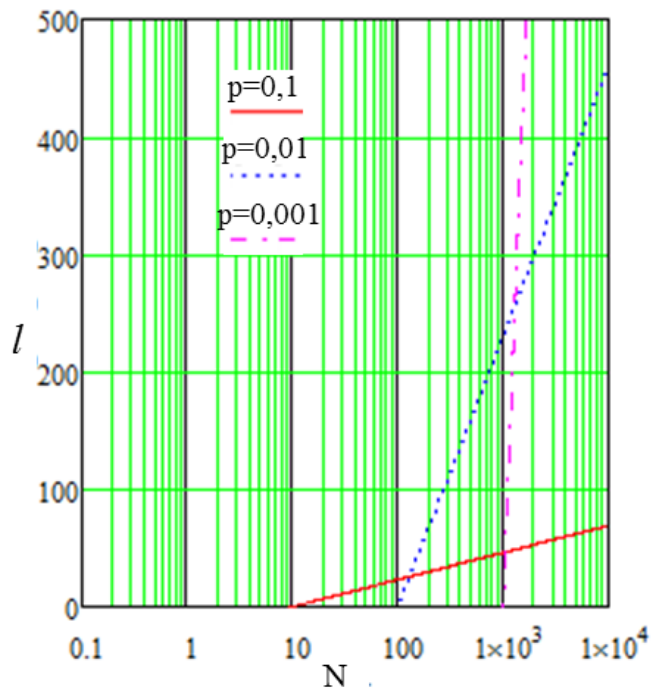


Рис. 5.4. Графік залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів, коли $d^*=1$

Користуючись (2.21), визначено залежність середньої довжини шляху від p , коли $N=100$ для різних розмірностей решіток (рис. 5.5). Проводячи аналіз розглянутих залежностей бачимо, що середня довжина шляху в мережі з граничним значенням $p=1$ наближається до $\ln N$. Водночас при $p=0,2$ усі залежності спочатку різко зростають, а, досягнувши $l \approx 3,6-3,8$, починають монотонно спадати.

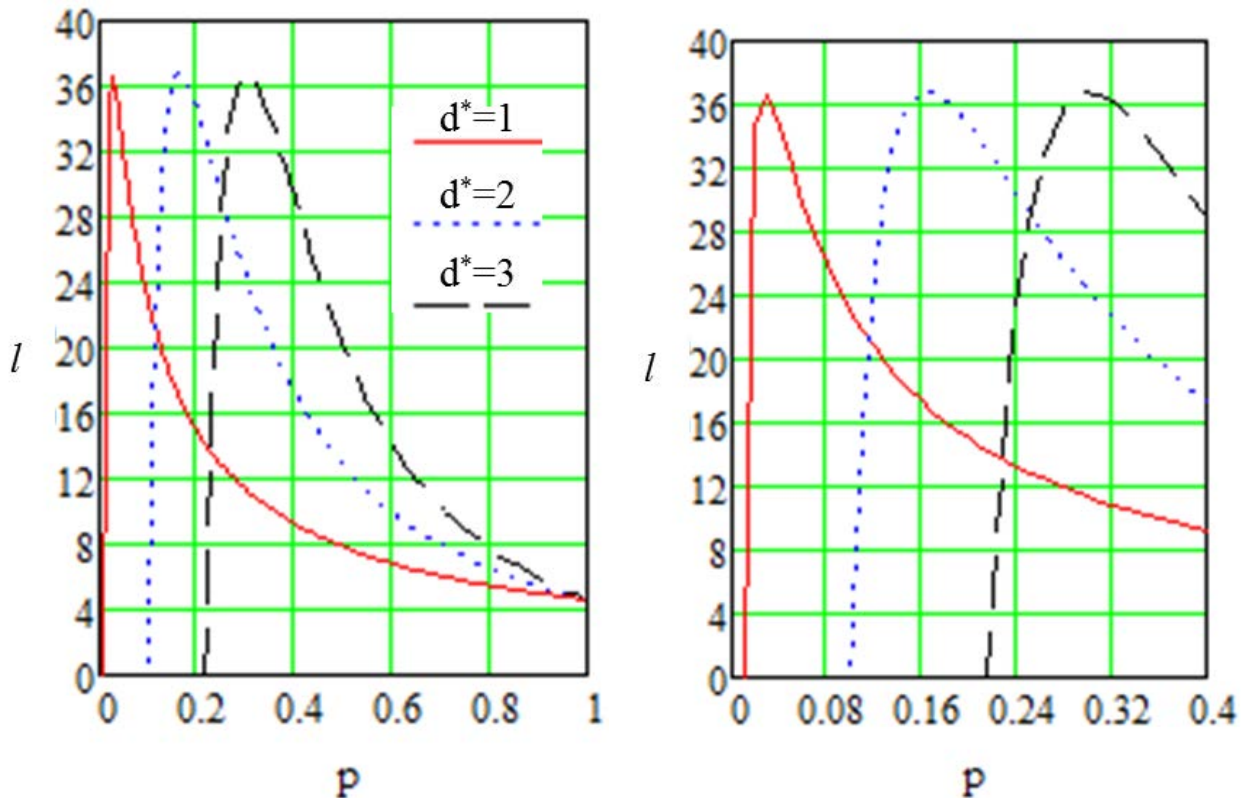


Рис. 5.5. Графіки залежності середньої довжини шляху від p , коли $N=100$

Користуючись (2.22), побудовано графік залежності середньої довжини шляху від параметрів N та K (рис.5.6). Загалом формула (2.22) є справедливою для великих значень параметра p [257].

Користуючись (2.23), побудовано залежність середньої довжини шляху від p , при різних N і d^* (рис.5.7). Бачимо, що кількість вузлів у РТН не суттєво впливає на l , на відміну від параметра d^* .

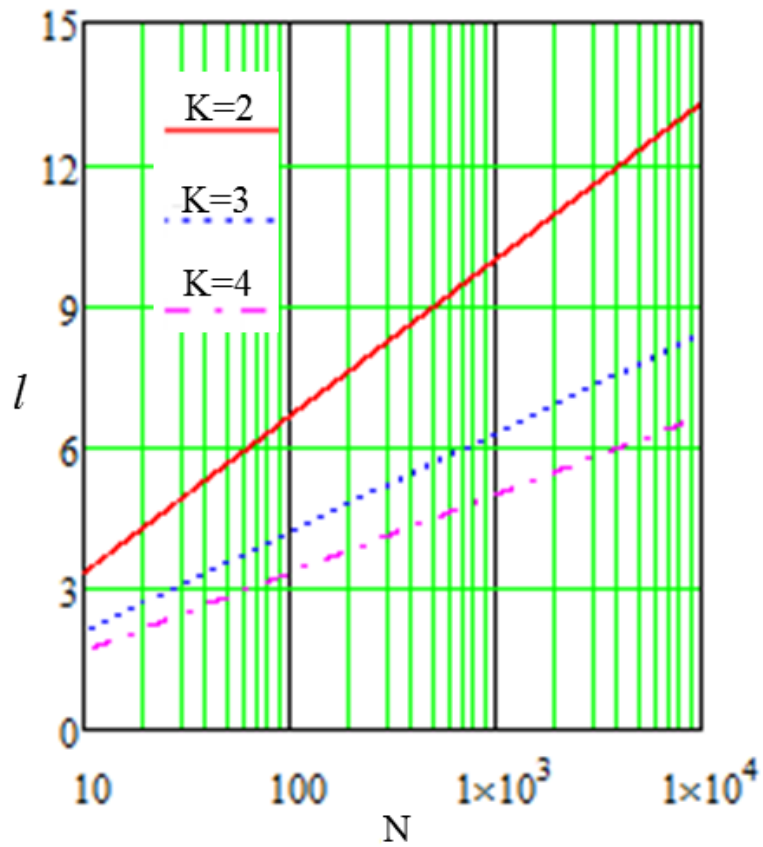


Рис. 5.6. Графік залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів

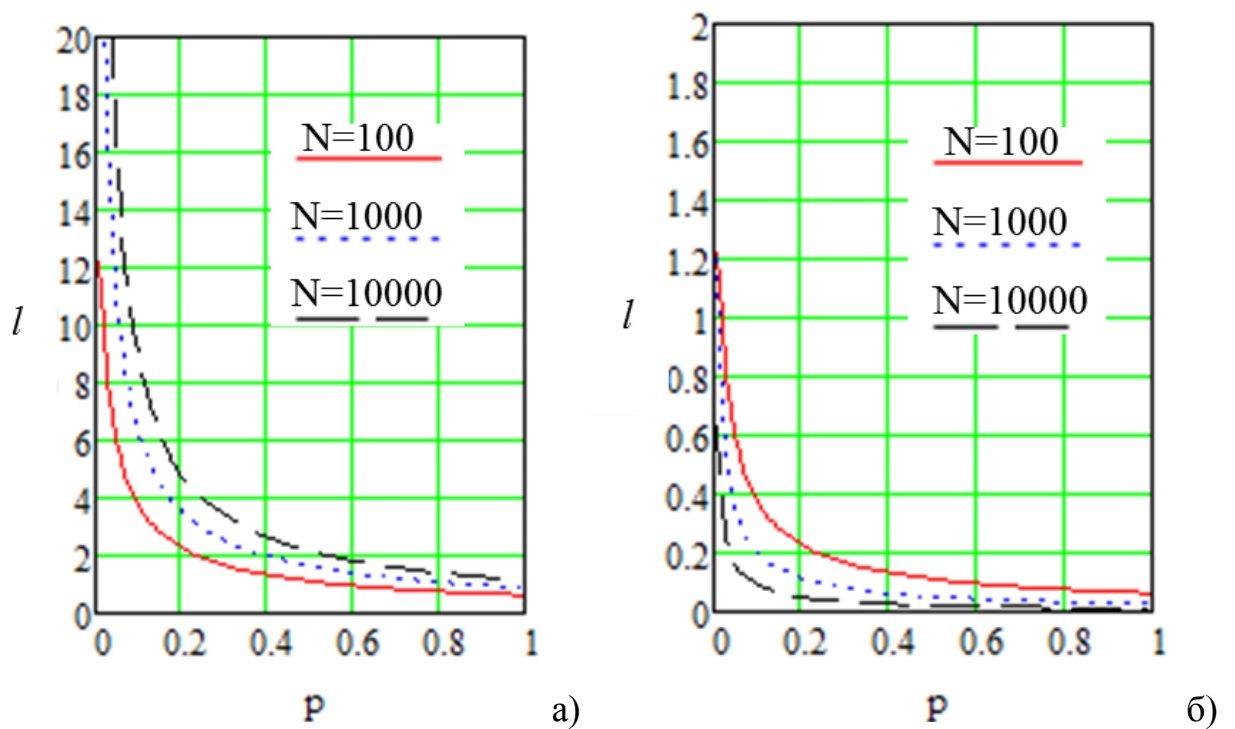


Рис. 5.7. Графіки залежності середньої довжини шляху від p , коли $K=3$:

а) $d^*=1$; б) $d^*=2$

З (2.23) побудовано графіки залежності середньої довжини шляху від N при різних розмірностях решіток та p (рис. 5.8). Коли $p < 1$ графіки на рис. 5.8 є подібними з рис. 5.4, що відповідають формулі (2.21), хоча значення l суттєво відрізняються. Аналогічна ситуація є при порівнянні рис. 5.8, 2а) та рис. 5.3, тобто загалом, у випадку коли $d^* = 1$ розглянуті графіки мають схожий характер з графіками, що відповідають формулі (2.21). При $d^* > 1$, замість прямої залежності спостерігаються криві. Водночас на всіх графіках із збільшенням кількості вузлів збільшується середня довжина шляху.

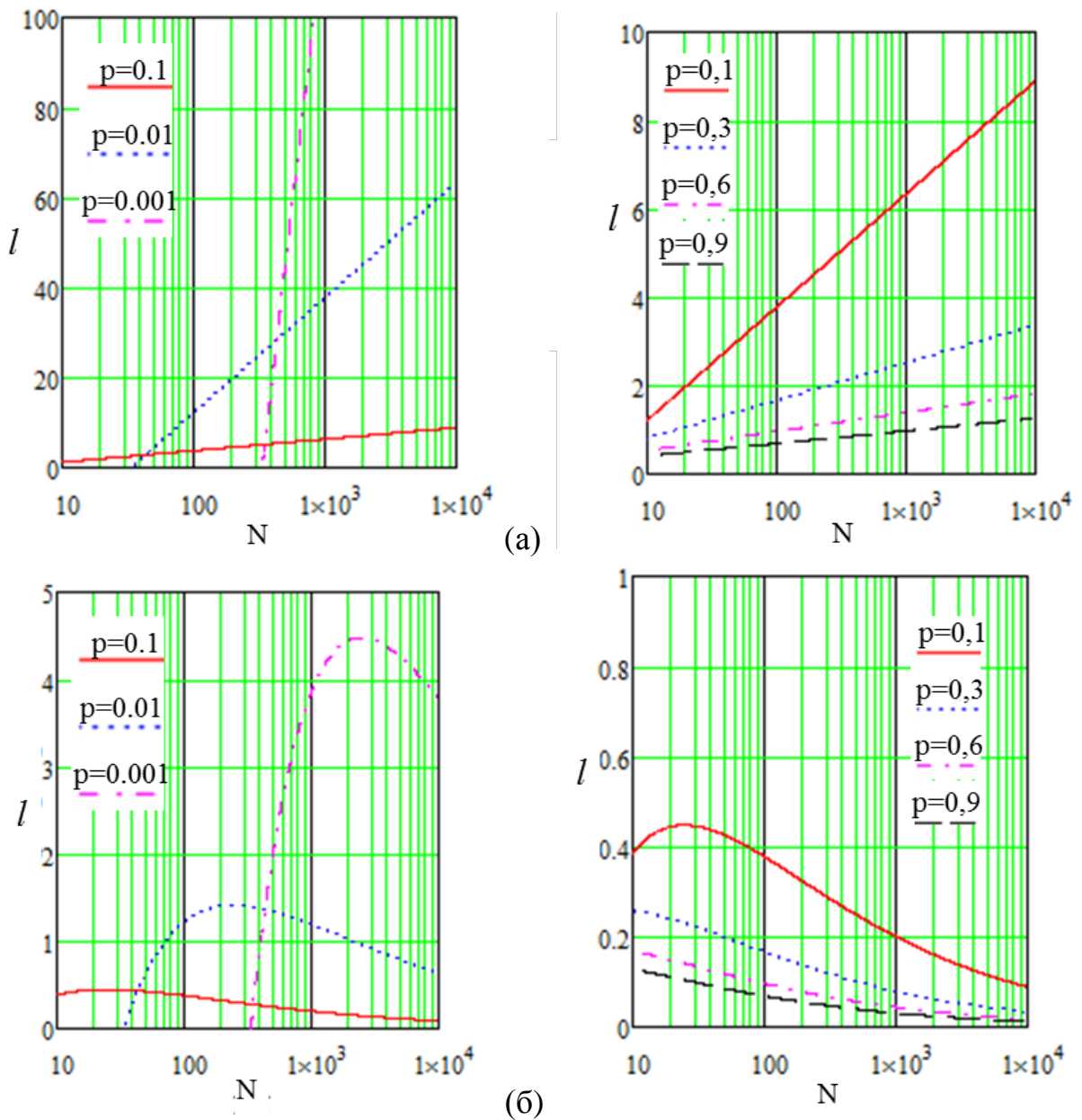


Рис. 5.8. Графіки залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів, коли $K=3$, при а) $d^* = 1$; б) $d^* = 2$

На рис. 5.9. представлено залежність середньої довжини шляху від p при різних параметрах K . З отриманих графіків залежностей, спостерігаємо, що параметр K більше впливає на середню довжину шляху, ніж параметр N (рис. 5.7).

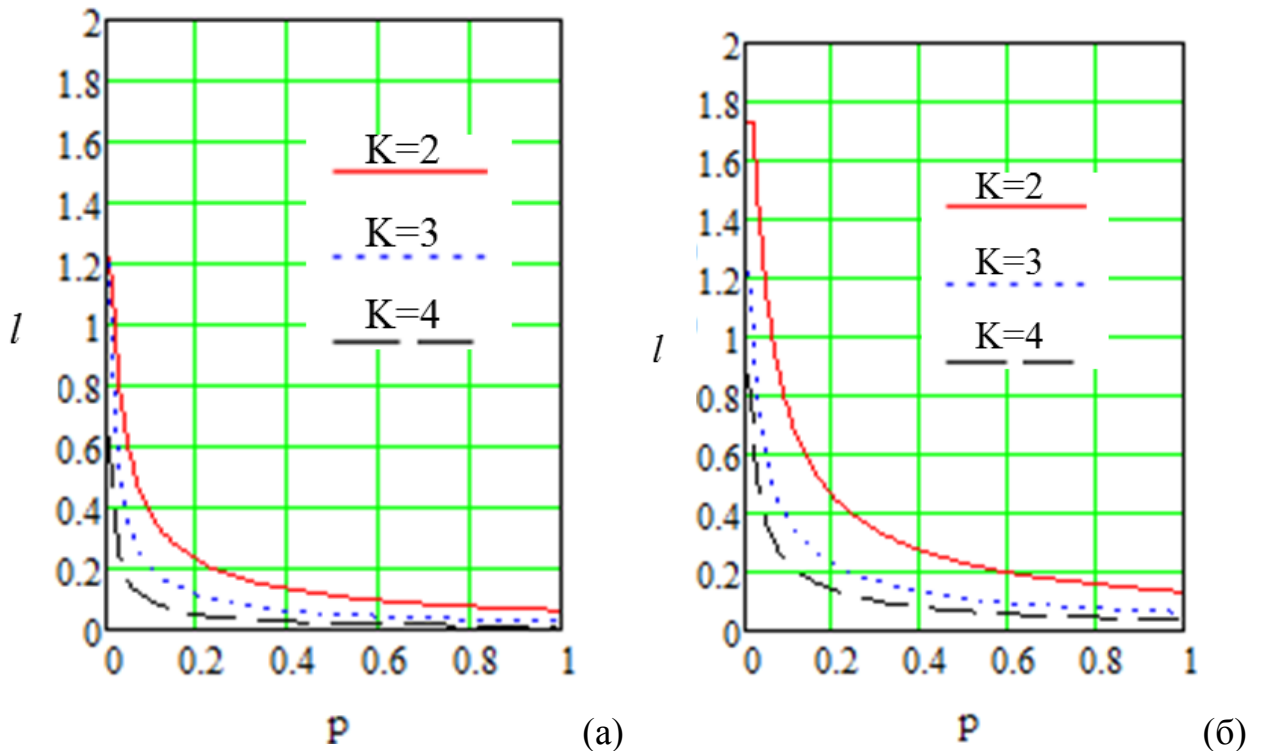


Рис. 5.9. Графіки залежності середньої довжини шляху від p , коли $N=100$:
а) $d^* = 1$; б) $d^* = 2$

На рис. 5.10 представлено середню довжину шляху від кількості вузлів при різних K . Отримані залежності мають подібний характер при різних p , що на рис. 5.8. З рис.5.9 та рис.5.10 спостерігаємо, що чим більший параметр K , тим менша середня довжина шляху. Водночас середня довжина шляху для випадків $K=3$ і $K=4$ суттєво не відрізняється одна від одної на відміну від $K=2$. Отже, необхідно, щоб кожен вузол був зв'язаний як мінімум із трьома вузлами, тобто в рамках моделі Уотса-Строгатса відповідає каскадно-кільцевій топологічній структурі, що дозволяє зменшити кількість транзитних вузлів.

Користуючись (2.23), побудовано середню довжину шляху в залежності від параметрів p та N для різних розмірностей початкових решіток (рис.5.11).

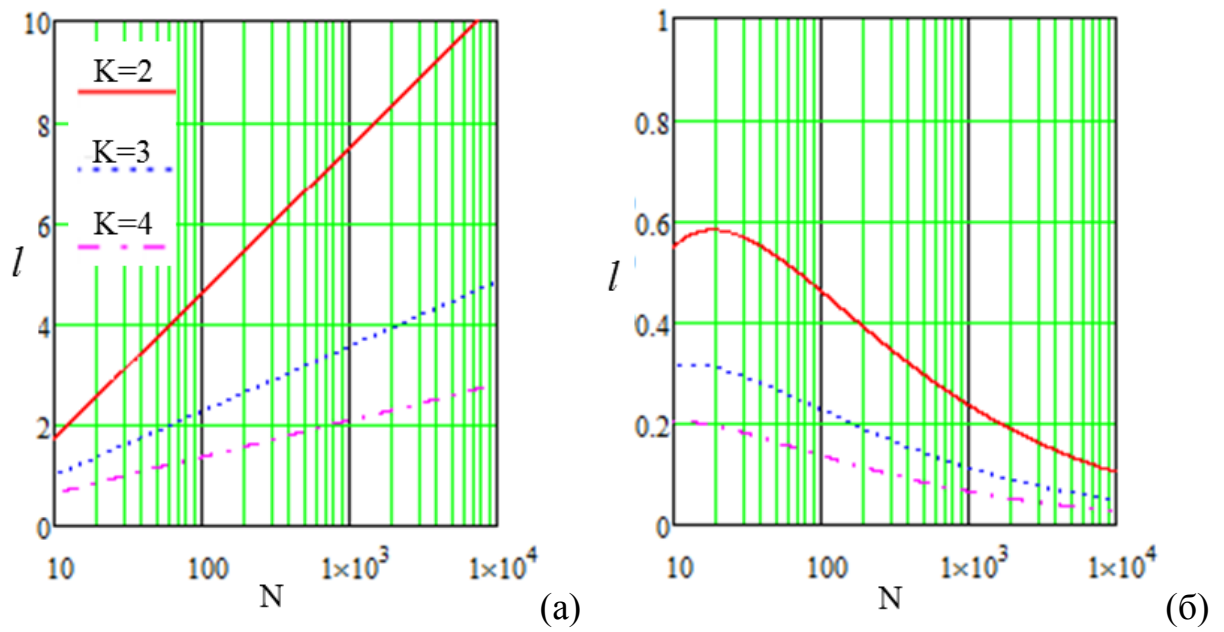


Рис. 5.10. Графіки залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів, коли $p=0,2$, при а) $d^* = 1$; б) $d^* = 2$

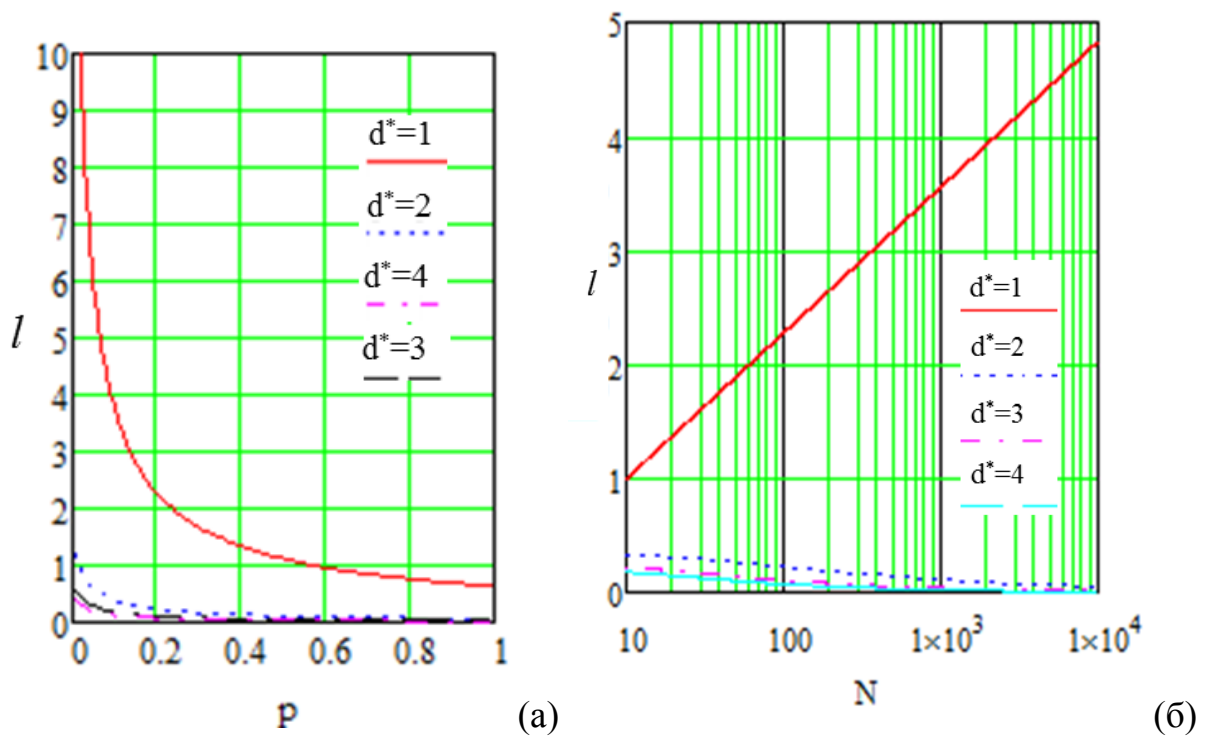


Рис. 5.11. Графіки залежності середньої довжини шляху від параметрів а) p , коли $N=100$; б) N , коли $p=0,2$

Аналізуючи рис. 5.11, спостерігаємо, що коли ймовірність перез'єднання є $p > 0,2$, то l не суттєво відрізняється для різних d^* . Водночас в залежності від

кількості вузлів, коли $d^*=1$, середня довжина шляху має лінійний характер, аналогічно випадкам, представленим на рис.5.8 та рис. 5.10. Коли $d^*>1$, то збільшуючи N , при $d^*=1$, середня довжина шляху може становити біля двох одиниць, а при $d^*=1$ і більше $l - \epsilon$ не більше одиниці, при заданих умовах. Отже, можна рекомендувати, щоб розмірність початкових решіток була більша одиниці.

В моделі тісного світу є відносно високий коефіцієнт кластеризації. Це співіснування маленького l і великого C є узгоджене з характеристиками реальних мереж. Для одновимірних решіток коефіцієнт кластеризації рівний:

$$C = \frac{3(K-2)}{4(K-1)}. \quad (5.1)$$

Користуючись (5.1), побудовано графік залежності коефіцієнта кластеризації від параметра K (рис. 5.12). З розглянутого графіка бачимо, що у RTN при великій кількості з'єднань між вузлами, коефіцієнт кластеризації прямує до $3/4$.

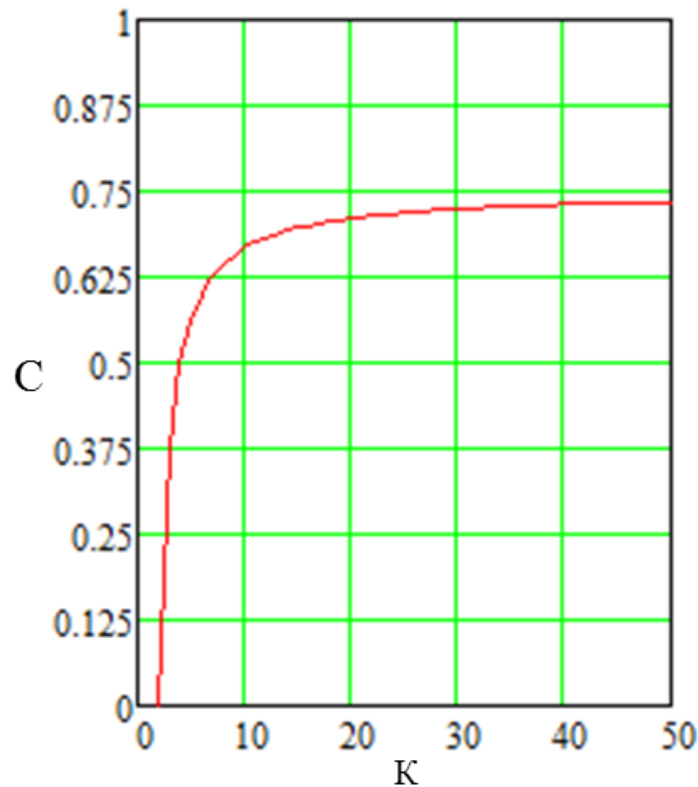


Рис. 5.12. Графік залежності коефіцієнта кластеризації для одновимірних решіток в залежності від параметра K

Згідно моделі Уотса-Строгатса, коефіцієнт кластеризації, коли $p > 0$, має вигляд [136]

$$C(p) = \frac{3K(K-1)}{2K(2K-1) + 8pK^2 + 4p^2K^2} \quad (5.2)$$

Користуючись (5.2), побудовано залежність коефіцієнта кластеризації від параметра K при різних p (рис.5.13). З рис. 5.13 спостерігаємо, що кількість з'єднань суттєво не впливає на параметр C . Водночас суттєвий вплив має параметр p , тому користуючись (5.2), побудовано залежність коефіцієнта кластеризації від ймовірності перез'єднання при різних K (рис.5.14). З даного графіка переконуємося, що в мережах зі збільшенням K , коефіцієнт кластеризації суттєво не змінюється, тоді як зі збільшенням p , параметр C має спадний характер.

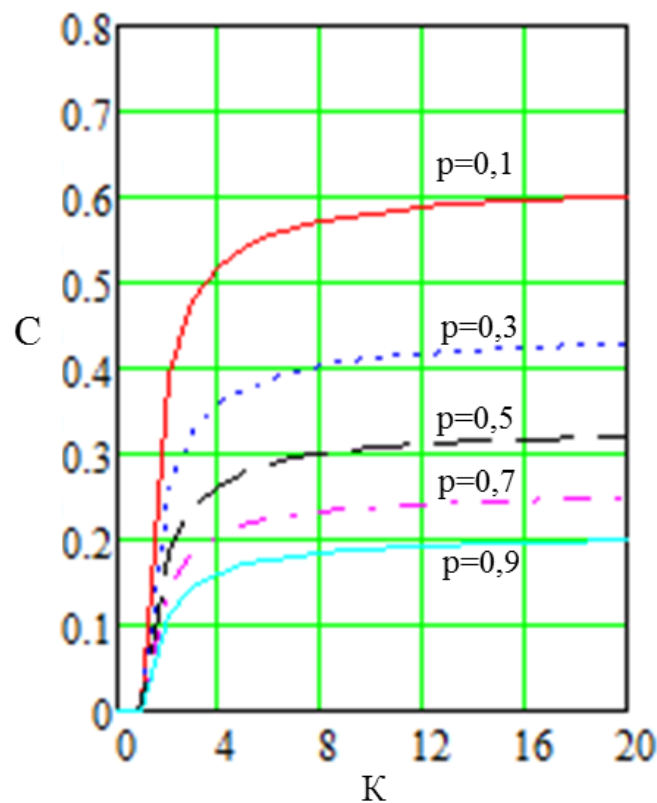


Рис. 5.13. Графік залежності коефіцієнта кластеризації від кількості з'єднань

З рис. 5.7, рис. 5.9, рис. 5.11 спостерігаємо, що для малих значень p значення середньої довжини шляху має спадний характер, водночас [136]

існує широкий інтервал p , на якому $l(p)$ наближається до величини $l(1)$, але $C(p) \gg C(1)$.

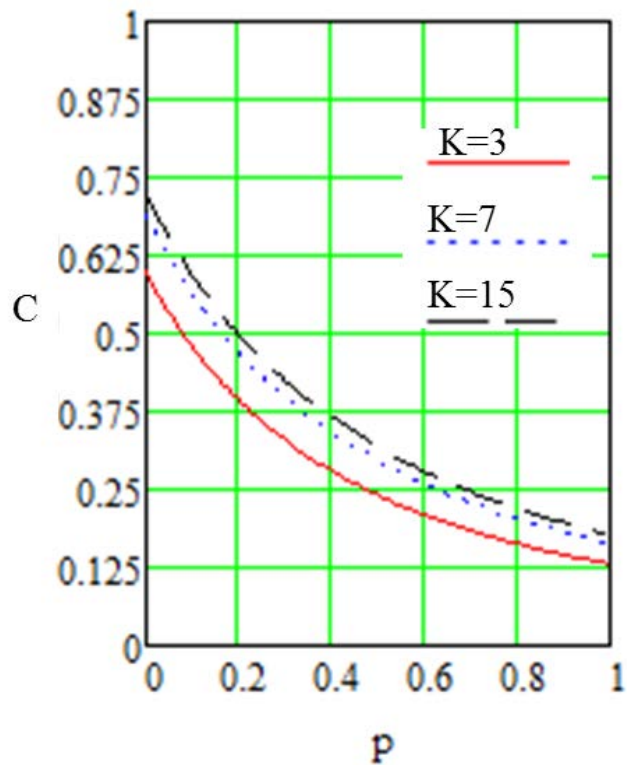


Рис. 5.14. Графік залежності коефіцієнта кластеризації від параметра p

З отриманих результатів бачимо, що згідно моделі Уотса-Строгатса при збільшенні кількості вузлів в РТН, збільшується середня довжина шляху. Водночас при збільшенні ймовірності зв'язку між вузлами p коефіцієнт кластеризації і середня довжина шляху зменшується. Це можна пояснити тим, що зі зростанням p збільшується зв'язність між вузлами. Таким чином кількість транзитних вузлів зменшується, але ймовірність поява кластера зменшується, що пояснюється топологічною структурою мережі, яку описує модель Уотса-Строгатса.

5.1.2. Модель Барабаші-Альберта для аналізу фотонної транспортної мережі

При введенні в експлуатацію вузлів в транспортній мережі доцільно розглядати модель Барабаші-Альберта.

Згідно (2.25) та (2.26), середня довжина шляху у мережах за моделлю Барабаші-Альберта змінюється логарифмічно із збільшенням загальної кількості вузлів, що представлено на рис.5.15.

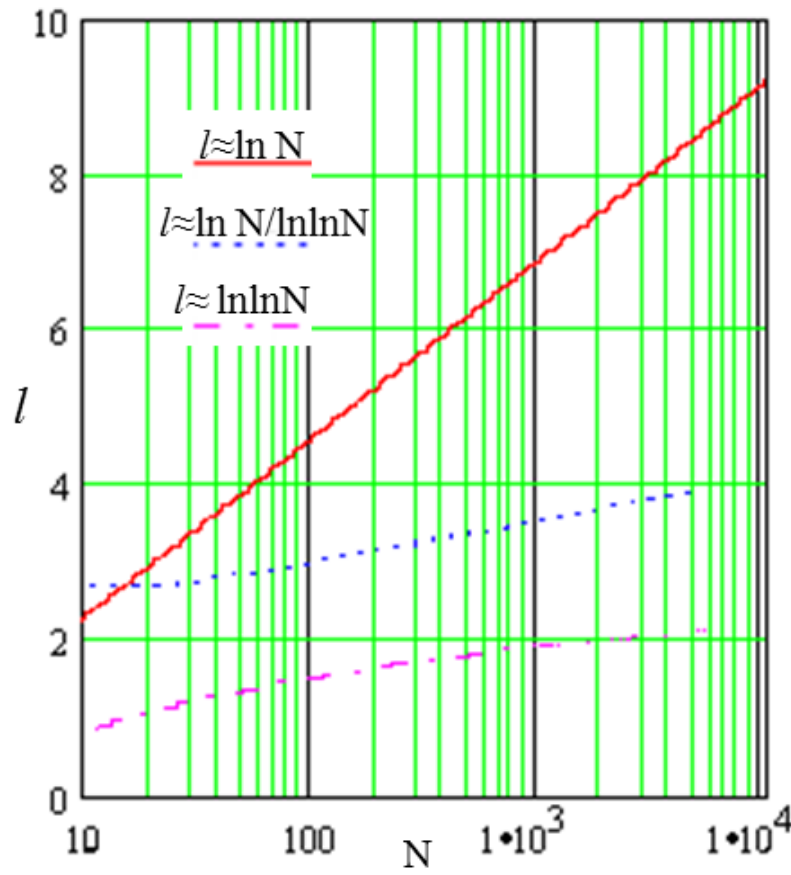


Рис. 5.15. Графік залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів

Коефіцієнт кластеризації для моделі Барабаша-Альберта рівний [136]

$$C \approx 5 \frac{\langle k \rangle}{N}. \quad (5.3)$$

Користуючись (5.3), побудовано графік залежності коефіцієнта кластеризації в залежності від N (рис.5.16).

Існує інша формула визначення коефіцієнта кластеризації [136]

$$C \approx N^{-0,75}. \quad (5.4)$$

За допомогою (5.4) побудовано графік залежності коефіцієнта кластеризації від N (рис.5.17). На рис. 5.17 на відмінну від рис. 5.16, спостерігаємо менший коефіцієнт кластеризації.

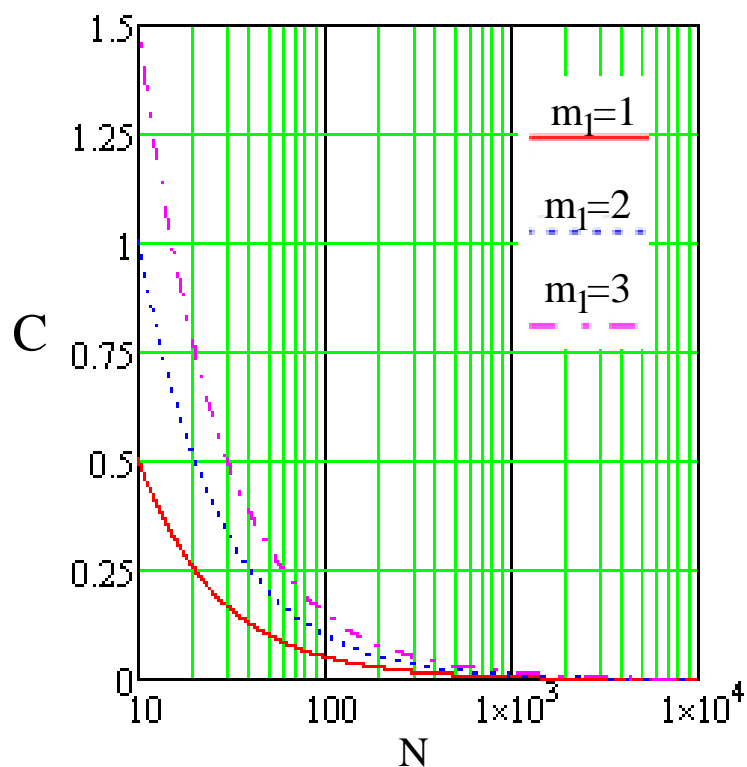


Рис. 5.16. Графіки залежності коефіцієнта кластеризації від кількості вузлів для моделі Барабаша-Альберта

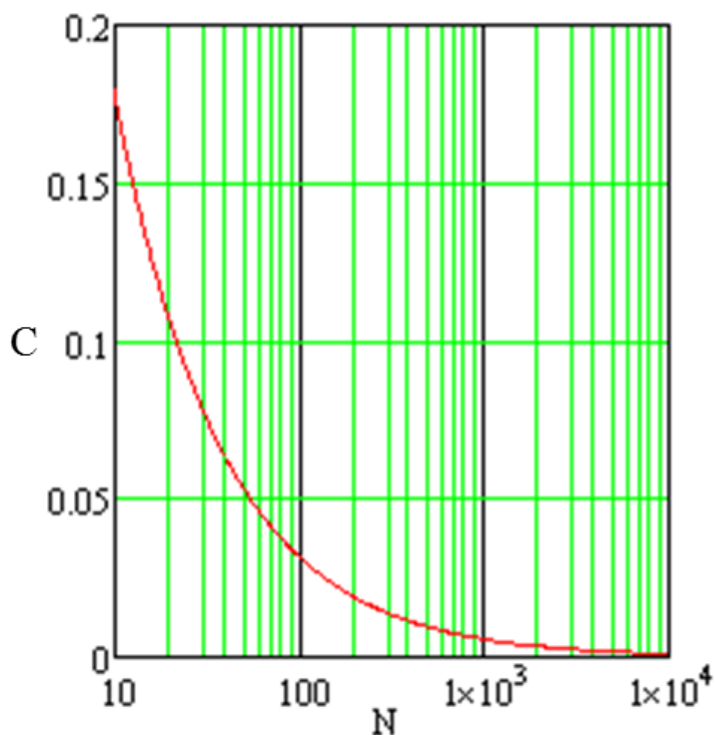


Рис. 5.17. Графік залежності коефіцієнта кластеризації від кількості вузлів згідно (5.4)

В [316] для коефіцієнта кластеризації отримано наступну формулу:

$$C \approx \frac{(m_1 - 1) (\ln N)^2}{8 N}. \quad (5.5)$$

Використовуюючи (5.5), побудовано графік залежності від кількості вузлів для різних m_1 (рис. 5.18). Порівнюючи рис. 5.18 з іншими графіками, бачимо, що даний графік є співмірний з рис. 5.16, причому також має спадний характер. Спостерігаємо, що коефіцієнт кластеризації при збільшенні кількості вузлів більше, ніж $N=10^3$ суттєво не змінюється, що пояснюється стаціонарністю розподілу кількості вузлів.

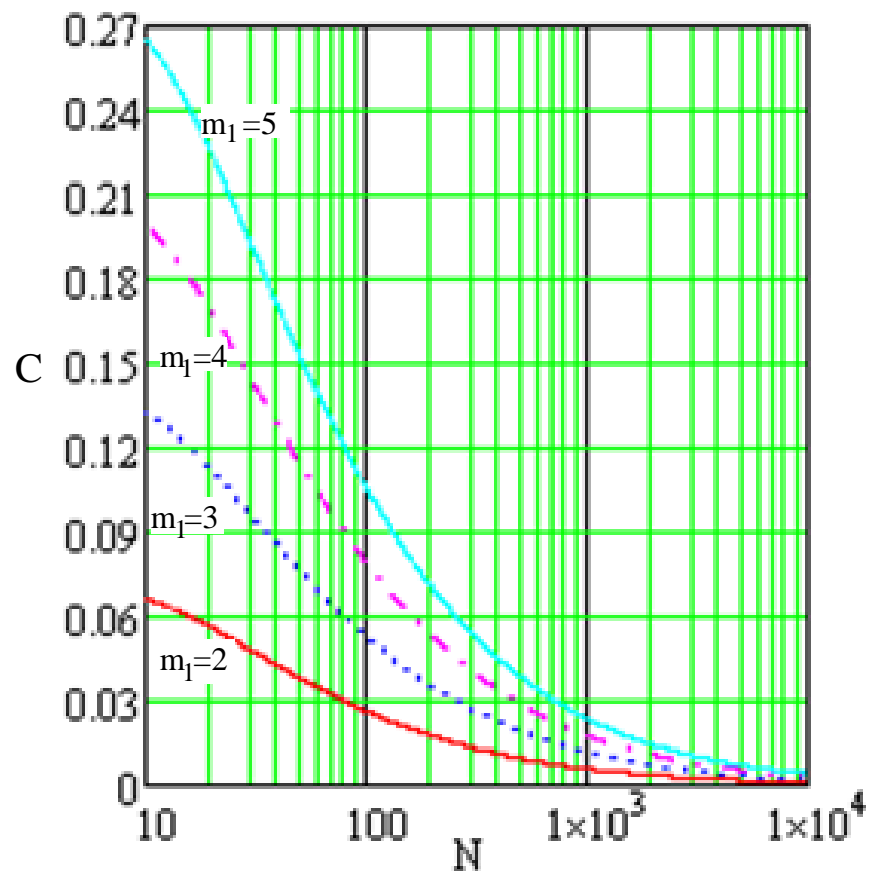


Рис. 5.18. Графіки залежності коефіцієнта кластеризації від кількості вузлів згідно співвідношення (5.5)

На основі проведених досліджень впливає, що згідно моделі Барабаші-Альберта при систематичній появі нових вузлів середній шлях зростає, а коефіцієнт кластеризації спадає. Це обумовлено тим, що при зростанні кількості вузлів середня зв'язність зменшується.

5.1.3. Модель Ердос-Ренеї для аналізу фотонної транспортної мережі

В телекомунікаційній мережі більшість з'єднань можна характеризувати випадковим чином, тому існує необхідність розглянути модель Ердос-Ренеї для РТН.

Середня довжина шляху співпадає із діаметром випадкових графів (2.11) [136], а також співпадає із середньою довжиною шляху моделі Уотса-Строгатса представленої формулою (2.22) [257]. Отже, графіки залежності рис. 5.5 та рис. 5.19 і відповідні характеристики відповідають середній довжині моделі випадкового графа.

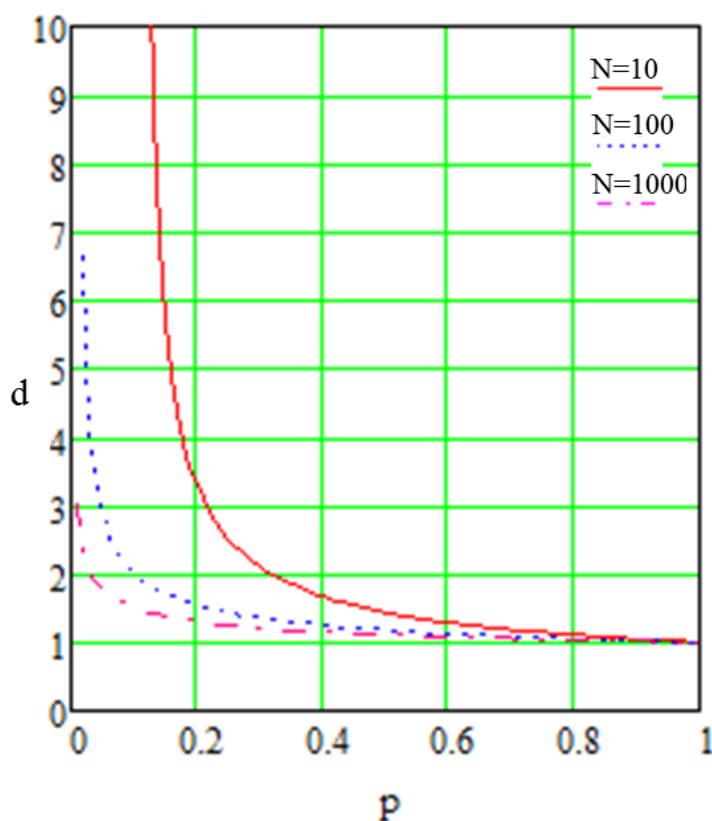


Рис. 5.19. Залежність діаметра випадкового графа від параметра p

Користуючись (2.11), побудована залежність діаметра випадкового графа в залежності від кількості вузлів (рис. 5.20). Проводячи аналіз результатів можна припустити, що для РТН на основі моделі Ердос-Ренеї діаметр випадкового графа має різко спадний характер до значення приблизно 1, що пояснюється повною зв'язністю між вузлами.

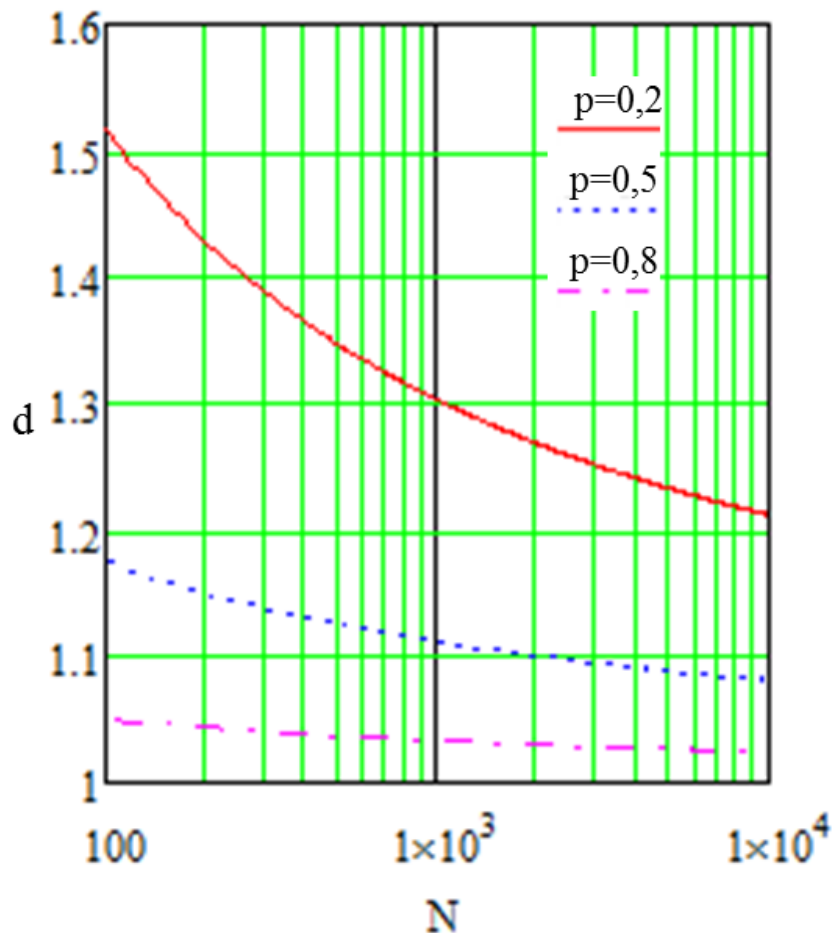


Рис. 5.20. Залежність діаметра випадкового графа від кількості вузлів

Виберемо вершину u у випадковому графі разом з двома його найближчими сусідніми вершинами. Ймовірність того, що зазначені сусіди з'єднані, дорівнює ймовірності того, що з'єднані дві випадково обрані вершини. Отже, коефіцієнт кластеризації випадкового графа дорівнює [136]

$$C = \langle k \rangle / N. \quad (5.6)$$

Порівнюючи (5.3) із (5.6), спостерігаємо, що для моделі Ердоша-Ренеї коефіцієнт кластеризації c в п'ять раз меншим, ніж для моделі Барабаша-Альберта, представленою на рис. 5.16.

З проведених досліджень на основі моделі Ердоша-Ренеї випливає, що діаметр випадкового графа зменшується при зростанні кількості вузлів та параметра p , оскільки збільшується середня зв'язність.

5.1.4. Використання моделі узагальнених випадкових графів для аналізу фотонної транспортної мережі

Як було зазначено в п.2.1.2, моделі узагальнених випадкових графів описують степеневим законом розподілом ступенів вузлів телекомунікаційної мережі (2.12).

З (2.16) визначимо z_1 в залежності від k при різних γ (рис.5.21).

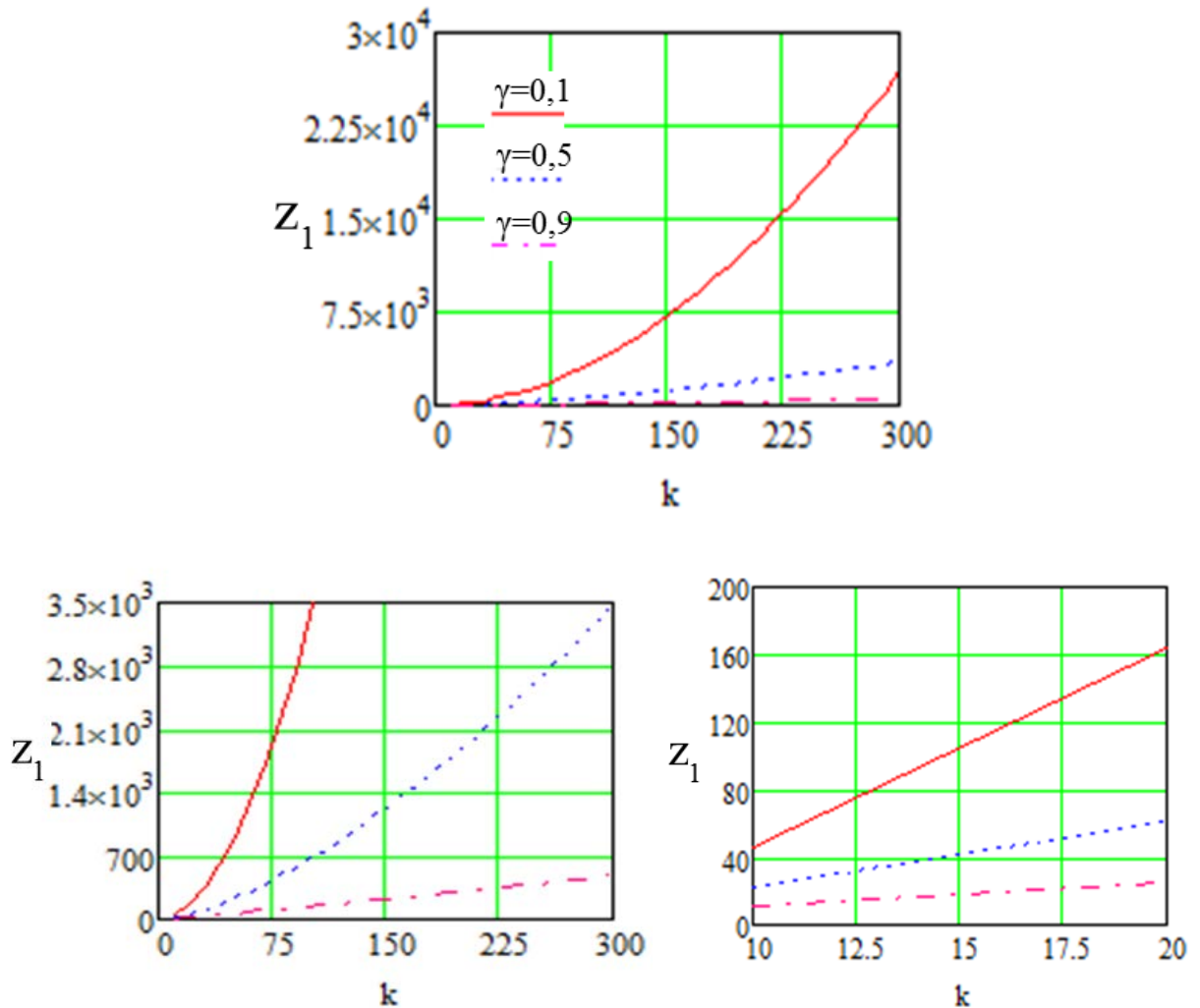


Рис. 5.21. Графік залежності кількості найближчих сусідів від максимального k

З (2.17) випливає, що

$$z_2 = z_1 G_1'(1).$$

Користуючись (2.15), та, враховуючи (2.16), отримуємо:

$$z_2 = \sum_k k(k-1)P(k)x^{k-1}. \quad (5.7)$$

З рис. 5.21 спостерігаємо, що в транспортних мережах при степеневому закону зв'язності вершин із збільшенням γ кількість ближніх сусідніх вузлів зменшується. Аналогічна ситуація спостерігається для z_2 (рис. 5.22), графіки залежностей яких побудовані на основі (5.7).

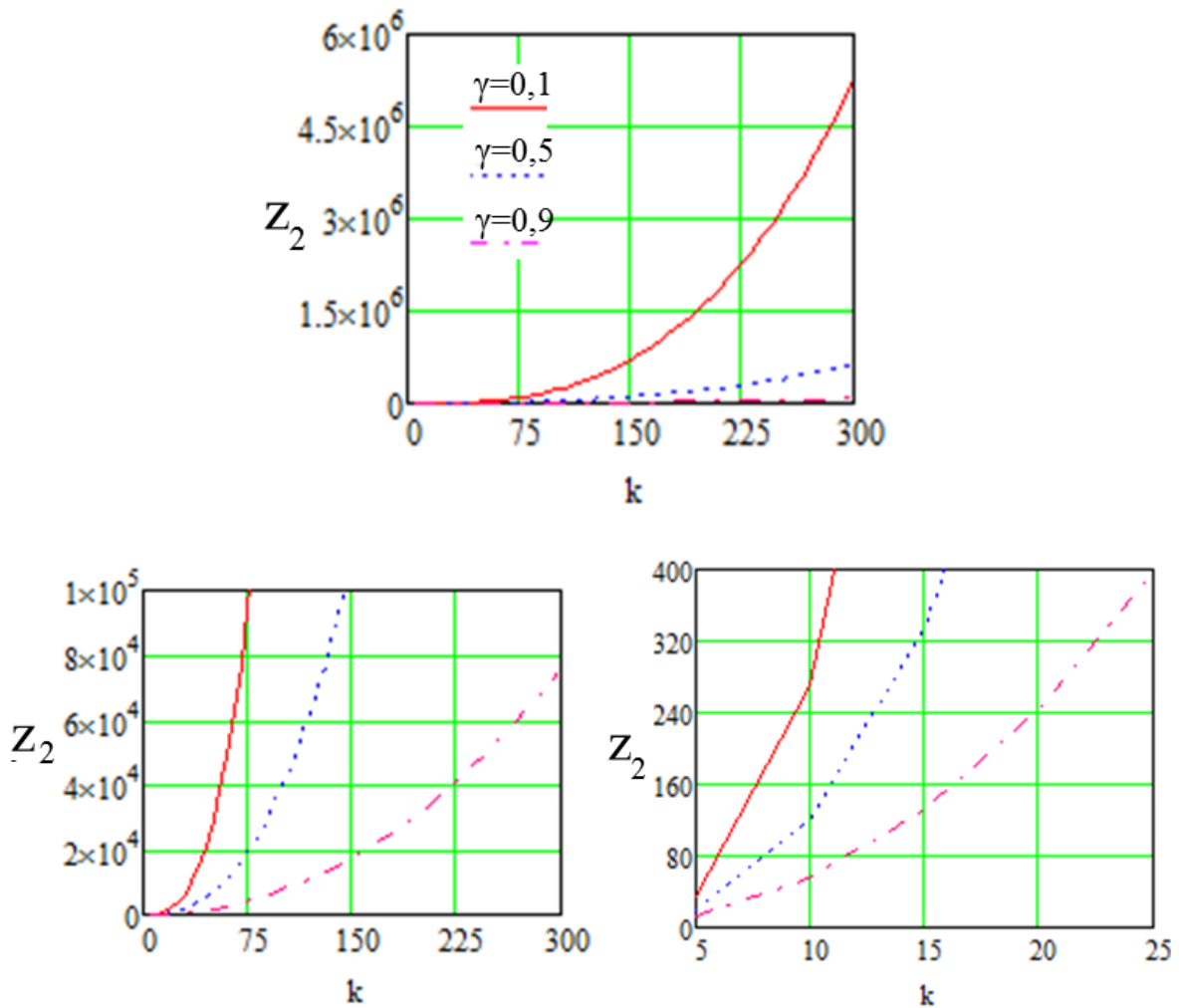


Рис. 5.22. Графік залежності кількості других по близькості сусідів від максимального k

Враховуючи, що для загальних випадкових графів з розподілом степеневих вершин $P(k) \sim k^{-\gamma}$, граф є майже завжди зв'язний, коли $0 < \gamma < 1$ [136]. Необхідно врахувати, що при $\gamma=0,95$ параметр $z_1 \approx 500$. Отже, щоб виконувалася умова (2.18), необхідно $N > 10^3$. Зазначимо, що для даного випадку $z_2 \gg z_1$. Для зазначених умов побудовано графік залежності

середньої довжини згідно рівняння (2.19), який представлено на рис. 5.23. Відзначимо, що залежність середньої довжини шляху в моделі узагальненого випадкового графа від γ є лінійною і монотонно зростаючою.

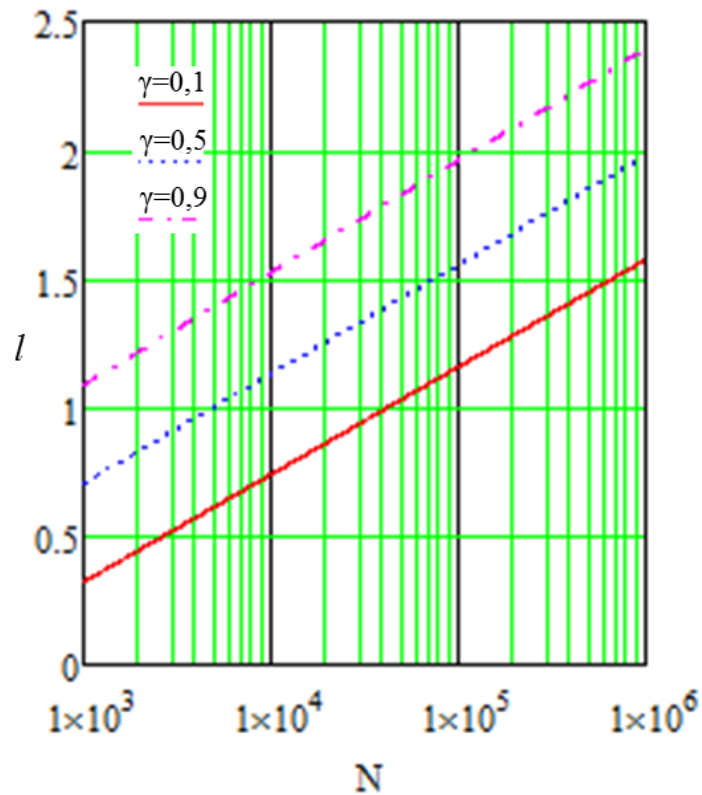


Рис. 5.23. Графіки залежності середньої довжини шляху від параметра N

На основі (2.20) побудовані графіки залежності (рис. 5.24), які лінійно зростають і залежать від γ .

Коефіцієнт кластеризації для даної моделі визначається як:

$$C = \frac{z_2^2}{N z_1}, \quad (5.8)$$

Користуючись (5.8), побудовано залежність коефіцієнта кластеризації від кількості вузлів при різних максимальних значень k та параметра γ (рис. 5.25). При побудові використано також (2.16) та (5.7). Видно, що у PTN зі степеневим законом ($k^{-\gamma}$) зв'язності вершин при збільшенні k зростає коефіцієнт кластеризації, водночас при малих значеннях параметра γ або при збільшенні N коефіцієнт кластеризації зменшується.

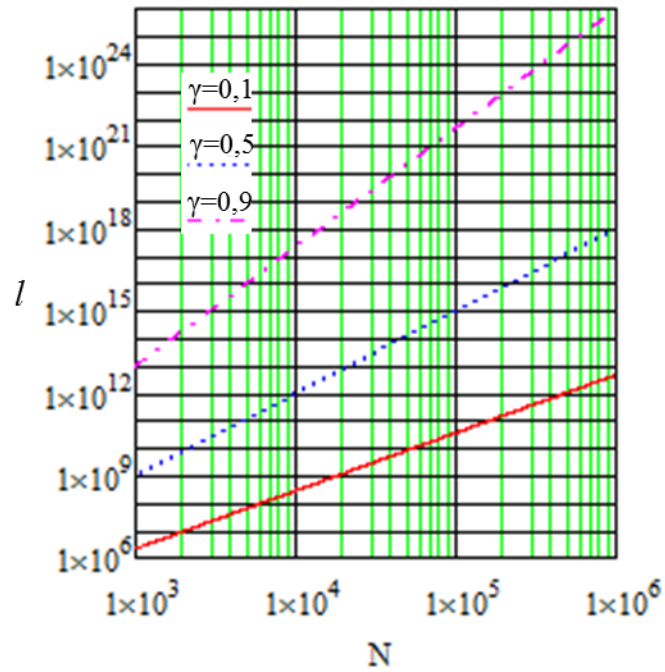


Рис. 5.24. Графіки залежності середньої довжини шляху від кількості вузлів

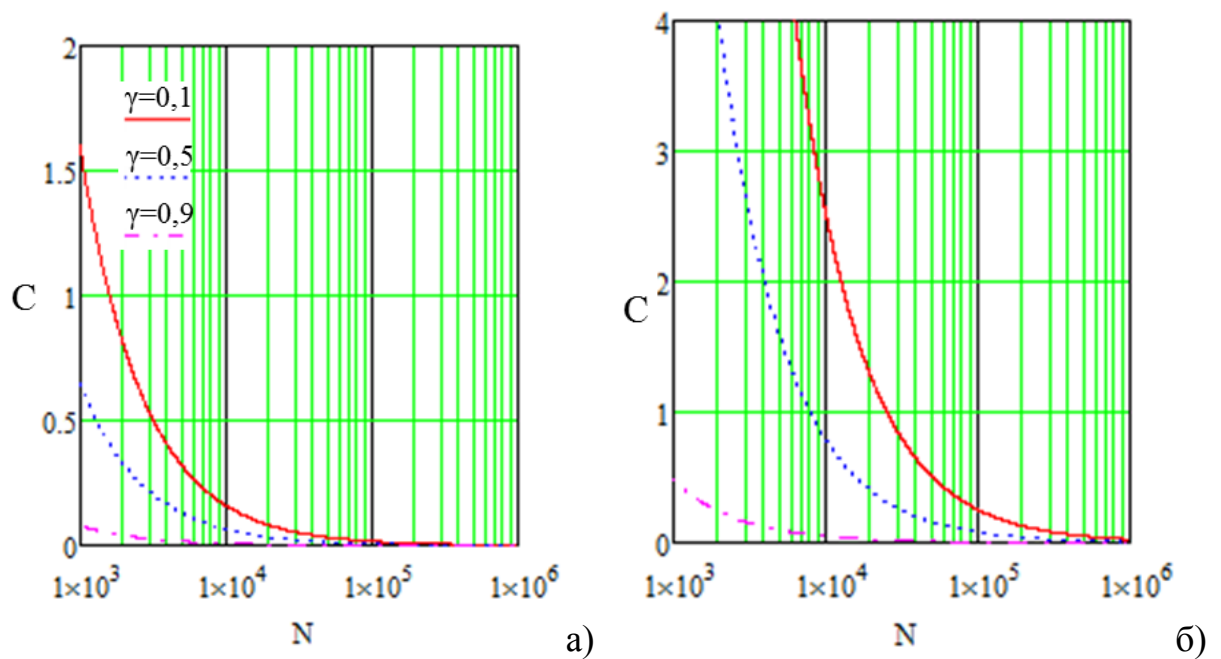


Рис. 5.25. Графік залежності коефіцієнта кластеризації від кількості вузлів

а) $\max(k)=10$ б) $\max(k)=20$

З проведених досліджень 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.

5.2. Завантаженість фотонної транспортної мережі на основі теорії випадкових графів

5.2.1. Модель Ердос-Ренеї для аналізу завантаженості мережі

Для оцінки завантаженості системи з розгалуженою структурою необхідно встановити показник якості, що визначає якість роботи мережі. Для розгалужених структур таким показником є кількість працездатних гілок. Оскільки це випадкова величина, то задамо її розподіл по Гаусу:

$$P_i(x) = \frac{(x)^i}{i!} e^{-x}, \quad (5.9)$$

Існує два показника ефективності, за якими можна оцінити завантаженість: середня кількість працездатних гілок або вузлів [317]:

$$G = \sum_{i=1}^{M_g} P_i(M_g q)(M_g - i); \quad (5.10)$$

ймовірність працездатності кількості гілок або вузлів не менше M_g

$$p_g = \sum_{i=1}^{i_0} P_i(M_g q); \quad (5.11)$$

де M_g – кількість гілок в повністю працездатній структурі, q – відносна частина гілок, що є непрацездатними, i_0 – максимально допустима кількість непрацездатних гілок.

Для наших досліджень введемо параметри, які є відносними

$$g = G/M_g. \quad (5.12)$$

Проведено дослідження, коли завантаження гілок PTN мають гаусівський розподіл. Залежність відносної кількості працездатних гілок не менше M_g визначалась з (5.12) із врахуванням співвідношення (5.10). Як бачимо з рис. 5.26, із збільшенням кількості гілок в мережі параметр p_{g1} прямує до одиниці, тобто кількість працездатних гілок не зменшується.

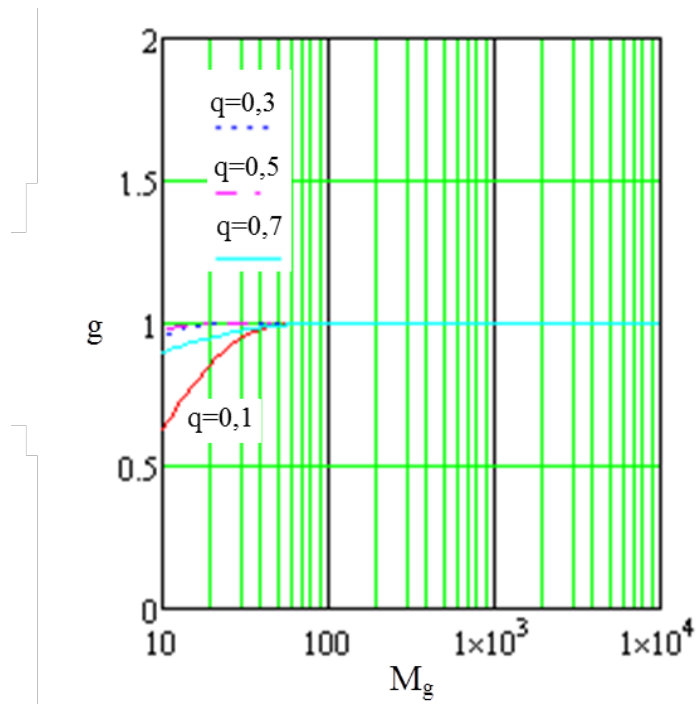


Рис. 5.26. Залежність відносної працездатності кількості гілок, не менше заданої, від загальної кількості гілок, коли $i_0=M_g$

На рис. 5.27 та рис. 5.28 розглядаються критичні випадки, коли мережа є в квазіперевантаженому та недовантаженому стані.

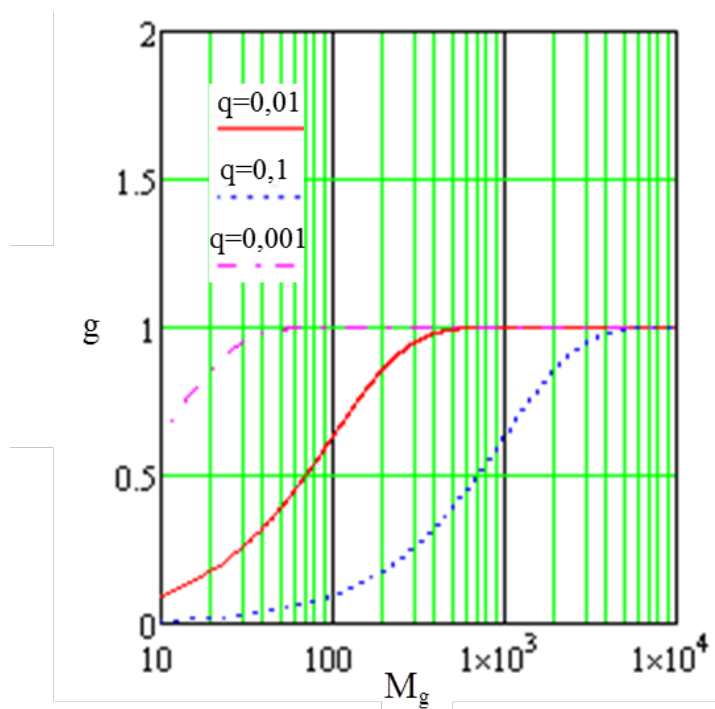


Рис. 5.27. Залежність відносної працездатності кількості гілок, не менше заданої, від загальної кількості гілок, коли $i_0=M_g$ і мережа в недовантаженому стані

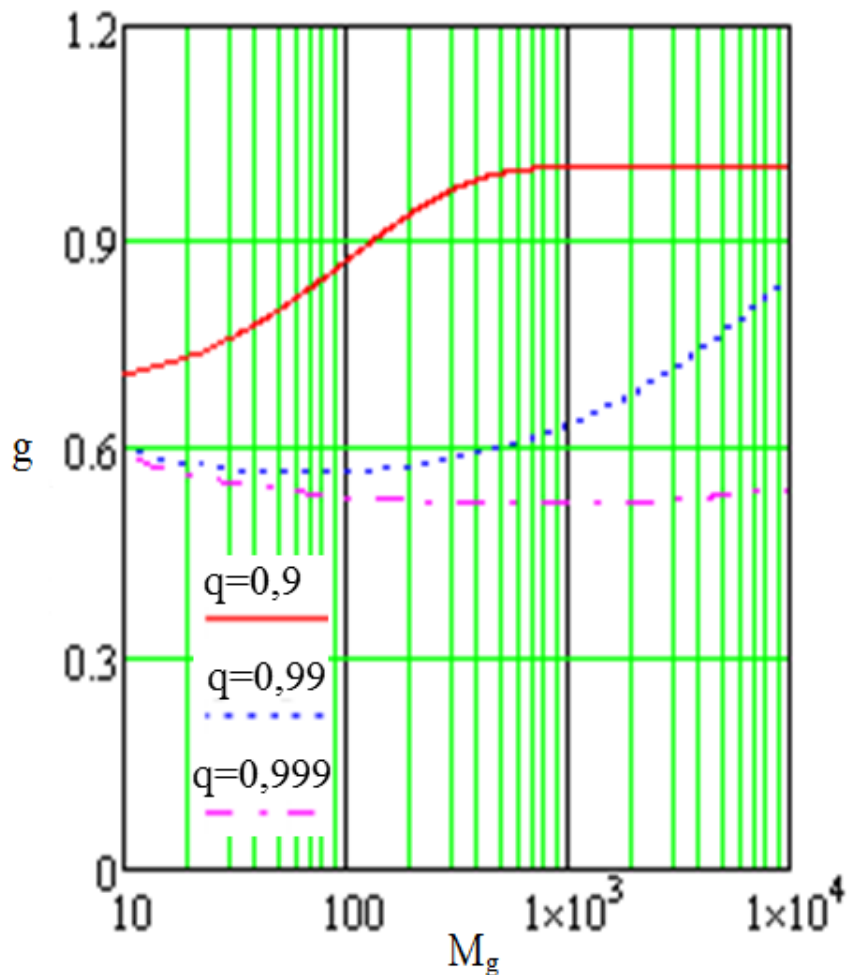


Рис. 5.28. Залежність відносної працездатності кількості гілок, не менше заданої, від загальної кількості гілок, коли $i_0 = M_g$ і мережа в квазіперевантаженому стані

З рис. 5.27 кількість працюючих гілок збільшується, коли зростає параметр M_g .

У випадку квазіперевантаженого стану мережі (рис. 5.28) спостерігаємо, що кількість працездатних гілок зменшується із наближенням параметра q до нуля.

Користуючись співвідношеннями (5.12) та (5.10), побудовано графіки залежностей відносної середньої кількості працездатних гілок при різних параметрах q (рис. 5.29, рис. 5.30, рис. 5.31).

З проведених досліджень випливає, що g при кількості вузлів більше, ніж 100 - 1000, для різних випадків є незмінним, що залежить від q .

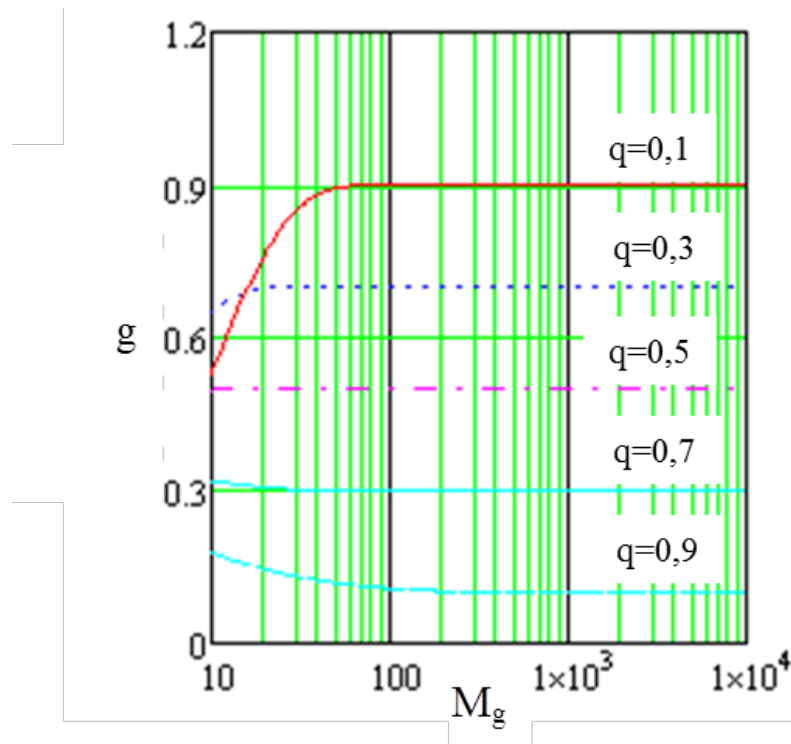


Рис. 5.29. Залежність відносної середньої кількості працюючих гілок від загальної кількості гілок

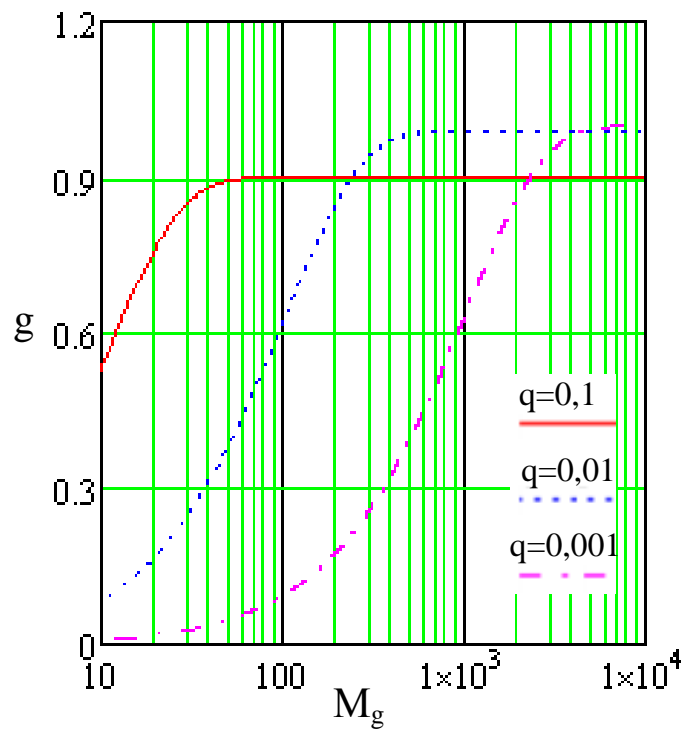


Рис. 5.30. Залежність відносної середньої кількості працюючих гілок від загальної кількості гілок, коли мережа в недовантаженому стані

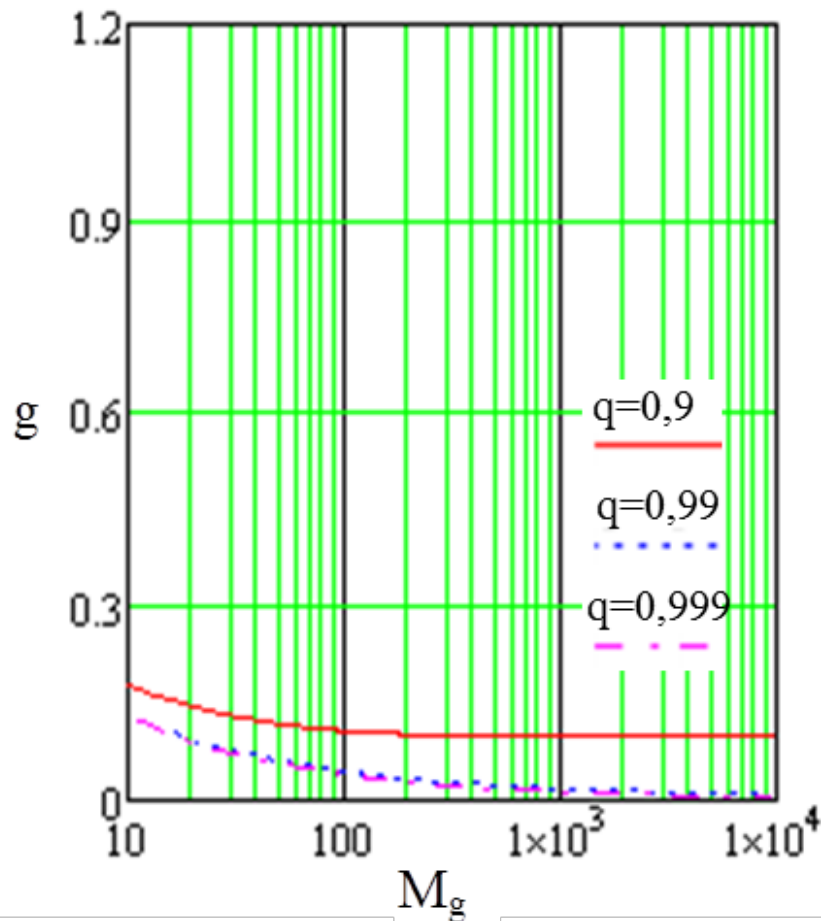


Рис. 5.31. Залежність відносної середньої кількості працездатних гілок від загальної кількості гілок, коли мережа в квазіперевантаженому стані

5.2.2. Модель Уотса-Строгатса для аналізу завантаженості фотонних транспортних мереж

Проведемо дослідження впливу завантаженості на середню довжину шляху згідно моделі Уотса-Строгатса (див. п.2.1.3.) з врахуванням (5.9) та (5.10).

При визначенні середньої довжини шляху за допомогою (2.21), побудовано графіки, коли $p=0,1$, при різних розмірностях початкових решіток в залежності від відносної частини вузлів (q_N) та гілок (q), що є непрацездатними (рис. 5.32). З рис. 5.32 спостерігаємо, що коли відносна частина вузлів, які є непрацездатними – менше 0,8, то середня довжина шляху є більшою при зростанні розмірностей початкових решіток. При наближенні параметра q_N до 1 спостерігається протилежна залежність. Це можна

пояснити тим, що з наближенням до квазіперевантаженого стану, зростає кількість вузлів, які є ізольованими. Отже, зменшується можливість передавати блок даних в транспортній мережі і зменшується середня довжина шляху. З рис. 5.32 спотерігаємо, що поведінка середньої довжини шляху від відносної частини вузлів є різною для $d=1$ та $d=2$, водночас при $d=3$ параметр $l=0$.

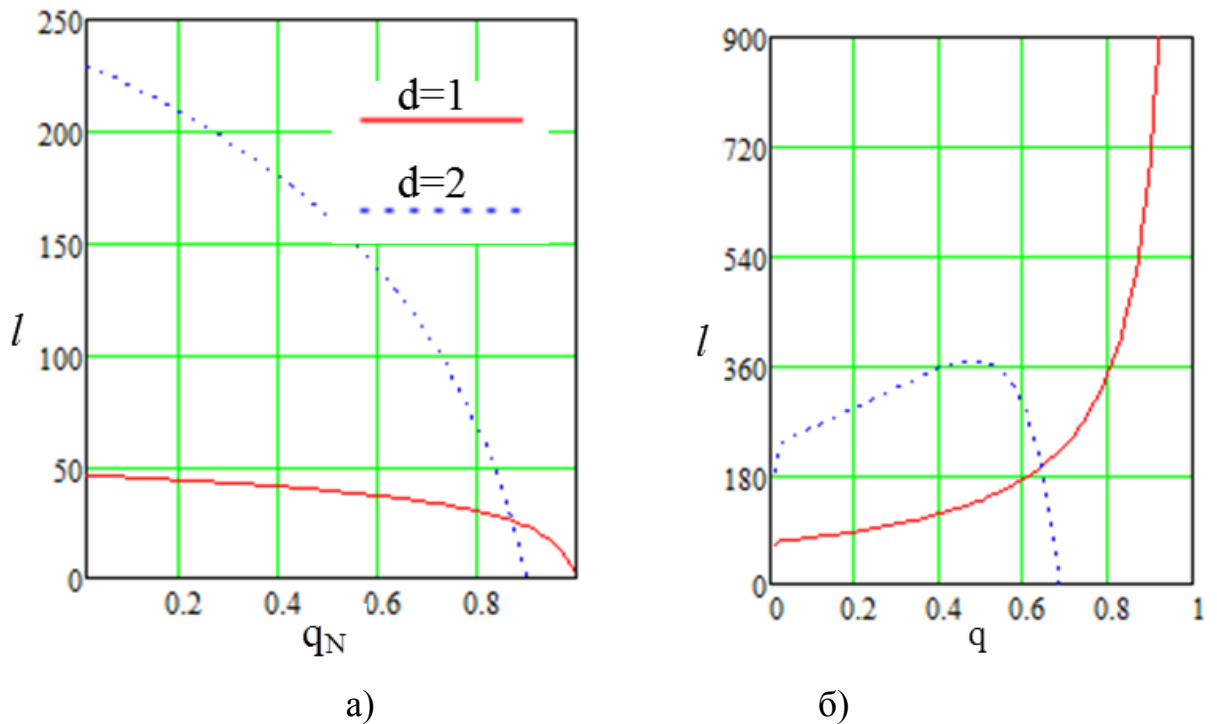


Рис. 5.32. Графіки залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними, коли $N=10^3$ та $p=0.1$

Також побудовано графік залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів та гілок, що є непрацездатними, при різних значеннях параметра p , коли $d=1$ (рис. 5.33). На даному графіку спостерігаємо очевидну тенденцію: при малих частках з'єднань між вузлами середня довжина шляху є більшою, винятком є $q > 0,99$, коли спостерігається протилежний випадок у другій частині (рис. 5.34). Це можна обґрунтувати тим, що в останньому випадку мережа вже є майже в квазіперевантаженому стані.

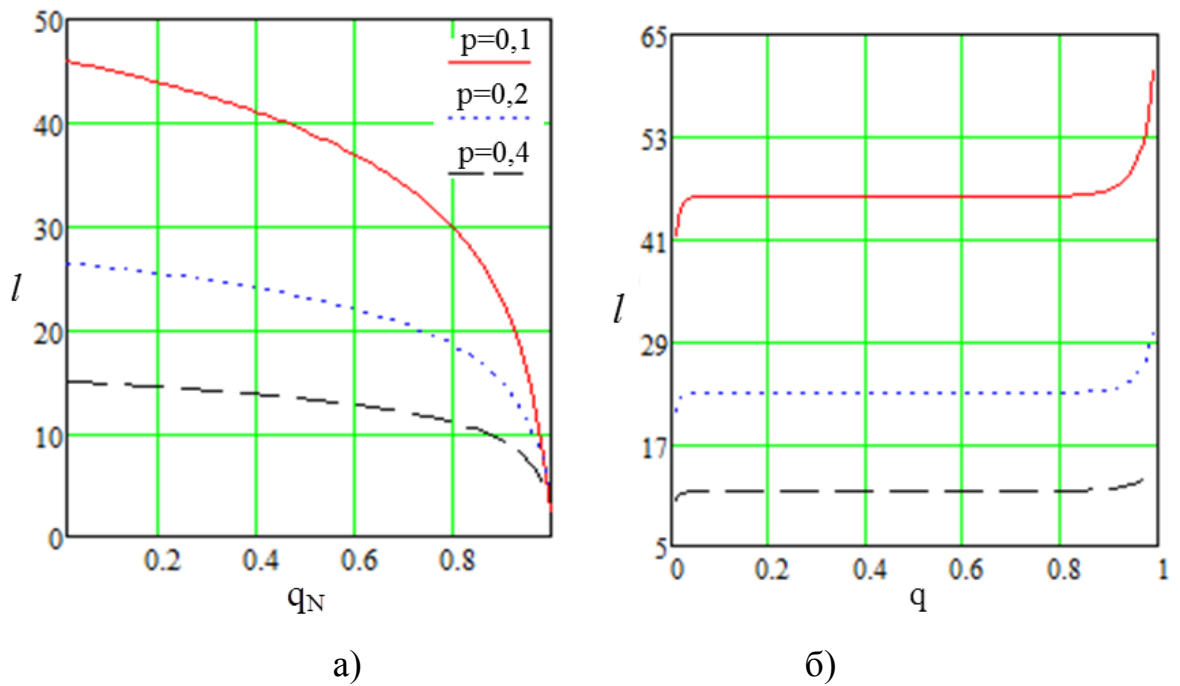


Рис. 5.33. Графіки залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними, коли $N=10^3$ та $d=1$

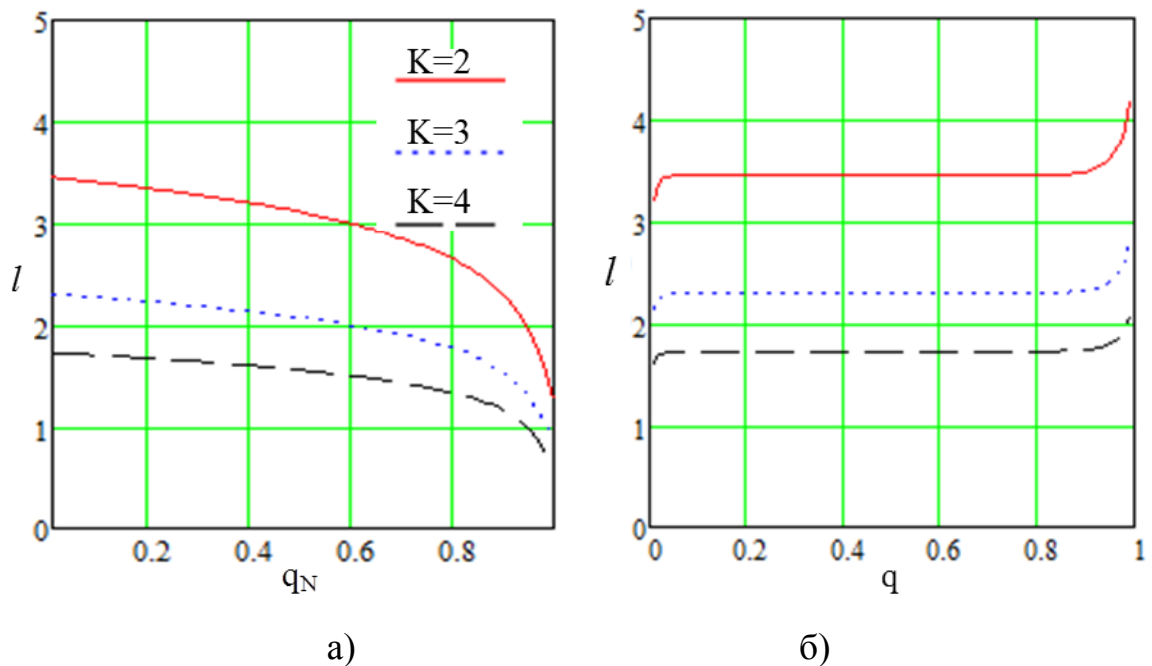


Рис. 5.34. Графіки залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними, коли $N=10^3$ та $p=0,1$

Аналогічно, користуючись формулою (2.22), побудовано графік залежності зміни середньої довжини шляху від параметра q_N та q при різних

значеннях K (рис. 5.34). З отриманого графіка спостерігаємо, що збільшення кількості з'єднань між вузлами зменшує середню довжину шляху, причому, як і в третьому розділі, коли $K=3$ і $K=4$, значення l суттєво не відрізняються.

Використовуючи формулу (2.23), побудовано залежність l від відносної частини вузлів та гілок, що є непрацездатними, коли $p=0,1$. Це відповідає транспортним мережам при розмірності початкових решіток $d=1$ при різній кількості з'єднань між вузлами (рис. 5.35). Як і в попередньому випадку спостерігаємо, що із збільшенням параметра K середня довжина шляху зменшується.

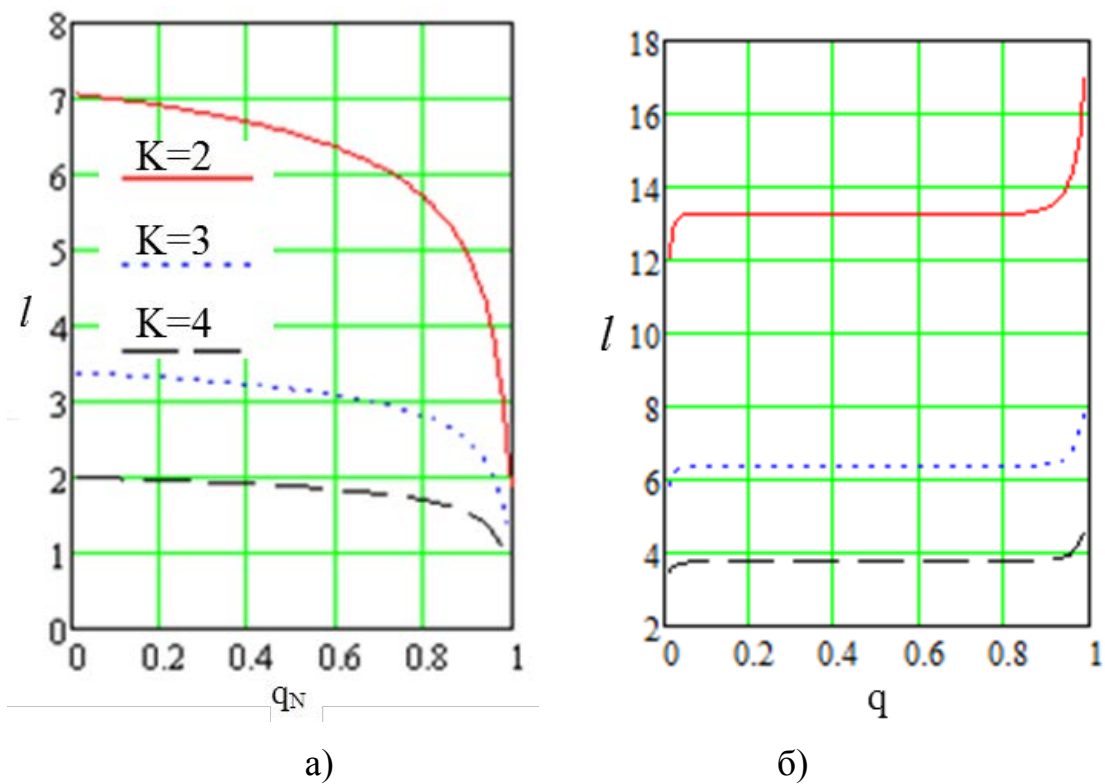


Рис.5.35. Графіки залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними, коли $N=10^3$, $d=1$ та $p=0,1$

Крім того, за допомогою формули (2.23) побудовано графік залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів та гілок, що є непрацездатними, при різних значеннях p (рис. 5.36). Важливо, що при $p=0,3$ та $p=0,4$ параметр l змінюється в незначній мірі при збільшенні непрацездатності вузлів.

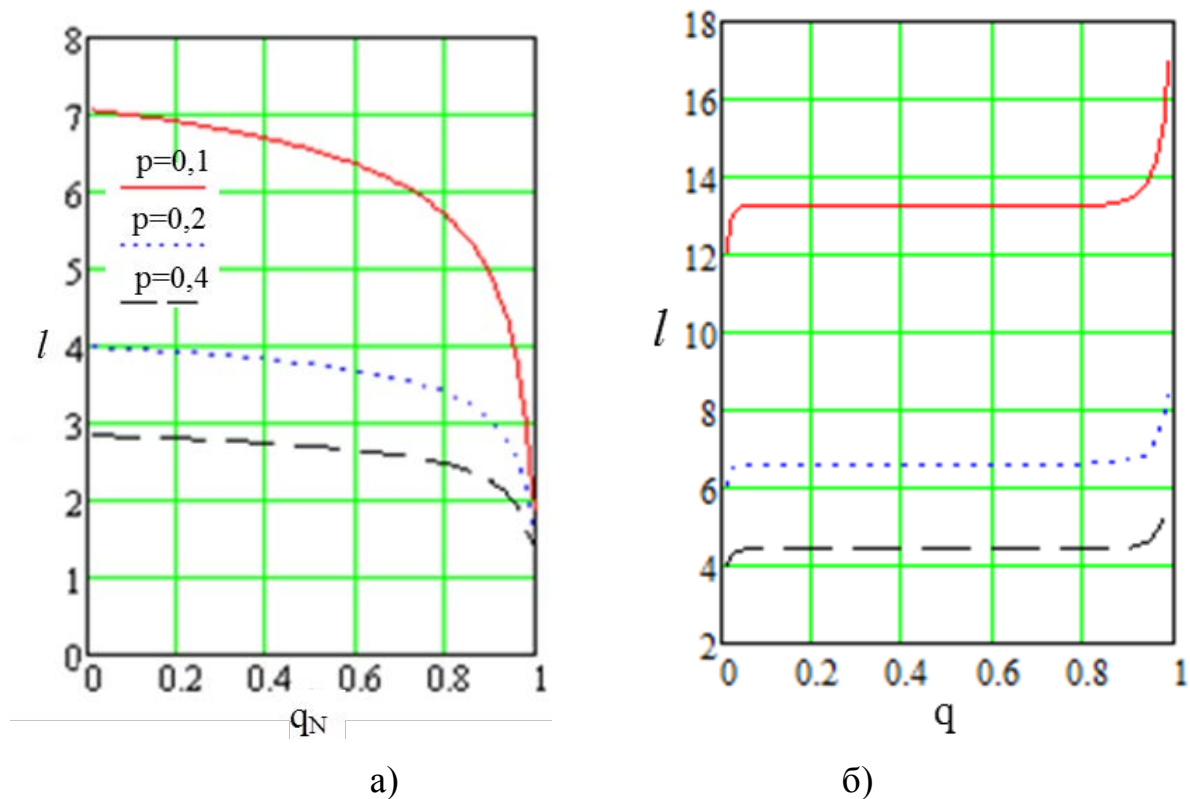


Рис.5.36. Графіки залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними, коли $N=10^3$, $K=2$ та $d=1$

Представлені графіки залежності середньої довжини шляху від відносної частини гілок, що є непрацездатними в широкому діапазоні є однаковими.

Отже, в межах моделі Уотса- Строгатса спостерігається тенденція, що залежність середньої довжини шляху від відносної частини вузлів, які є непрацездатними, має спадний характер для всіх досліджуваних випадків. Така тенденція може бути пояснена зростанням кількості ізольованих вузлів. У такому випадку передача між вузлами може здійснюватися лише на невелику довжину шляху.

5.2.3. Завантаженість в моделі безмасштабних мереж

В моделі безмасштабних мереж для РТН із використанням формули (2.26) побудовано залежності середньої довжини шляху від q для різних значень параметра γ (рис. 5.37).

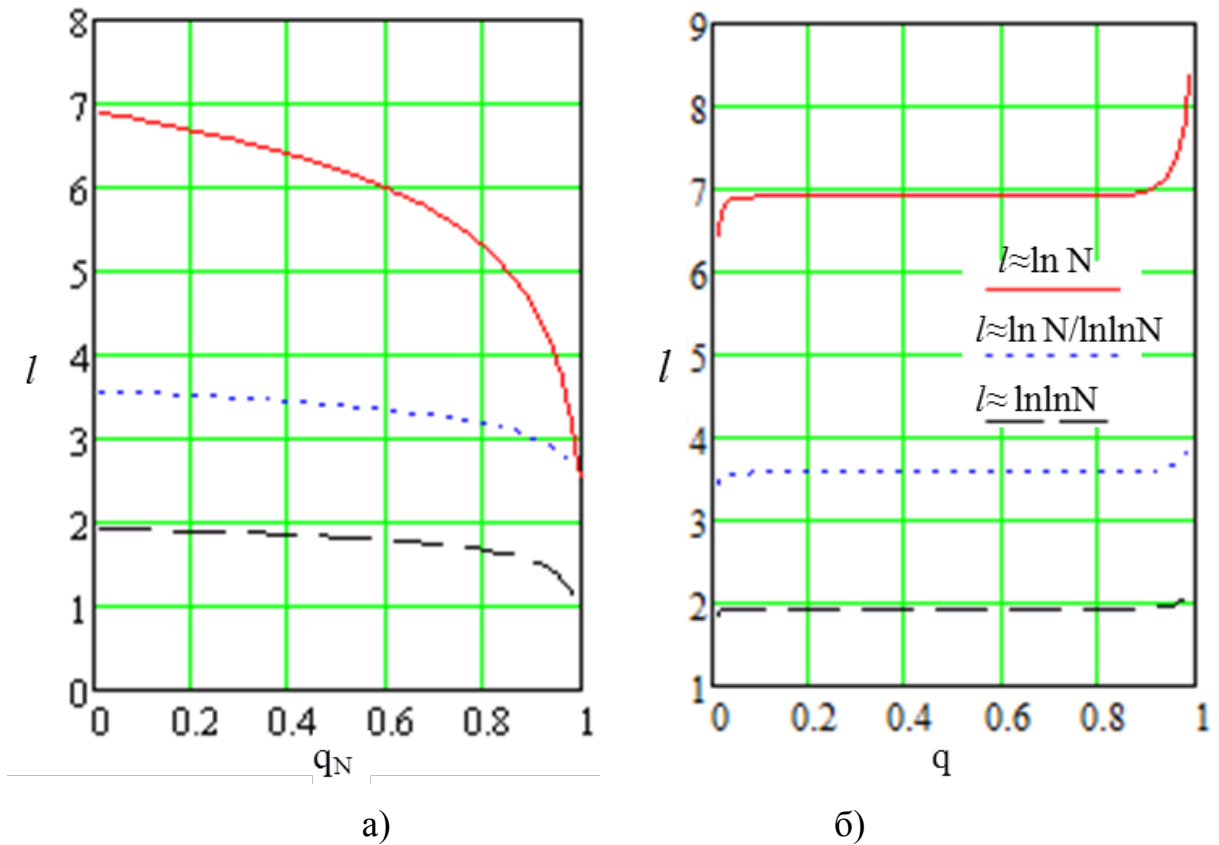


Рис. 5.37. Графіки залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними

Коефіцієнт кластеризації у безмасштабних мережах також залежить від параметра q . Зокрема, користуючись формулою (5.3), побудовано відповідну залежність на рис.5.38. З отриманої залежності спостерігаємо, що параметр k мало впливає на коефіцієнт кластеризації. Аналогічну залежність побудовано на рис.5.39, використовуючи формулу (5.4).

Користуючись формулою (5.5), побудовано графік залежності коефіцієнта кластеризації в залежності від відносної частини вузлів та гілок, що є непрацездатними при різних параметрах m_1 (рис.5.40). З представленого графіка спостерігаємо, що аналогічно графіку залежності на рис.5.38, коефіцієнт кластеризації мало залежить від параметра m_1 .

Представлені графіки залежності від відносної частини гілок, що є непрацездатними в широкому діапазоні є однаковими і для середньої довжини шляху та коефіцієнта кластеризації.

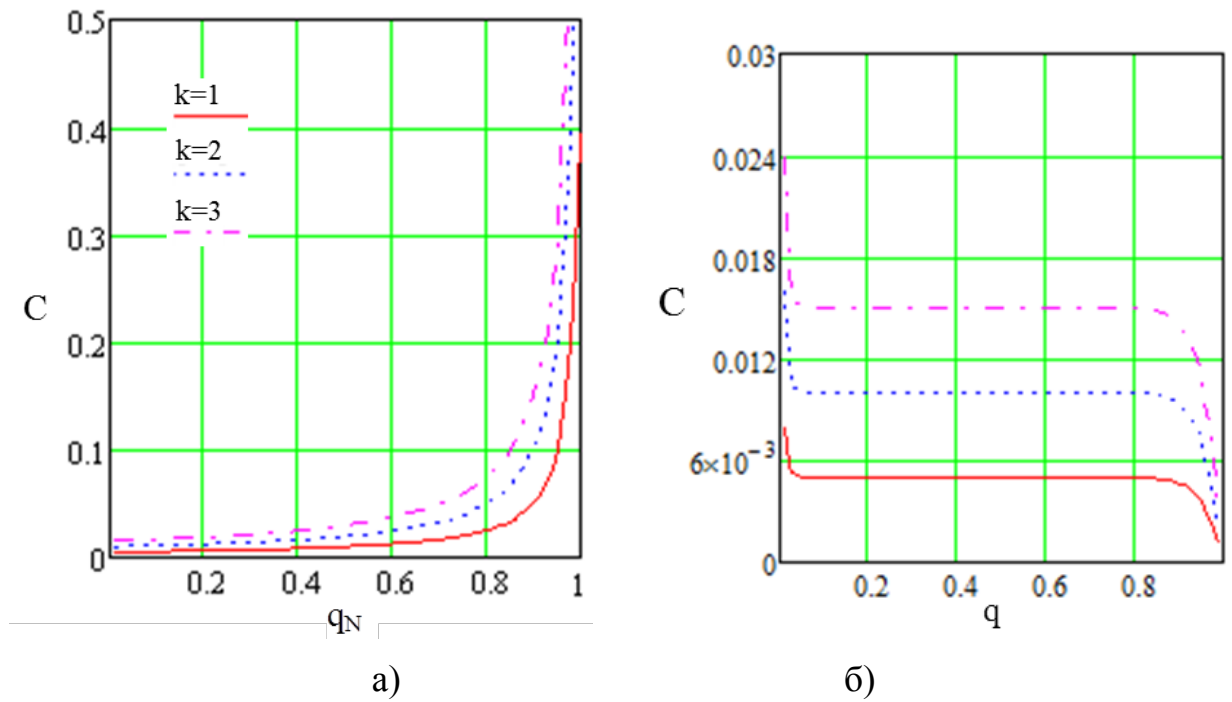


Рис. 5.38. Графіки залежності коефіцієнта кластеризації від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними

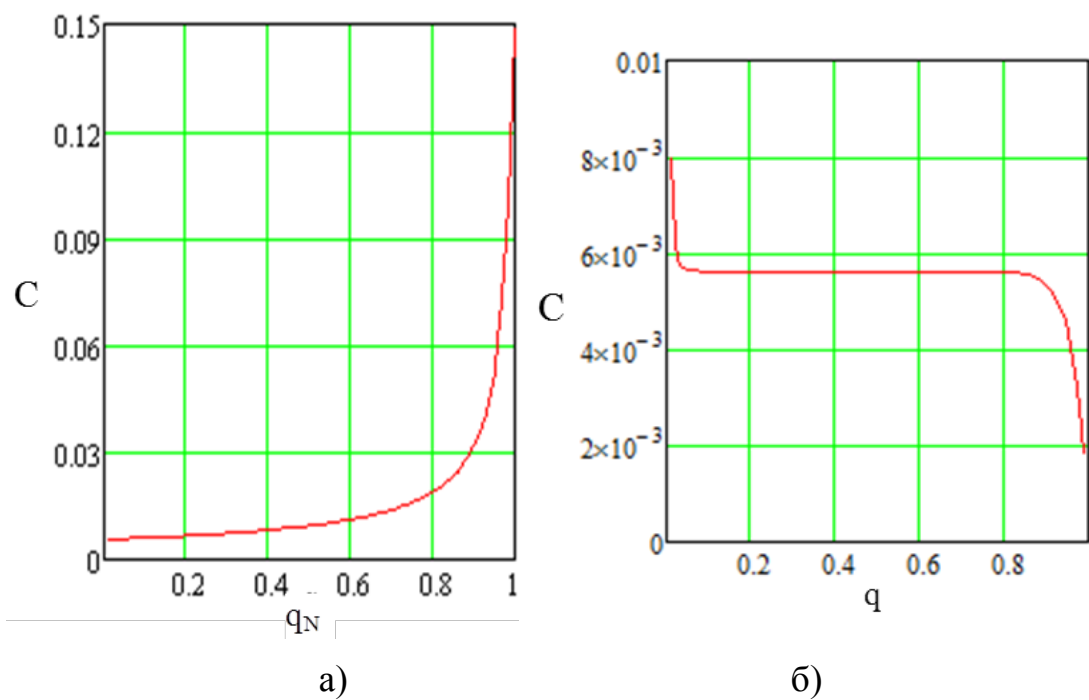


Рис. 5.39. Графіки залежності коефіцієнта кластеризації від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними згідно (5.4)

Загалом слід зауважити, що коефіцієнт кластеризації по значеннях майже співмірний для всіх розглянутих випадків в залежності від відносної частини вузлів, що є непрацездатними. З проведених досліджень

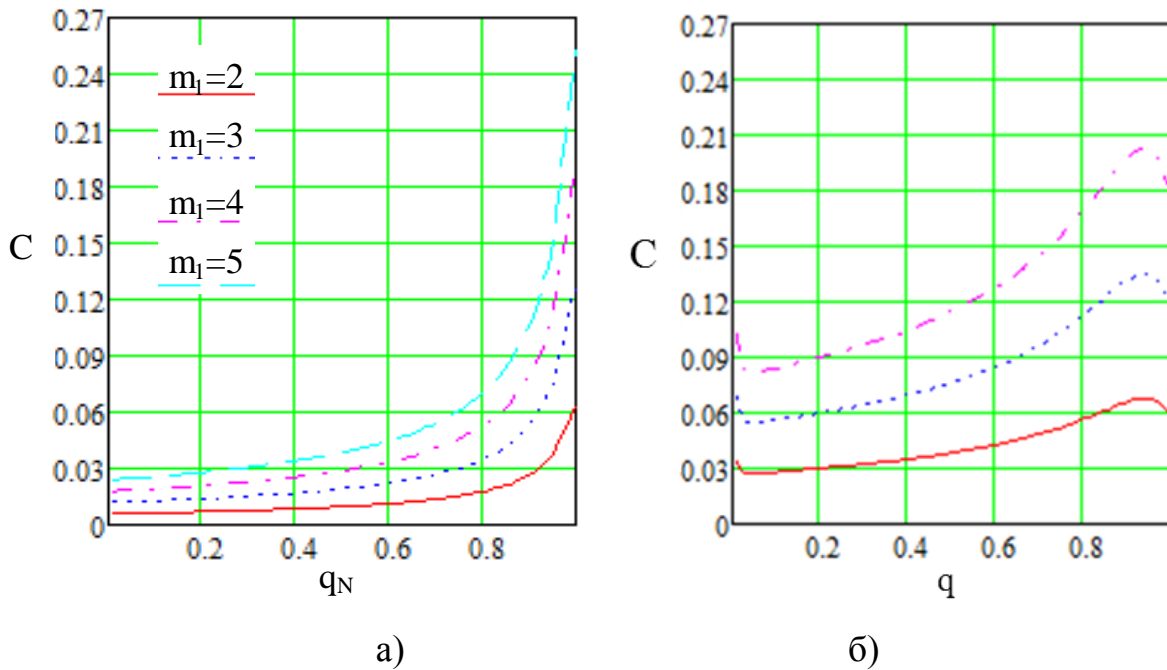


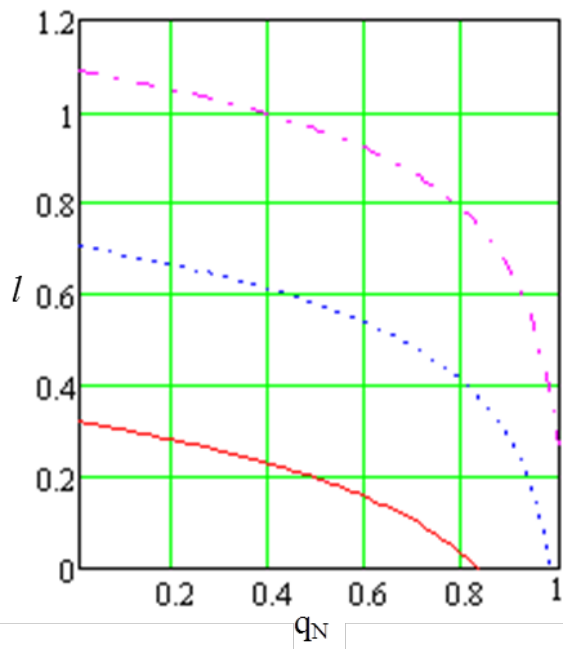
Рис. 5.40. Графіки залежності коефіцієнта кластеризації від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними

спостерігаємо, що коефіцієнт кластеризації від відносної частини вузлів, які є непрацездатними, має зростаючий характер. Причому в околі $q_N=1$ спостерігається різке збільшення коефіцієнта кластеризації, оскільки збільшується кількість кластерів у мережі.

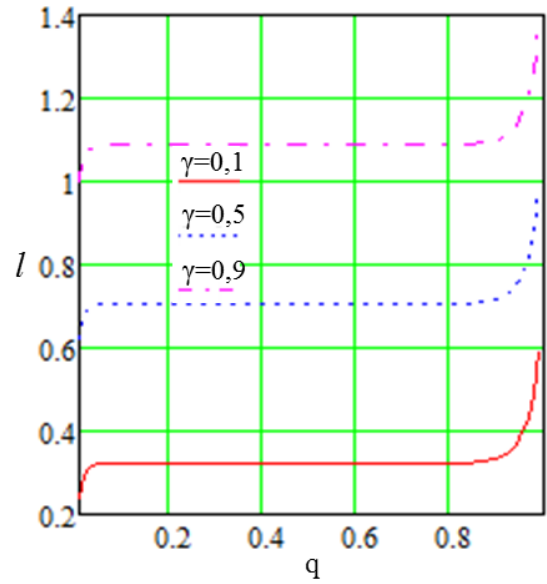
5.2.4. Завантаженість фотонної транспортної мережі в класі моделей узагальнених випадкових графів

У випадку, коли PTN відповідає моделі узагальнених випадкових графів з степеневим розподілом вершин $P(k) \sim k^{-\gamma}$, використовуючи (2.19), побудовано залежність середньої довжини шляху від відносної частини вузлів та гілок, що є непрацездатними (рис. 5.41).

Також за допомогою формули (2.20) побудовані залежності параметра l від відносної частини вузлів та гілок, що є непрацездатними при різних γ (рис. 5.42). З рис. 5.41 та рис. 5.42 спостерігаємо, що із збільшенням параметра γ середня довжина шляху збільшується у розглянутому випадку PTN.

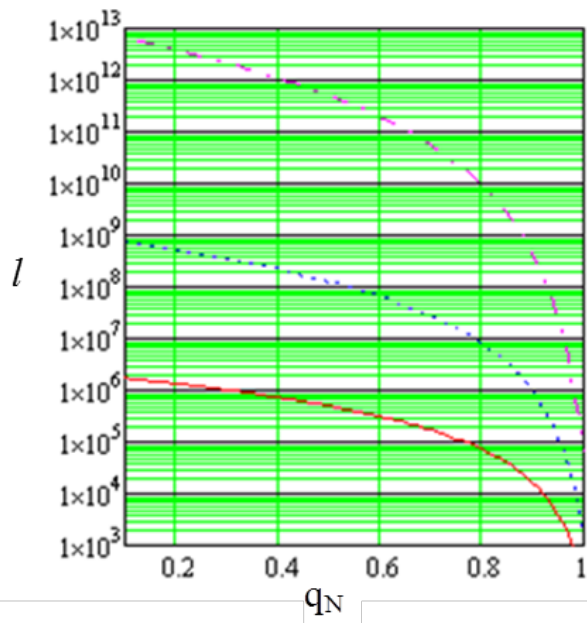


а)

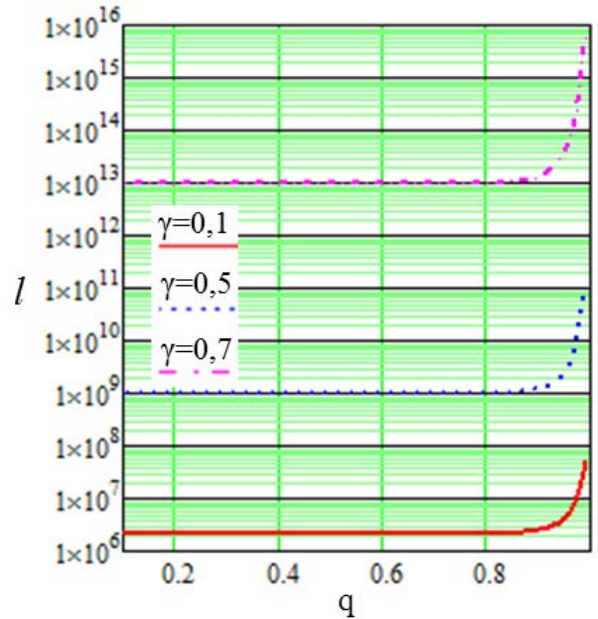


б)

Рис. 5.41. Графіки залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними



а)



б)

Рис. 5.42. Графіки залежності середньої довжини шляху від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними

Для узагальнених випадкових графів і використовуючи формулу (5.8),

також визначено залежність коефіцієнта кластеризації від параметра q (рис. 5.43).

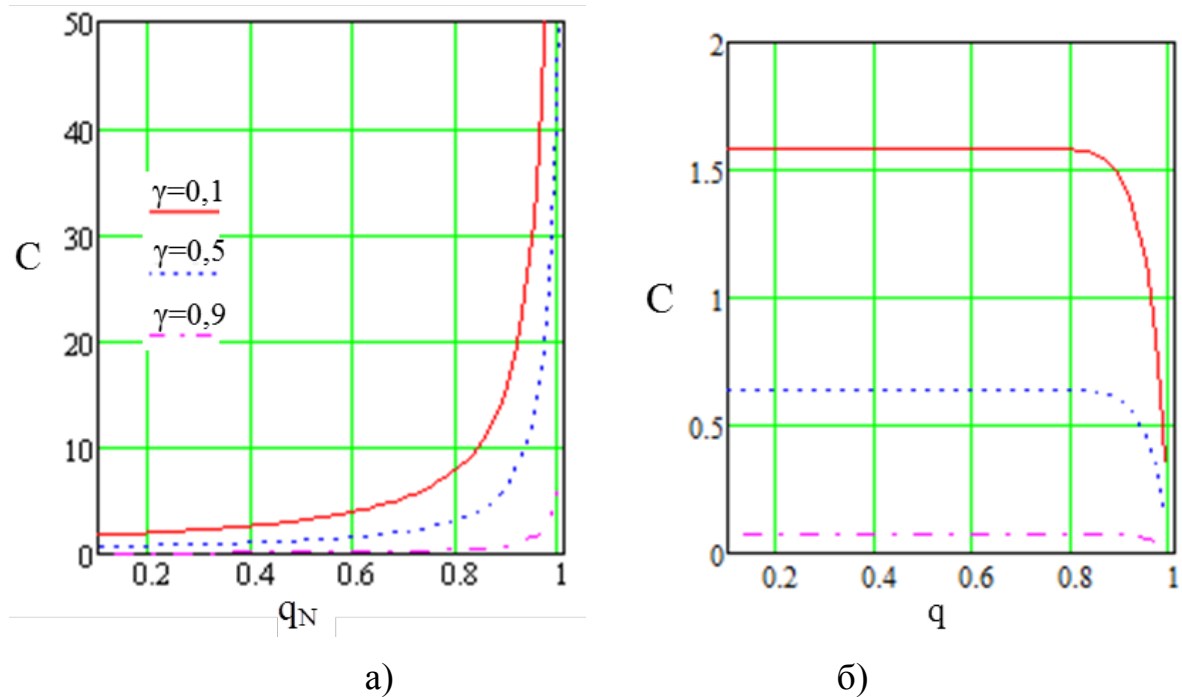


Рис. 5.43. Графіки залежності коефіцієнта кластеризації від відносної частини вузлів (а) та гілок (б), що є непрацездатними

Порівнюючи представлені графіки залежностей, спостерігаємо, що із збільшенням відносної частини вузлів, які є непрацездатними, середня довжина шляху зменшується. Тобто середня довжина шляхів визначається як середня довжина лише всіх існуючих довжин між вузлами і не враховує відсутності будь-якого зв'язку між вузлами.

Представлені графіки залежності від відносної частини гілок, що є непрацездатними в широкому діапазоні є однаковими, як і в поперерніх досліджуваних моделях випадкового графу.

На відміну від параметра l , коефіцієнт кластеризації збільшується із зростанням кількості непрацездатних вузлів, а середня довжина шляху – зменшується. Це можна пояснити тим, що при збільшенні параметра q в першу чергу зменшуються зв'язки між кластерами у PTN, що відповідає моделі узагальнених випадкових графів.

5.3. Дослідження фотонної транспортної мережі з кільцевою топологією на основі теорії перколяції

Однією із задач транспортної мережі є вивчення механізму контролю навантаження мережі. Це доцільно робити за допомогою теорії перколяції.

Зазвичай при передачі даних є велика кількість шляхів, які можуть бути використані. У певний момент часу кількість шляхів значно зменшується, інколи до нуля.

З точки зору зв'язної перколяції для PTN канали є зайнятими в певний момент часу із ймовірністю p_z , а вільними $1-p_z$. Відповідно для позиційній перколяції розглядають комутаційне з'єднання між різними каналами є зайнятими в певний момент часу із ймовірністю p_p , а вільними $1-p_p$. Необхідно зауважити, що згідно теорії позиційної перколяції всі канали вільні завжди.

Для визначення можливості передачі між вузлами використовувались: тензорний аналіз, транспортна задача [13] та випадкові графи.

При проведенні моделювання зв'язної перколяції вибирався випадковим чином канал, який був зайнятий і визначалась кількість невзаємодіючих кінцевих пар вузлів. При дослідженні зв'язної перколяції проводилося аналогічне моделювання, тільки випадковим чином було зайняте комутаційне з'єднання між різними каналами.

Моделювання на основі теорії перколяції показали, що кількість місць у буфері для ефективного використання OTN має бути не менше чотирьох і не більше шести [51]. Зазначимо, що аналогічний результат отримано в п.6.2.

Згідно наших досліджень, в OTN кільцевої топології чорний та білий єдиний кластер (див п.2.1.5.) спостерігаються майже завжди при реальній завантаженості мережі (рис. 5.44 та рис. 5.45) [51]. Визначення кластера здійснювалось за алгоритмом пошуку в ширину згідно п.2.1.2.

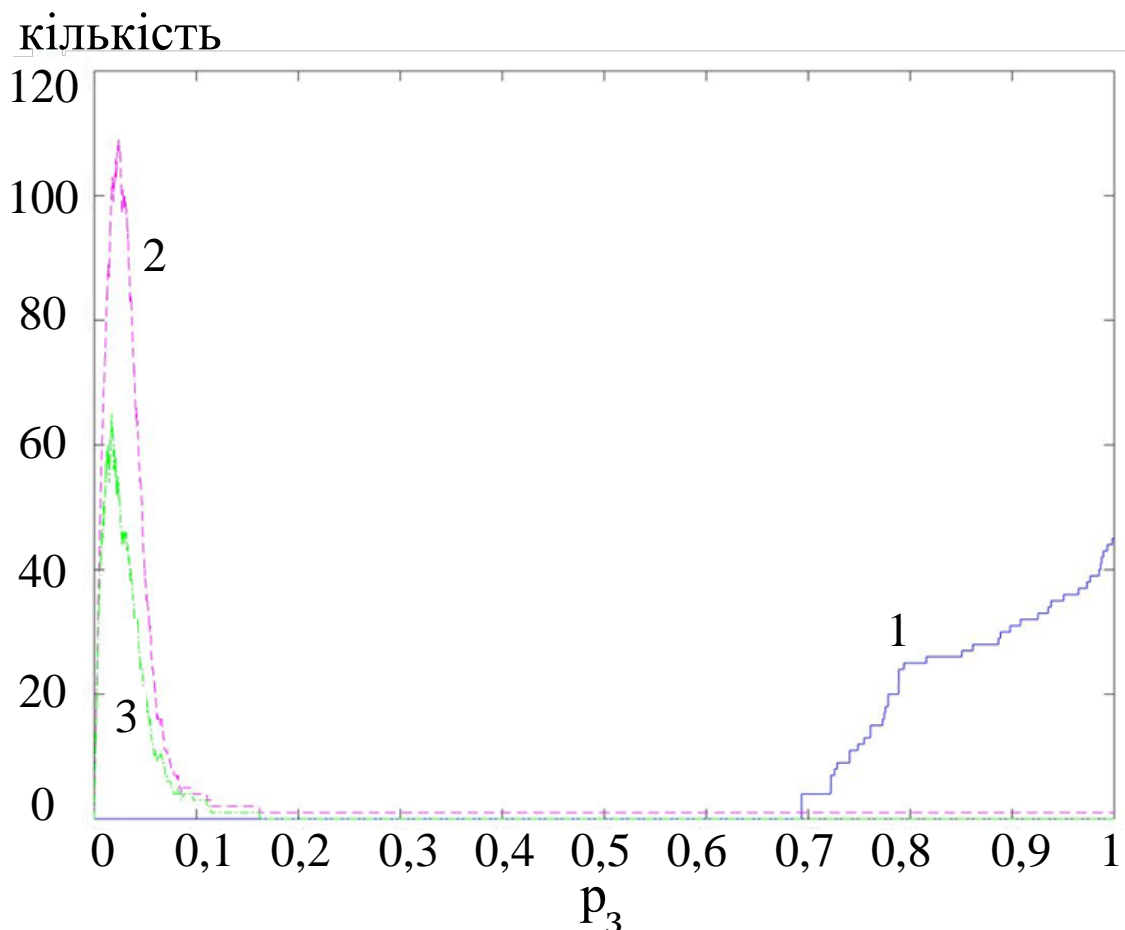


Рис. 5.44. Графік залежності кількості: 1) не взаємодіючих кінцевих пар вузлів; 2) кластерів; 3) кластерів з мінімальним розміром ймовірності p_3 при зв'язній перколяції (кількість вузлів – 10 , кількість каналів між вузлами – 32)

Водночас для забезпечення повного зв'язку між усіма вузлами мережі необхідно враховувати кількість кластерів різних розмірів. Кількість не взаємодіючих кінцевих пар вузлів при позиційній перколяції в залежності від p_n може різко збільшуватись (рис.5.45).

В роботі проведено аналіз випадку, коли деякі кінцеві вузли втрачали зв'язок між собою [51]. Розглядався варіант, коли в мережі вивільняються транзитні вузли, щоб відновити зв'язок між усіма кінцевими вузлами (рис.5.46). Дослідження показали, що у більшості випадків це можна досягти одразу. Хоча потрібно зазначити, що спостерігалися випадки, коли необхідно

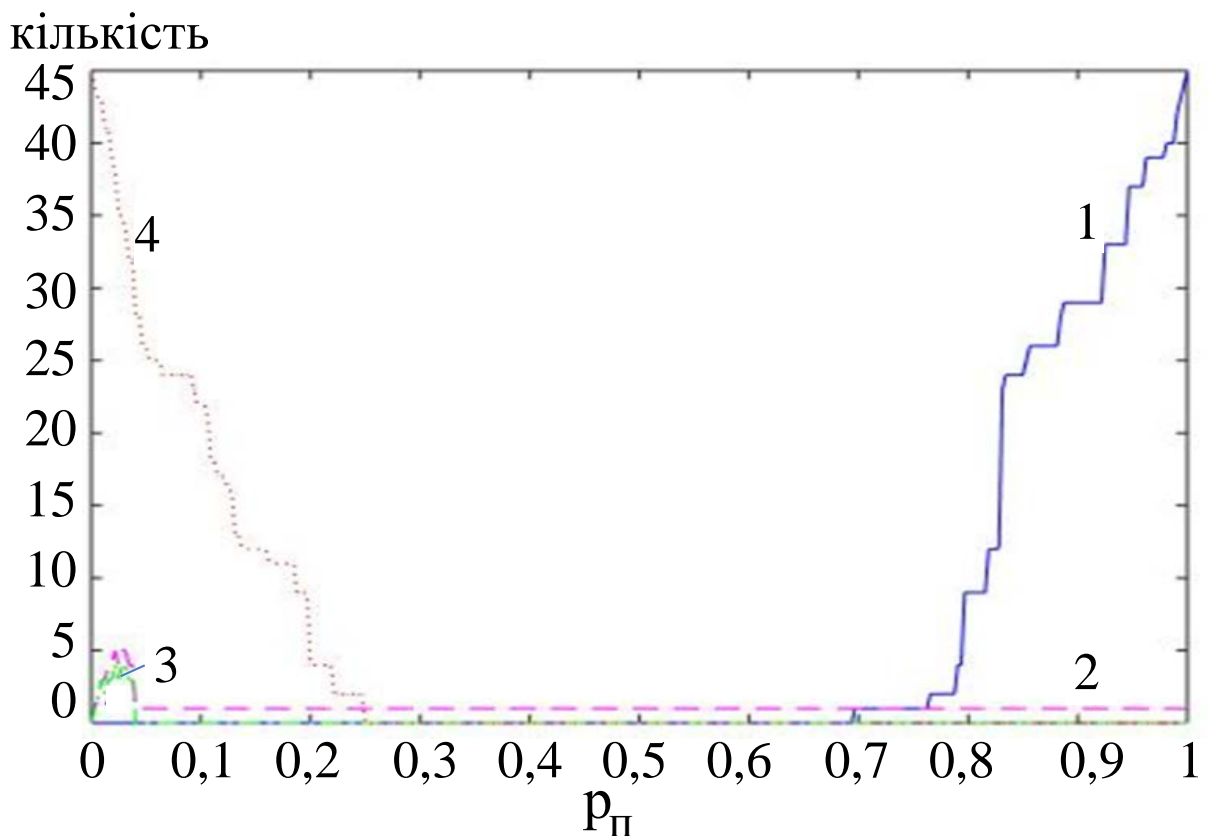


Рис. 5.45. Графік залежності кількості: 1) не взаємодіючих кінцевих пар вузлів; 2) кластерів; 3) кластерів з мінімальним розміром; 4) не взаємодіючих кінцевих пар вузлів для білої перколяції, від ймовірності p_{Π} при позиційній перколяції (кількість вузлів – 10; кількість каналів між вузлами – 32) [51]

було значну кількість вузлів вивільнити, щоб встановити необхідний зв'язок між усіма парами кінцевих вузлів.

З рис. 5.45 та рис. 5.47 спостерігаємо, що кількість невзаємодіючих кінцевих пар вузлів не є симетричною для чорної та білої перколяції. Визначено, що $p_{ск}=0,863$ для чорної та $p_{ск}=0,168$ для білої перколяції, а білий кластер зникає, коли $p_c=0,9789$, тоді як чорний кластер з'являється при $p_c=0,00894$. (Параметр p_c розглядався у п.1.3.1 та разом з $p_{ск}$ в п.2.1.4). Зазначимо, що тут $p_{ск}$ параметр розглядається як границя, коли хоч між однією парою вузлів зв'язку не існує.

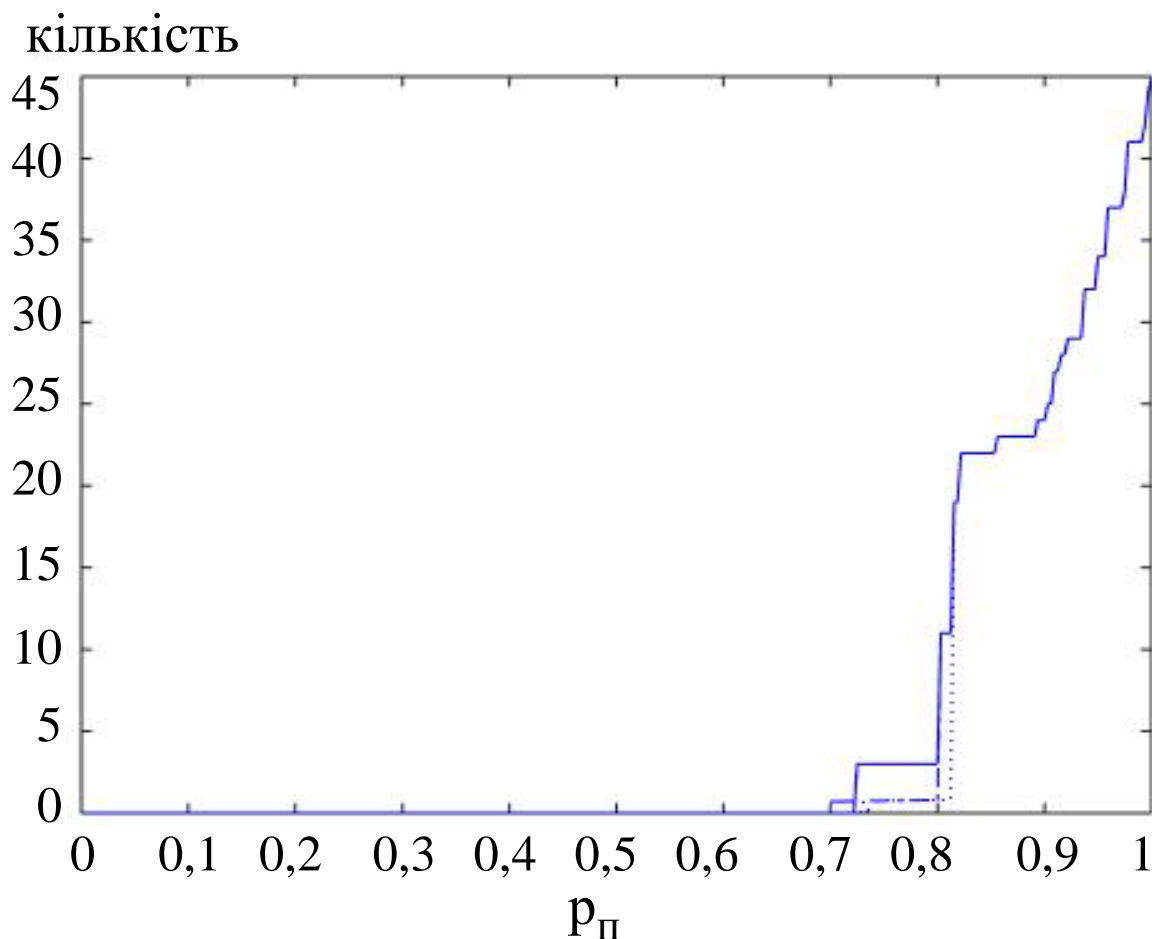


Рис. 5.46. Графік залежності кількості не взаємодіючих кінцевих пар вузлів (суцільна лінія) і від кількості транзитних вузлів, що вивільняються до повної взаємодії всіх кінцевих вузлів від ймовірності p_p при позиційній перколяції (кількість вузлів – 10; кількість каналів між вузлами – 32)

Представлені результати для наочності показані для малої кількості каналів між вузлами. При збільшенні кількості каналів до 128 на рис. 5.47 спостерігаємо, що кількість кластерів може бути більше одного і з'являється гігантський (єдиний) кластер при $p_c=0,00894$.

На перший погляд існування чи не існування білого або чорного кластера пов'язано з p_c . З рис 5.45 та рис. 5.47 спостерігаємо, що можливе одночасне існування єдиного чорного та білого кластера в мережі. Причому параметр $p_{ск}$ для чорної і білої перколяції виникає, коли існує єдиний кластер в обох перколяціях.

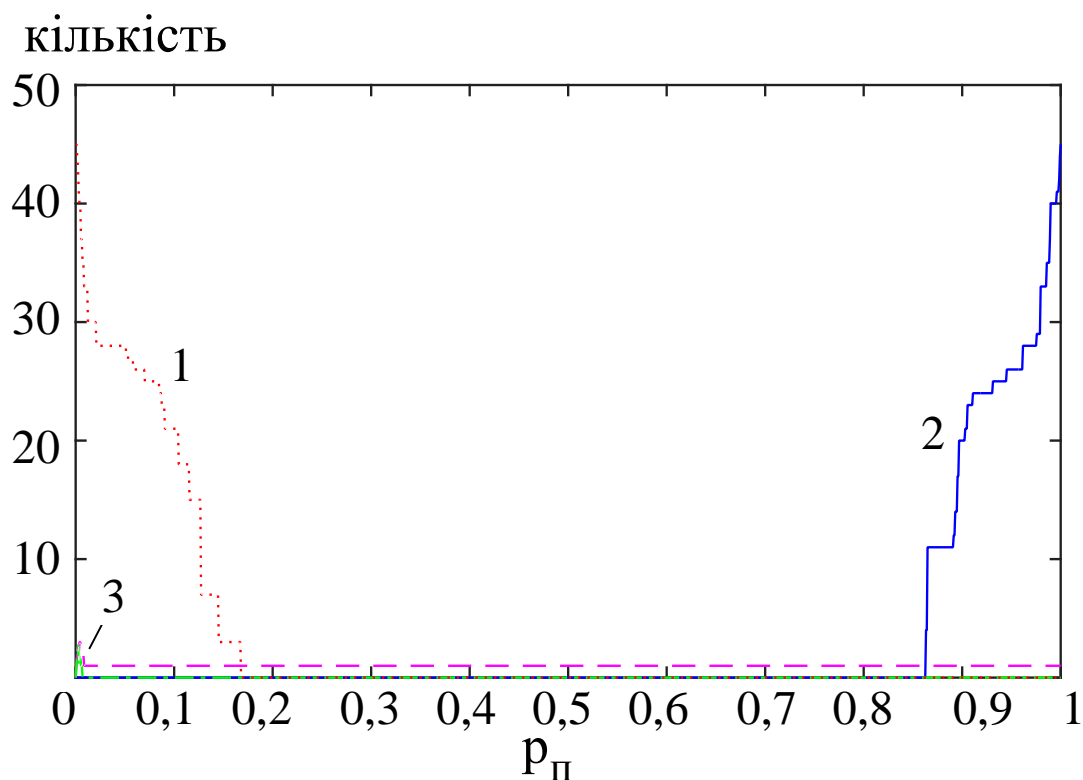


Рис. 5.47. Графік залежності кількості: 1) не взаємодіючих кінцевих пар вузлів; 2) не взаємодіючих кінцевих пар вузлів для білої перколяції; 3) кластерів від ймовірності p_p при позиційній перколяції (кількість вузлів – 10; кількість каналів між вузлами – 128)

Висновки до розділу 5

1. Проведено дослідження топологічних властивостей PTN з використанням теорії випадкових графів. 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. 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 коефіцієнт кластеризації і середня довжина шляху зменшуються. Це можна пояснити тим, що зі зростанням збільшується зв'язність між вузлами.

2. На основі проведених досліджень впливає, що 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 мережі згідно моделі Барабаші-Альберта має спадний характер, причому при великій кількості вузлів суттєво не змінюється. З проведених досліджень на основі моделі Ердос-Ренеї впливає, що 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.

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

4. При дослідженні завантаженості PTN за моделями Уотса-Строгатса, Барабаші-Альберта та узагальнених випадкових графів виявлено, що із збільшенням відносної частини вузлів, які є непрацездатними, середня довжина шляху зменшується, що пояснюється зростанням кількості ізольованих вузлів у мережі. Виявлено, що коефіцієнт кластеризації збільшується із зростанням кількості непрацездатних вузлів. У такому випадку передача між вузлами може здійснюватися тільки на невелику довжину шляху. Встановлено, що графіки залежності відносної частини непрацездатних гілок від середньої довжини шляху та коефіцієнта кластеризації у всіх досліджуваних моделях випадкового графа в широкому діапазоні є однаковими.

5. Запропоновано використання теорії перколяції для контролю і керування навантаження PTN. Досліджено виникнення кластерів різних

розмірів та кількості, а також поява 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.

РОЗДІЛ 6. МОДЕЛЮВАННЯ ТА ПРАКТИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ВИКОРИСТАННЯ ОПТИЧНОЇ КОМУТАЦІЇ БЛОКІВ У ФОТОННИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖАХ

У системах оптичної комутації сигнал комутується в оптичному вигляді. Принцип роботи оптичного комутатора полягає в перемиканні оптичного потоку з певною довжиною хвилі з одного каналу в інший з можливою зміною довжини хвилі без ОЕО перетворення [65].

Основною метою такої комутації є підвищення швидкодії функціонування систем розподілу за рахунок зменшення часу комутації. В реальних системах затримка комутації становить біля 60% загальної затримки. Це зумовлено складністю процедури перетворення сигналу з оптичної форми в електричну і навпаки. Виключення даної процедури з процесу комутації дозволить значно зменшити часові затримки, а також стабілізувати джитер в оптичних телекомунікаційних мережах. Структурна схема оптичного комутатора DWDM розмірністю 4x4 представлена на рис. 6.1.

Основна ідея полягає в комутації кожної довжини хвилі довільного вхідного каналу в довжину хвилі довільного вихідного каналу без ОЕО перетворення. Розглянемо роботу такої схеми. Ключовими елементами є комутаційні матриці, які відповідають за вибіркове пропускання окремих спектральних складових на один з виходів. Комутаційні матриці можуть бути складені з рідкокристалічних елементів або з ФК пристроїв, або з АО комірок. Один рядок відповідає одній довжині хвилі, а стовпець – вихідному каналу відповідно. Вхідні канали розділяються мультиплексором на окремі спектральні складові, які поступають на вхід циліндричної лінзи і розсіюються по рядках.

Таким чином збираються 4 групи довжин хвиль, які поступають на входи узгоджуючих блоків, в яких аналізується відповідність довжин хвиль і при необхідності здійснюється їх конвертація. На виході узгоджуючого

блоку виходить повний набір довжин хвиль: $\tilde{\lambda}_1, \tilde{\lambda}_2, \tilde{\lambda}_3, \tilde{\lambda}_4$, які поступають на вхід мультиплексора і ущільнюються в канал.

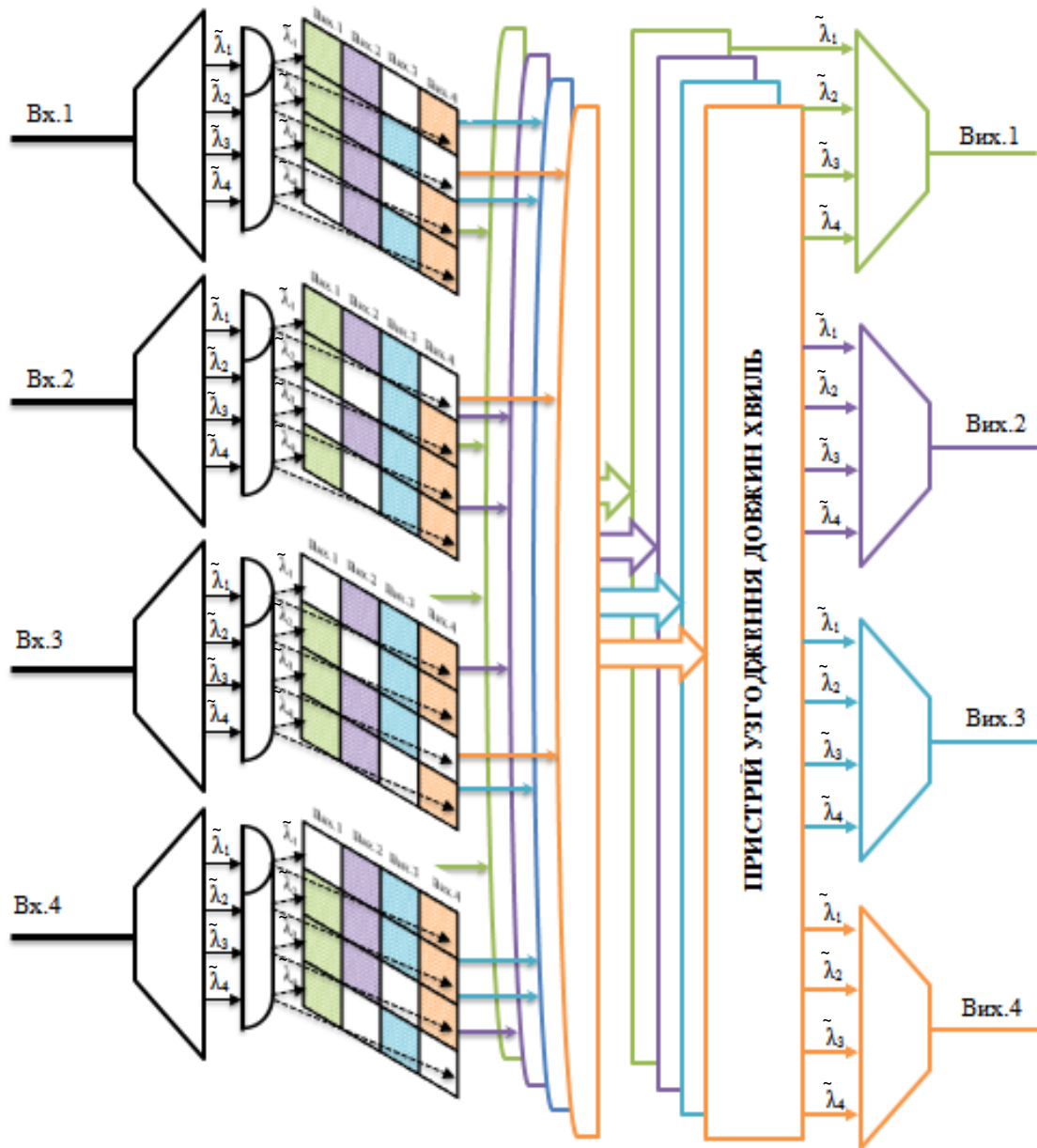


Рис. 6.1. Структурна схема просторово-спектрального комутатора [66]

6.1. Модель оптичного комутатора на основі акустооптичних комірок

АО комірки сьогодні активно використовуються при розробці і виробництві широкого спектру лазерної та оптичної апаратури, функціонуючої в ультрафіолетовій, видимій та інфрачервоній областях оптичного спектру [9]. АО прилади не містять рухомих механічних частин і

управляються електронним сигналом, що визначає їх високу швидкодію і широкі функціональні можливості. Саме АО методи управління світлом найбільш ефективні при розробці оптичних комутаційних вузлів.

При поширенні плоскої акустичної хвилі, внаслідок ефекту фотопружності в середовищі утворюються періодичні шари зміни показника заломлення, які для падаючого світла є періодичними дифракційними ґратками, що рухаються із швидкістю звуку. Світло, що проходить через таке середовище, відхиляється у режимі Бреґа на кут (1.14). Таким чином, відхилений оптичний сигнал комутується з матрицею вихідних ООВ внаслідок АО взаємодії [50].

АО комутатор здійснює оптичну апаратну комутацію, зв'язуючи вхідні ООВ з волокнами вихідного оптоволоконного масиву. На рис. 6.2 для спрощення представлено АО комутатор для комутації однієї довжини хвилі у волоконно-оптичний масив 3 складений з $m \cdot K_1$ оптичних портів, які розміщені у формі прямокутної матриці [17].

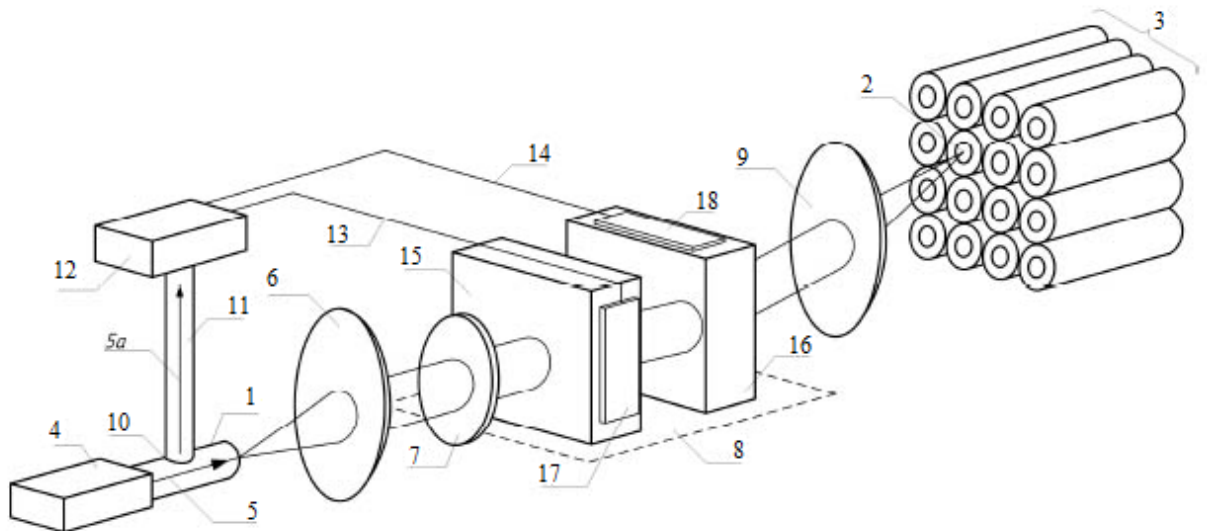


Рис. 6.2. Модель АО комутатора

Вхідний сигнал 5 поступає по ООВ 1. Сигнал фокусується лінзою 6 на пристрій повороту площини поляризації 7. Площина поляризації сигналу

повертається так, щоб сигнал попадав на лінзу 9 з максимальною інтенсивністю.

Сплітер 10 розділяє оптичний сигнал 5 таким чином, щоб сигнал 5а, ідентичний сигналу 5, передавався контролеру 12. Даний комутатор дозволяє комутувати сигнал у двох площинах. В залежності від сигналів контролера, двохкоординатна АО комірка 8 відхиляє оптичний сигнал 5. Відхилений оптичний сигнал проектується через лінзу 9 у відповідний вихідний порт масиву 3.

В роботі запропоновано використовувати двохкоординатну АО комірку, яка складається з двох кристалів. Кожен кристал відхиляє світловий промінь внаслідок АО взаємодії в режимі Брега. З рис. 6.2 спостерігаємо, що п'єзоперетворювачі 17 та 18 розташовані таким чином, що акустичні хвилі в кожному з кристалів поширюються перпендикулярно одна до одної, а, отже, одна АО комірка відхиляє промінь по горизонталі, а інша – по вертикалі.

Нехай для відхилення світлового сигналу однією АО коміркою на сусіднє волокно необхідна акустична потужність P_a . У такому разі при $m \cdot K_1$ оптичних портів максимальна акустична потужність при відхиленні світлового сигналу становить $(m + K_1) \cdot P_a$ для моделі на рис. 6.2. При використанні однокоординатної АО комірки, коли замість двохкоординатної АО комірки 8 використовується лише одна АО комірка, необхідна максимальна акустична потужність становить вже $m \cdot K_1 P_a$. Нехай $m = K_1$, тоді максимальні акустичні потужності при відхиленні світлового сигналу для кожного відповідного випадку становлять $2mP_a$ та m^2P_a , відповідно. Отже, споживана акустична потужність двохкоординатного АО комутатора порівняно з однокоординатним є меншою у $m/2$ рази, коли $m = K_1$.

Запропонована архітектура АО комутатора працює в двох режимах передачі даних – комутації транспортних модулів канального рівня або комутації оптичних каналів з резервуванням відповідних часових і частотних ресурсів мережі. В першому режимі відбувається комутація кожного із блоків або пакетів [318, 319]. Комутація пакетів полягає у передаванні кадрів

канального рівня (наприклад, кадрів Ethernet), в які інкапсулюються IP пакети, де кожен пакет комутується окремо в залежності від його заголовку. В комутаціях блоків - група пакетів (блок) комутується за спільними правилами. Другий режим передбачає комутацію із волокна m у волокно K_1 , з розділенням по довжині хвилі та часу [318, 319]. Цей режим відповідає комутації каналів, коли встановлюється з'єднання за допомогою певного каналу (тобто виділеної довжини хвилі) між двома вузлами на певний період часу.

З рис. 6.1 випливає, що в комутаторі також може виникнути необхідність у зміні довжини хвилі. Для уникнення використання регенератора та інших пристроїв з ОЕО перетворення необхідно використовувати хвильові конвертори. Можна використати конвертор на основі чотирьоххвильового змішування, який є адаптивним до будь-якої комбінації вхідних/вихідних довжин хвиль за рахунок генератора опорного сигналу, керованого контролером. Комутаційна підсистема PTN повинна працювати без ОЕО перетворення сигналу, забезпечуючи при цьому можливість перетворення довжини хвилі, коли це необхідно.

6.2. Ймовірності блокування в оптичному комутаторі блоків

При передачі даних в PTN з використанням технології OBS необхідно розглянути доцільність використанням буферів очікування. Тут виникає протиріччя між ймовірністю втрати даних та вартістю комутатора.

Якщо в OBS немає буферів очікування, то в мережі при передачі даних протоколом сигналізації JET можливі блокування. Втрати виникають, коли всі канали по яким блок даних можна передати, є зайнятим.

Ймовірність втрати блоку визначається як кількість втрачених блоків до загальної кількості блоків:

$$P_{\text{втр}} = \frac{1}{M_{\text{бл}}} \sum_i M_{\text{бл.втр}_i},$$

де $M_{\text{бл}}$ – загальна кількість блоків; $M_{\text{бл.втр}_i}$ – кількість втрачених блоків за i -ий період.

В даному параграфі отримані співвідношення на основі моделі Ердоша-Ренеї. В цілому ймовірність блокування хоча б в одному каналі OBS визначається [3]

$$P_b = 1 - \frac{m_{\text{вих}}! P_{\text{комут}}^{m_{\text{вих}}}}{(m_{\text{вих}} - m_{\text{вх}})!}, \quad (6.1)$$

де $P_{\text{комут}}$ – ймовірність комутації кожного вхідного і вихідного каналу на вузлі, причому для простоти на всіх ділянках їхня кількість є однаковою; $m_{\text{вх}}$ – кількість вхідних вузлів; $m_{\text{вих}}$ – вихідних вузлів. Тут і надалі $m_{\text{вх}} \leq m_{\text{вих}}$, оскільки в іншому випадку будуть завжди блокування, що є неприпустимо.

При використанні конверторів $m_{\text{вх}}$ і $m_{\text{вих}}$ будуть рівні добутку кількості довжин хвиль у волокні на кількість мультиплексорів і демультимплексорів, відповідно. При $m = m_{\text{вх}} = m_{\text{вих}}$ формула (6.1) спрощується [3]:

$$P_b = 1 - m! P_{\text{комут}}^m, \quad (6.2)$$

З формули (6.2) видно, що $P_b \rightarrow 1$ при великих m , що має місце в реальних мережах. Тобто, хоча б один вихідний вузол завжди буде мати втрати. Отже, у такому разі виникає необхідність у буферизації.

Якщо в оптичному комутаторі є дисципліна обслуговування FIFO і $n = m$, то ймовірність блокування залежить від кількості місць у буфері [3]:

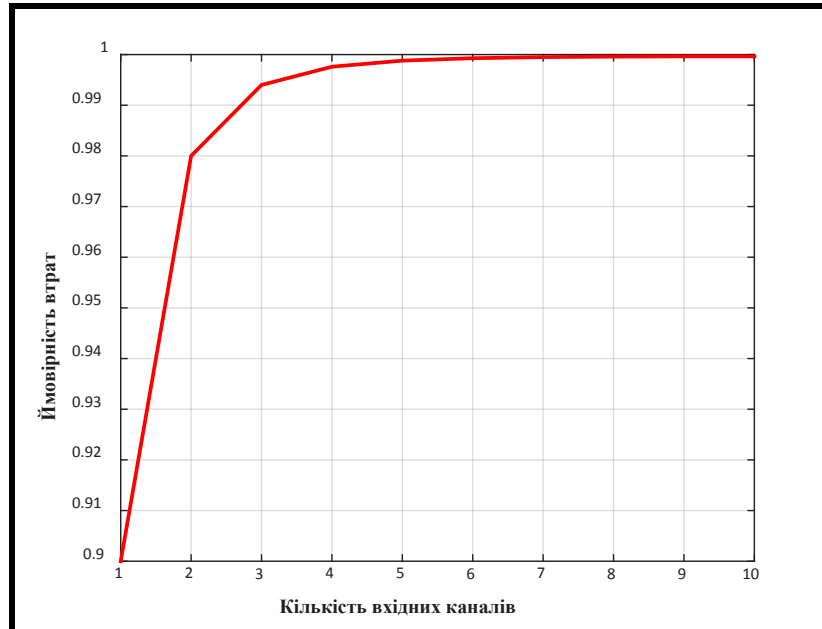
$$P_b = P_{\text{комут}}^m \sum_{j=i}^m (m-1)^{m-j} C_m^j, \quad (6.3)$$

де i – кількість місць в буфері. Враховуючи, що ймовірність комутації від кожного вхідного вузла до всіх вихідних вузлів є однаковою, то можна вважати $P = 1/m$ і тоді (6.3) прийме вигляд [3]:

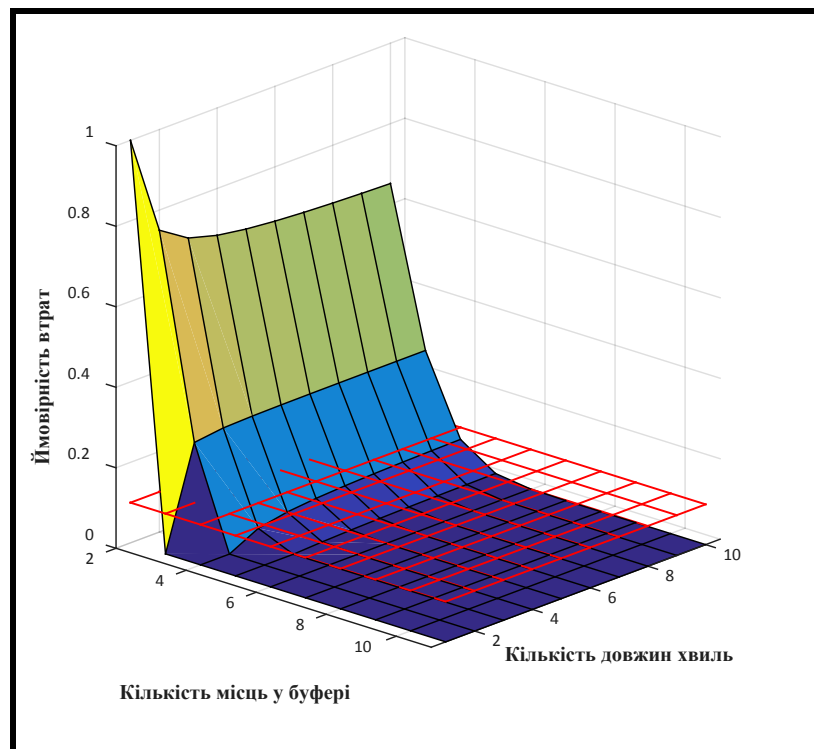
$$P_b = \frac{\sum_{j=i}^m (m-1)^{m-j} C_m^j}{m^m}, \quad (6.4)$$

Користуючись (6.4), можна побудувати графік залежності ймовірності блокування від кількості місць в буфері (рис. 6.3). З представленого графіка

залежності спостерігаємо, що ймовірність блокування зменшується на порядок при збільшенні кількості місць в буфері. Коли місць в буфері є більше чотири- п'ять при різних кількостях m , то ймовірність блокування прямує до нуля, тобто доцільно, щоб існувало не менше п'яти місць у буфері.



а)



б)

Рис. 6.3. Ймовірність втрат даних в залежності: а) від кількості вхідних каналів; б) від кількості довжин хвиль та місць в буфері [3]

В оптичних комутаторах для буферів використовують оптичні волокна затримки (англ. Optical Fiber Delays), які є довгими кусками оптичного волокна. Близько 1 км волокна забезпечує приблизно 5 мс затримки світлового сигналу. Також можна використовувати ФК компоненти, які називають оптичними лініями затримки. Приклад оптичної лінії затримки на ФК представлено на рис. 6.4 [320, 321].

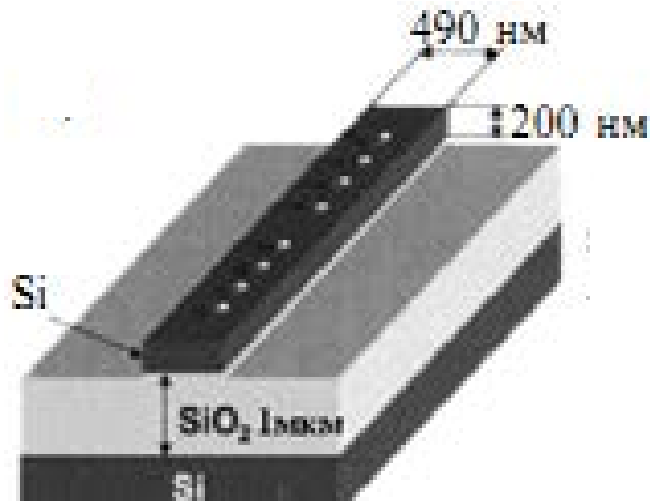


Рис. 6.4. Конструкція лінії затримок на основі ФК

Для практичної реалізації, коли використовується транспортний протокол UDP, передача може здійснюватися одразу, тобто сигналізаційна схема JET. Для протоколу TCP ланка сигналізації має спочатку знову передати інформацію на проміжні вузли про те, яким чином прийнято рішення передавати дані, синхронізуючи та резервуючи остаточно умови передачі даних. Отже, для протоколу TCP необхідно передавати дані згідно протоколу TAW.

Порівнявши різні схеми сигналізації, можна зробити висновок, що недоліком TAW є великий час встановлення шляху. Проте схема з повним підтвердженням дозволяє гарантувати доставку блоку. З іншого боку, в JET доставка блоку не гарантується, але сумарна затримка є меншою, ніж в TAW. Тому найдоцільнішим рішенням є вибір схеми INI, яка дозволяє розрахувати оптимальне співвідношення між тривалістю передавання та ймовірністю втрати блоку.

Розглянуті варіанти передачі даних показують, що при використанні тільки протоколу TAW комутатор є дешевшим, оскільки непотрібні буфери. Водночас пошук вдалого часу резервування для протоколу TAW приводить до очікування моменту, поки всі транзитні вузли не звільняться. Зрозуміло, що для зменшення часу простою можна використовувати вузол для передачі інших потоків.

6.3. Математичний опис оптичної комутації блоків

Схема сигналізації в OBS визначає початковий час затримки між моментами відправлення заголовку та відповідного блоку – OT . Затримка повинна бути такою, щоб пакет ВНР встиг утворити віртуальний канал:

$$t_{OT} = N_{int} (t_{перетв} + t_{пр.рiш}) + t_{пер_1} + \dots + t_{пер_n},$$

де N_{int} – кількість проміжних вузлів на шляху, $t_{перетв}$ – час перетворення оптичного сигналу в електричний; $t_{пр.рiш}$ – час прийняття рішень, $t_{пер.i}$ – час керування оптичним комутатором та перемикання комутаційних елементів i -го проміжного вузла.

Час передавання блоку за протоколом TAW (рис. 1.12) розраховується наступним чином:

$$T_{TAW} = t_{yмс} + t_{OT_TAW} + t_{очик} + t_{\delta_l} + \sum_{i=1}^{N_{int}} t_l, \quad (6.5)$$

де t_{OT_TAW} – час, витрачений ланкою поширення сигналізації від вхідного крайового вузла і назад, $t_{очик}$ – час очікування передачі даних в резервованій момент, коли всі OBS будуть вільні для передачі необхідного інформаційного сигналу, $t_{yмс}$ – час агрегації блоку з вхідних IP пакетів на крайовому вузлі, t_{δ_l} – тривалість передавання блоку, t_l – час поширення блоку в оптичній лінії. Отже, в протоколі TAW рішення про передачу приймається у вузлі приймача і службові дані, повертаючись назад до вузла передавача, узгоджують це з іншими вузлами.

Сумарний час передавання блоку за протоколом JET (рис. 1.13) становить:

$$T_{JET} = t_{yme} + t_{OT_JET} + t_{\delta l} + \sum_{i=1}^{N_{int}} t_l, \quad (6.6)$$

де t_{yme} – час агрегації блоку з вхідних IP пакетів на крайовому вузлі, t_{OT_JET} – час очікування блоку з урахуванням часу приходу ВНР до вузла призначення, $t_{\delta l}$ – тривалість передавання блоку, t_l – час поширення блоку в оптичній лінії.

При визначенні часу передавання блоку згідно протоколу сигналізації INI (рис.1.14) необхідно враховувати (6.5) та (6.6):

$$T_{INI} = t_{yme} + t_{OT_INI} + t_{\delta l} + \sum_{i=1}^{N_{int}} t_l, \quad (6.7)$$

де t_{OT_INI} – час очікування блоку з урахуванням запасу на повернення ВНР від проміжного вузла. Така схема сигналізації дозволяє динамічно підлаштовуватись під параметри вхідного трафіку.

Кожен вузол мережі повинен отримувати своєчасну інформацію про зміну стану мережі. Для цього можна використати пірінгові мережі [14, 61, 63]. Крім того, за допомогою пакету ВНР необхідно здійснювати обмін інформації про стан мережі.

Важливим є узгоджене прийняття рішень. Рішення приймається у вузлі, але можлива втрата блоку даних, бо не всі вузли можуть бути повідомлені про зайнятість відповідного каналу. Для таких втрат є альтернативний варіант SDN (Software-defined Networking – програмно-конфігурована мережа) [72]. Щоб зменшити втрати внаслідок одночасної передачі блоків даних на один канал потрібно, щоб в межах тензорного аналізу мережі досліджуваний простір (п. 2.2.3) наближався до евклідового, тобто тензор Рімана рівний нулю, чи за алгеброю Лі векторні поля були координатними, тобто дужки Лі також мають бути рівні нулю.

Розглянемо як залежить навантаження в різних ділянках мережі в певний момент часу від протоколу, що використовується OBS. Нехай λ_i –

інтенсивність вхідного потоку від одного вузла до іншого. Для протоколу TAW, навантаження $h_{OT_TAW\ i}$ при очікуванні, поки поширюється сигналізація, і навантаження $h_{ym\ i}$ під час агрегації блоку з вхідних IP пакетів на крайовому вузлі, визначаються:

$$h_{OT_TAW\ i} = \lambda_i t_{OT_TAW\ i},$$

$$h_{ym\ i} = \lambda_i t_{ym\ i},$$

де $t_{OT_TAW\ i}$ – середній час поширення сигналізації, $t_{ym\ i}$ – середній час агрегації блоку з вхідних IP пакетів на крайовому вузлі.

Позначимо v_{edge} – швидкість передачі даних з крайового вузла у направляючу систему, v_c – швидкість поширення даних в лінії, L_{block} – середня довжина блоку, $l_{волз}$ – довжина волокна між вузлами, через які передаються дані на фізичному рівні, m_i – середня кількість вільних каналів. Тоді $h_{очік\ i}$ – навантаження при очікуванні звільнення каналів для передачі інформаційного сигналу, а $h_{мереж\ i}$ – навантаження між двома вузлами:

$$h_{очік\ i} = \lambda_i L_{block}/v_{edge} m_i,$$

$$h_{мереж\ i} = v_{edge} m_i (t_{бл\ i} + t_{л\ i}) = v_{edge} m_i (L_{block}/v_{edge} m_i + l_{волз}/v_c),$$

де $t_{бл\ i}$ – середня тривалість передавання блоку між двома вузлами, $t_{л\ i}$ – час поширення блоку залежно від довжини лінії між двома вузлами.

Отже, загальне навантаження, яке надійшло у певний вузол і передається у інший згідно протоколу TAW:

$$H_{TAW\ i} = h_{OT_TAW\ i} + h_{ym\ i} + h_{очік\ i} + h_{мереж\ i}, \quad (6.8)$$

Все навантаження, яке перебуває у вузлі для передачі даних на всі інші вузли, можна визначити як:

$$H_{TAW\ вузол} = \sum_{i=1}^{N_{int}-1} (h_{OT_TAW\ i} + h_{ym\ i} + h_{очік\ i}).$$

Для протоколу JET параметри $h_{ym\ i}$ та $h_{очік\ i}$ визначаються аналогічно, і навантаження $h_{OT_JET\ i}$ та $h_{мереж\ i}$ мають схожі формули:

$$h_{OT_JET\ i} = \lambda_i t_{OT_JET\ i},$$

$$h_{мереж\ i} = v_{edge} m_i t_{бл\ i} + v_{edge} \sum_{i=1}^{N_{int}+1} m_i t_{л\ i} = L_{block} + v_{edge}/v_c \sum_{i=1}^{N_{int}+1} m_i l_{волз\ i},$$

де: t_{OT_JET} – час очікування блоку з урахуванням часу ймовірного приходу ВНР до вузла призначення; N_{int} – кількість транзитних вузлів, через які передаються дані між розглядуваними вузлами.

Водночас необхідно враховувати $h_{opt.буф}$ – навантаження в оптичному буфері очікування [3]:

$$h_{opt.буф} = N_{int} v_{edge} m_i (y_{буф} / v_{edge} m_j) = N_{int} y_{буф} m_i / m_j,$$

де $y_{буф}$ – розмір одного місця буфера; m_i та m_j – середня кількість вільних каналів для передачі даних до буфера та після буфера, відповідно.

Загальне навантаження, яке надійшло у певний вузол і передається у інший згідно протоколу JET:

$$H_{JET\ i} = h_{OT_JET\ i} + h_{умв\ i} + h_{очік\ i} + h_{мереж\ i} + h_{opt.буф}. \quad (6.9)$$

Для гібридного протоколу INI маємо комплексне навантаження у мережі залежно від моменту дії протоколу JET чи TAW. Тобто, враховуючи (6.8) та (6.9), маємо:

$$H_{INI\ i} = H_{INI\ i}(TAW) + H_{INI\ i}(JET) = H_{TAW\ i} + h_{мереж\ i}(JET) + h_{opt.буф}, \quad (6.10)$$

де $H_{INI\ i}(TAW)$ і $H_{INI\ i}(JET)$ – навантаження за протоколами JET і TAW, відповідно. Згідно протоколу INI, спочатку передача даних здійснюється за протоколом TAW, а, отже, навантаження, яке є у вхідному вузлі, враховане лише у $H_{INI\ i}(TAW)$. Тому

$$H_{INI\ i}(JET) = h_{мереж\ i}(JET) + h_{opt.буф}.$$

З (6.8) та (6.9) при однакових умовах впливає:

$$h_{OT_TAW\ i} = 2h_{OT_JET\ i},$$

але в протоколі JET є ще додатковий доданок $h_{opt.буф}$.

Вибір маршруту здійснено для випадку, коли тензор Рімана є найменшим. Зауважимо, що при визначенні метричного тензору враховувалося віртуальне навантаження між вузлами, які не з'єднані.

6.4. Використання буфера в оптичному блоці комутації

Основним призначенням сигналізаційних схем є узгодження моментів приходу блоків у кожному комутаційному вузлі. Надходження блоку

інформаційним каналом має бути узгоджено з часом, виділеним сигнальним каналом для налаштування оптичного комутатора на заданий напрям. Якщо при виборі часу затримки виникає помилка, то в потрібний момент віртуальний канал не утворюється і втрата блоку неминуча.

У ВНР містить інформація про надходження блоку даних у наступний OBS, враховуючи час очікування у буфері.

Використання буферу очікування доцільно при використанні протоколів JET та INI, тоді блоки даних повинні бути не більше певного розміру. Блок даних, що надходить у буфер, має бути затриманий на час

$$t_{\text{буф}} = k_{\text{буф}} (t_{\text{ол}} + t_{\text{нр}}), \quad (6.11)$$

де $k_{\text{буф}}$ – кількість буферів, які блок даних має пройти; $t_{\text{нр}}$ – інтервал між сусідніми блоками даних, які поширюються один за одним у волокні.

Розміри блоків можуть бути однаковими або динамічно змінюватися, але не більше певного розміру. В останньому випадку розмір буфера має відповідати часу затримки $t_{\text{ол}}$ найбільшого блоку.

За (6.11) блок у буфері затримується на $t_{\text{ол}} + t_{\text{нр}}$. В $t_{\text{нр}}$ необхідно врахувати час комутації, а також вплив на блок даних дисперсії, нелінійнооптичних ефектів, джитеру та ін. Ці впливи можуть збільшувати або зменшувати тривалість блоку даних при проходженні впродовж волокна і взаємно компенсуватись.

Умови скерування блоку даних у наступний буфер такі:

- якщо попередній блок даних випереджує розглянутий блок даних більше, ніж на час $t_{\text{нр}}$, то блок даних може бути скерований в буфер $k_{\text{буф}}$;
- якщо випереджує на час менший $t_{\text{нр}}$, то скеровується в буфер $k_{\text{буф}} + 1$.

Приклад скерування в буфер або втрати представлений на рис. 6.5. В дужках – номер буфера, до якого надходить блок даних, якщо канал є зайнятим. Для простішого представлення розглядається випадок, коли всі блоки однакового розміру і у буфері є п'ять місць. Наведено приклад, коли буфер є переповнений, внаслідок чого блок даних втрачається (рис. 6.5).

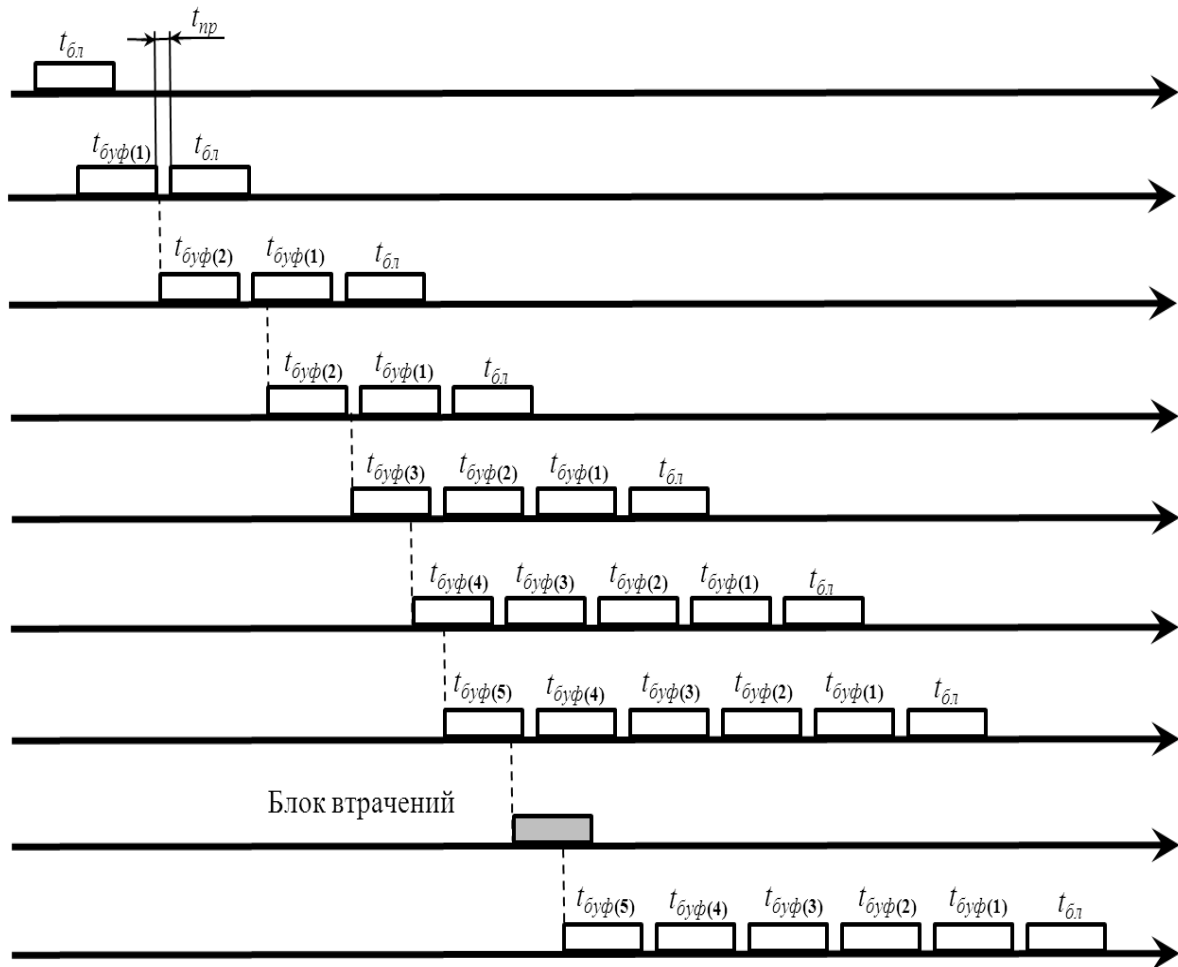


Рис. 6.5. Приклад буферизації і втрат в оптичному блоці комутації [3]

При динамічній зміні розміру блока можливі випадки, коли деякі блоки обганяють попередні. Наприклад, блок В відправлений у буфер $k_{\delta y \phi}$, бо попередній блок А, що знаходиться у буфері $k_{\delta y \phi} - 1$, випереджає на час менше $t_{нр}$. Але блок С, який надходить після блоку В, може бути відправлений у буфер $k_{\delta y \phi} - 1$. При цьому час між блоками А та С і С та В не менше $t_{нр}$. Якщо розмір блоку С достатньо малий, то і наступний блок Д може бути відправлений у буфер $k_{\delta y \phi} - 1$ слідом за ним, але час між блоками С та Д і Д та В має бути не менше $t_{нр}$.

При пріоритетному обслуговуванні блоки з меншим пріоритетом відправляються у наступний буфер, поступаючись місцем блоку з більшим пріоритетом. Така ситуація збільшує кількість втрат у блоках з меншою пріоритетністю, але, як правило, до таких блоків ставлять умови безвтратної

доставки. Отже, для даного випадку можна рекомендувати використання ОЕО регенераторів як останнього буферного місця. У такому разі блоки не будуть втрачатися.

Важливо також зазначити, що буфери очікування одночасно можна використовувати для всіх довжин хвиль, які направляються у визначене волокно. Але черга, представлена на рис. 6.5, для кожної довжини хвилі своя.

6.5. Алгоритм імітаційної моделі оптичної комутації блоків у фотонній транспортній мережі

В роботі проведено моделювання PTN з використанням OBS. Алгоритм моделювання представлений на рис.6.6, де використано математичний апарат і програми з [322].

Зауважимо, що в OTN найбільш поширеним є використання кільцевої топології. Враховуючи результати проведених у п'ятому 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. Проводилось моделювання вхідного трафіку кожного вузла.

Вхідний трафік був отриманий експериментально з використанням мережного аналізатора WireShark. Проведено детальний аналіз трафіку одного вузла мережі з подальшою екстраполяцією результатів для довільної кількості мережних вузлів. Для моделювання різних рівнів завантаженості мережі було проведено ряд експериментів з різними типами сервісів, такими як веб-серфінг, передавання потокового відео, IPTV, синхронізація даних з хмарними сховищами тощо.

В роботі інтенсивність модельованого трафіку завжди володіла властивістю самоподібності [323, 324], а, отже, відповідала реальному трафіку телекомунікаційної мережі [325].

В роботі проведено дослідження завантаження мережі в залежності від часу обслуговування, втрат та очікування для різних протоколів.

Обслуговування у вузлах (μ) є однаковим і постійним. Інтенсивність вхідного навантаження у вузлах (λ) є або зовнішнім навантаженням, коли вузол передає навантаження на інші вузли, або навантаженням, що проходить через вузол, коли вузол є транзитним. Тоді завантаження мережі $\rho = \lambda/\mu$.

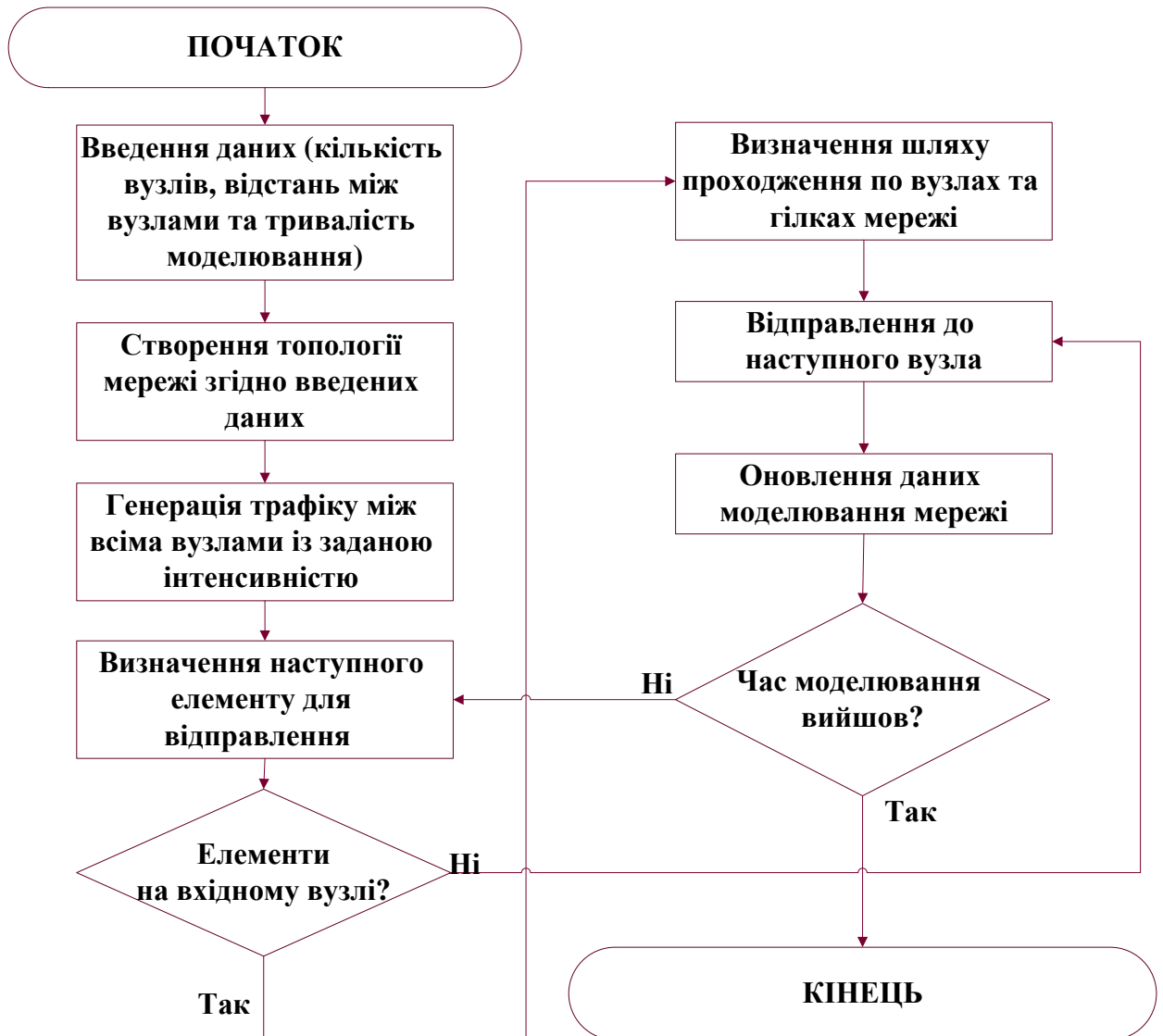


Рис. 6.6. Блок-схема алгоритму OBS в імітаційній моделі мережі

Вимоги щодо якості обслуговування для основних видів послуг телекомунікаційної мережі, відповідно до рекомендацій ITU-T [326], зведені у табл. 6.1. Всі дані, які наведені у табл. 6.1, взяті в межах допустимих для забезпечення середньої якості певної послуги.

Параметри QoS

Тип трафіку	Ймовірність втрат пакетів%	Максимальна затримка мс	Тривалість встановлення з'єднання, мс	Ймовірність розриву з'єднання
Голос	0.1	150	900	10^{-3}
Відео-конференція	0.8	100	800	10^{-3}
IPTV	1.5	1000	1000	10^{-6}
Інтернет дані	0.1	1000	1000	10^{-6}
Інтерактивні дані	0.1	400	950	10^{-3}
Медіа-за-запитом	0.05	500	700	10^{-3}
Сигналізація	0.01	100	500	10^{-8}

Голос (VoIP) – Voice over IP – передавання мови по IP мережах. IPTV – передавання відео через протоколи IP-мережі.

Відеозв'язок та сервіс відеоконференцій – це підтримання відеозв'язку з одним або кількома абонентами одночасно.

Медіа за запитом розглядають аудіо та відео за запитом. Аудіо за запитом – можливість прослуховування чи замовлення певного аудіо контенту з каталогу, що збережений на сервері провайдера. Відео за запитом – можливість перегляду або замовлення певного відео контенту з каталогу, що збережений на сервері провайдера, а також додаткового перегляду платних відео файлів.

Інтернет дані – така послуга дозволяє абоненту отримувати дані з Інтернету, доступ до веб-сайтів та мережевих сервісів у будь-який момент часу безпосередньо зі свого кінцевого пристрою.

Трафік сигналізації – трафік сигнальних повідомлень, що передаються для встановлення, зміни і руйнування сеансу зв'язку між вузлами в пакетній мережі;

Інтерактивні дані – повідомлення, онлайн-анкети та опитування, реєстраційні форми, лічильники відвідувань, форми для онлайн-замовлень тощо.

Головні параметри якості, які є базовими при наданні послуги абонентові:

- *затримка при передаванні інформації* – тривалість передавання інформації від джерела до одержувача.

- *відсоток втрачених пакетів* – відношення втрачених пакетів до загальної кількості переданих. Втрати пакетів в мережах виникають в тому випадку, коли значення затримок при передаванні пакетів перевищує нормоване значення. Серед причин, що викликають втрати даних, необхідно відзначити зростання черг у вузлах мережі, що виникають при перевантаженнях. У разі перевантаження мережі черги в комутаторах швидко ростуть. Якщо перевантаження зберігається протягом тривалого часу, відбувається переповнення буферів, і дані втрачаються.

- *тривалість встановлення з'єднання* – визначається як інтервал часу від моменту надсилання абонентом запиту на отримання відповідного мультимедійного сервісу до моменту початку отримання даного сервісу.

- *імовірність розриву з'єднання* – визначається як відношення кількості запитів, яким відповідний сервіс не був наданий повністю, до загального числа обслужених запитів.

Зазначемо, що проведенні дослідження в роботі при моделюванні RTN за допомогою технології OBS, час передачі блоку даних не перевищував 100 мс, що є мінімальним значенням (табл. 6.1) для передачі різних послуг.

Необхідно зазначити, що при формуванні блоків в OBS кількість пакетів є змінною [126, 327]: для максимально завантажених кількість пакетів становить – 200, ефективно завантажених – 150 пакетів, нормально

завантажених – 100 пакетів при максимальному розмірі пакету 65535 байт і мінімальному – 512 байт. Дослідження показали [126, 327], що при використанні оптичного комутатора з буфером, де одне місце відповідає затримці в часі для 200 пакетів по 65535 байт, протокол сигналізації JET не ефективний порівняно з протоколом TAW. Але для затримки блоку в 150 пакетів (ефективне завантаження блоків), протокол JET є доцільним.

При моделюванні вважали, що відстань між вузлами була в межах 100-150 км. Припустили, що швидкість обробки і передачі даних є 10 Гбіт/с. Це припущення задовольняє умови (2.83), (2.85), (2.86), залежно від певного наближення теорії масового обслуговування. При визначенні часу передачі блоків за допомогою (6.5)-(6.7), використовувався час перебування блоку в кожній ділянці мережі.

6.6. Аналіз ефективності протоколів TAW та JET в залежності від завантаження мережі

Трафік службових даних є найменшим для протоколу JET, для протоколу TAW збільшується вдвічі, а для INI є проміжним і залежить від вибору граничного вузла. Отже, найшвидша передача буде протоколом JET, коли місць у буфері немає, але зростає кількість втрат при $\rho > 0,5$. Тому для зменшення втрат протоколом JET пропонується використовувати буферизацію [3].

При максимальному завантаженні пакетів у блок протокол TAW недоцільно використовувати, якщо $\rho < 0,98$. На рис. 6.7а, спостерігаємо, що для протоколу TAW час передачі даних є помітно більший від протоколу JET. Зазначимо, що для протоколу сигналізації JET час затримки в межах 1% не залежить від кількості місць у буфері, але при відсутності буфера з'являються втрати (рис. 6.7б).

Загалом представлений на рис.6.7 а час передачі в межах 1-1,5 % відповідає випадкам $\rho < 0,8$, а для $\rho = 0,9$ є гіршим на 2-2,5%. Водночас протокол сигналізації JET є кращими при передачі аналогічних даних за

допомогою технології IP/MPLS/DWDM (тобто без використання PTN) порядку 40 %, коли транзитний вузол один, і 20%, коли транзитних вузлів більше чотирьох. З рис. 6.7а протокол сигналізації TAW взагалі недоцільно використовувати в даному випадку, оскільки він є гіршим від технології IP/MPLS/DWDM.

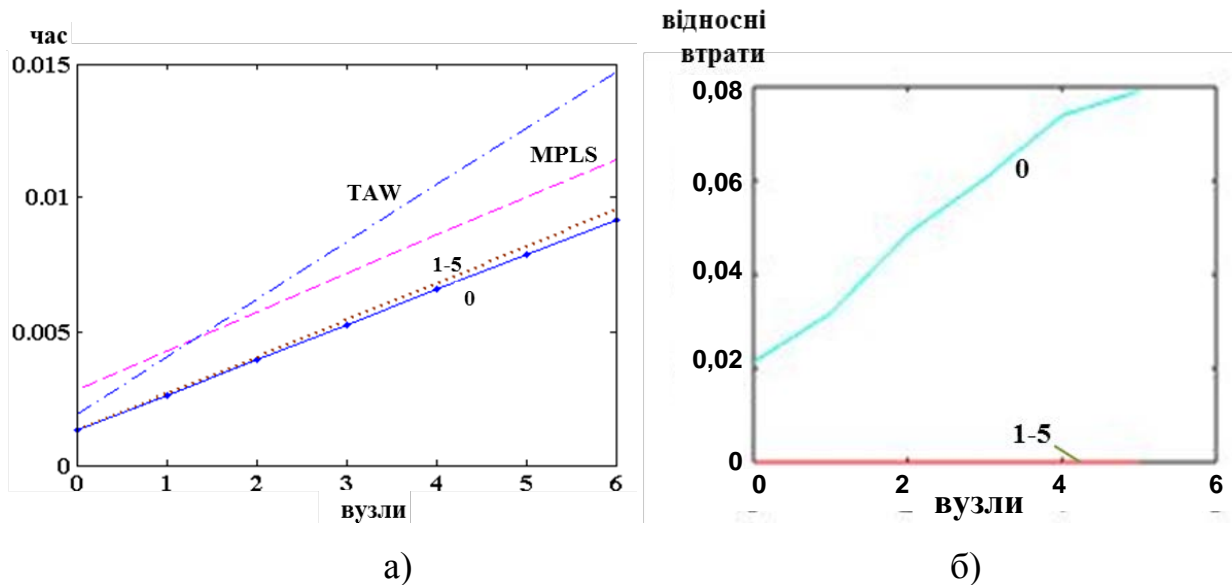


Рис. 6.7. Залежність часу доставки (а) та відносних втрат (б) блоку даних для протоколу JET від кількості транзитних вузлів при максимальному завантаженні пакетів у блоках, коли $\rho=0,8$ (числа позначають кількість місць у буфері при протоколі сигналізації JET)

При наближенні до квазіперевантаженого стану мережі, час передачі даних і втрати для протоколу JET зростають (рис. 6.8). Отже, протокол TAW доцільно використовувати при максимальному завантаженні пакетів у блоки, коли мережа квазіперенавантажена. У разі відсутності місць у буфері час передачі даних для протоколу JET є менший, ніж для протоколу TAW у 1,6 раза. Пояснюється це тим, що затримки переданих блоків немає, але необхідно зазначити, що кількість втрачених блоків в такому випадку є майже 99 %. Із збільшенням місць у буфері час для передачі блоку зростає, але і кількість втрат спадає. І вже при кількості місць у буфері більше п'яти, час передачі є майже однаковий і кількість втрат є мінімальною. Останній

результат співпадає з отриманими в п.6.2, де розглядалось визначення кількості місць у буфері без врахування завантаженості мережі. 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.

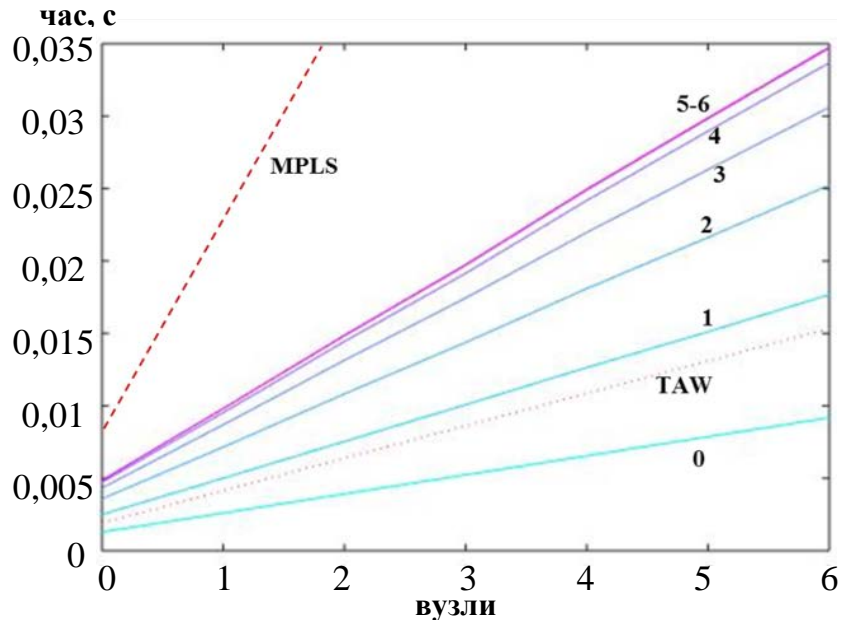


Рис. 6.8. Залежність часу доставки даних від кількості транзитних вузлів при максимальному завантаженні пакетів у блоках (числа відповідають кількості місць у буфері для протокола JET)

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. 6.9 та рис. 6.10, коли $\rho=0,98$. З рис. 6.9 бачимо, що при технології IP/MPLS/DWDM (з OEO перетворенням в OTN) передача даних є кращою у 1,4 рази, ніж в PTN на основі OBS для протоколу сигналізації TAW. Час передачі даних для протоколу JET майже однаковий, коли місць у буфері більше двох (рис. 6.9), але втрати є малими (прямують до нуля), коли кількість місць є більше чотирьох (рис. 6.10).

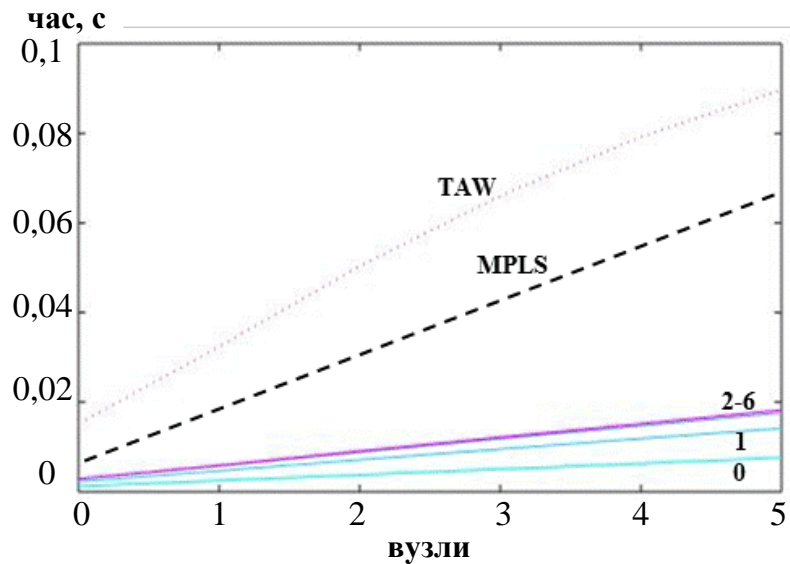


Рис. 6.9. Залежність часу доставки даних від кількості транзитних вузлів при ефективному завантаженні пакетів у блоки (числа позначають кількість місць у буфері при протоколі сигналізації JET)

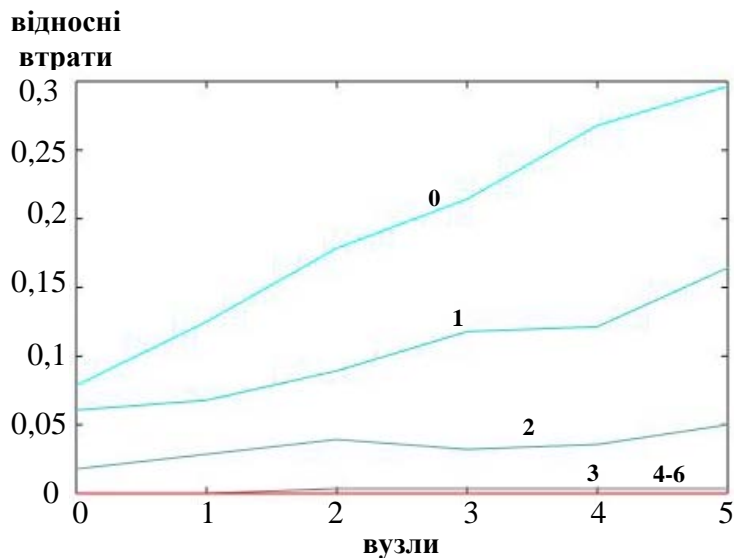


Рис. 6.10. Залежність втрат блоку даних при протоколі сигналізації JET від кількості транзитних вузлів з ефективним завантаженням пакетів у блоки (числами позначено кількість місць у буфері)

В роботі було проведено дослідження протоколів сигналізації для технології OBS при багатошляховій маршрутизації ($K_R=2$ та 3), що здійснювалось з використанням методу діакоптики. На основі отриманих значень час передачі даних відрізняється приблизно порядком 10^{-4} с, але є

кращим для $K_R = 3$ маршрутизації, коли $\rho < 0,4$, для $K_R = 2$, коли ρ в діапазоні $0,4 \div 0,5$, а для $K_R = 1$, коли $\rho > 0,5$. Отже, можна стверджувати, що багатошляхову маршрутизацію не доцільно використовувати в технології OBS, коли $\rho > 0,5$.

Моделювання проводилося методом діакоптики шляхом розв'язку транспортної задачі засобами лінійного програмування для протоколу сигналізації TAW і для технології IP/MPLS/DWDM. Для технології IP/MPLS/DWDM також використано модель багатошляхової маршрутизації з переходом від системи координат гілок мережі до системи координат незалежних контурів і пар вузлів. При використанні протоколу сигналізації JET використовувався метод діакоптики у PTN з перерозподілом навантаження..

6.7. Дослідження ефективності технології OBS при використанні гібридних протоколів сигналізації

Головним завданням протоколу INI є максимальне використання переваг протоколів JET і TAW. На основі раніше отриманих результатів при максимальному завантаженні пакетів у блок, в квазіперевантаженому стані ($\rho \rightarrow 1$) для протоколу сигналізації INI граничний вузол доцільно вибрати середній транзитний вузол. Якщо граничного вузла немає, то передача даних здійснюється протоколом сигналізації TAW.

Результати моделювання при $\rho \approx 0,97$ представлено на рис. 6.11 і рис. 6.12, де для протоколу INI граничний вузол є середнім транзитним вузлом і комутатор має два місця у буфері. При максимальному завантаженні пакетів у блок час передачі майже не залежить від кількості місць у буфері, а втрати є суттєвими тільки тоді, коли місць у буфері немає.

На рис. 6.11 та рис. 6.12 для протоколу INI графік залежності нелінійний. Якщо кількість транзитних вузлів непарна, то однакова кількість вузлів працює за протоколами TAW та JET. Якщо кількість вузлів парна, то граничний вузол вибирається ближчий до приймача (рис. 6.11 та рис. 6.12),

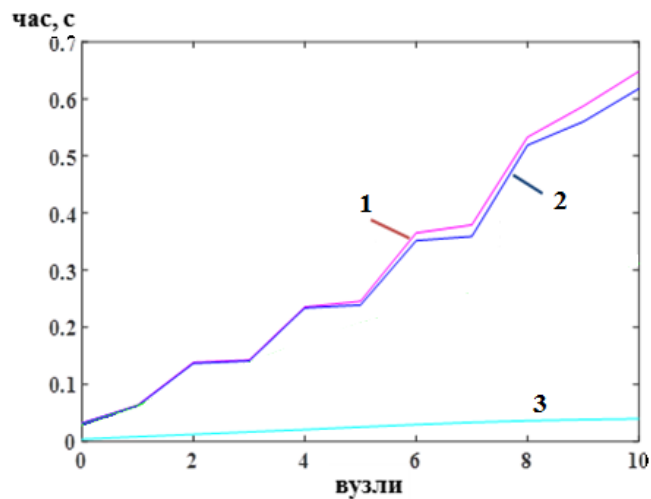


Рис. 6.11. Залежність часу доставки даних від кількості транзитних вузлів при максимальному завантаженні пакетів у блок: 1) протокол INI, коли для протоколів TAW та JET виділяється 30 і 70 % кількості каналів, відповідно; 2) протокол INI, коли всі канали одночасно використовуються протоколами TAW та JET; 3) тільки протокол JET

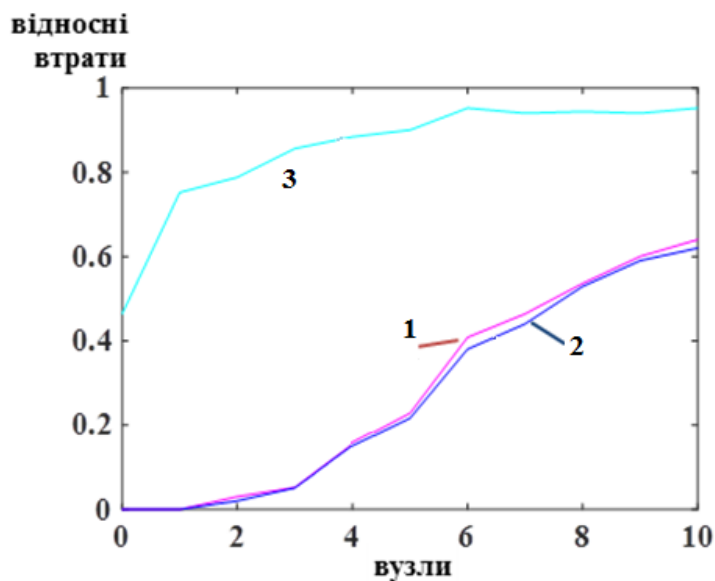


Рис. 6.12. Залежність відносних втрат від кількості транзитних вузлів при максимальному завантаженні пакетів у блок: 1) протокол INI, коли для протоколів TAW та JET виділяється 30 і 70 % кількості каналів ;відповідно, 2) протокол INI, коли всі канали одночасно використовуються протоколами TAW та JET; 3) тільки протокол JET

або до передавача. В кожному з можливих випадків на один вузол довше працює протокол TAW (перший варіант, який представлений на рис. 6.11 та

рис. 6.12) або JET (другий варіант).

Розглянемо можливість у протоколі INI виділяти певну кількість каналів для протоколів JET і TAW. Проведено дослідження залежності часу передачі даних і втрат (рис. 6.13 при $\rho=0,98$, рис. 6.14 при $\rho=0,999$) від кількості транзитних вузлів.

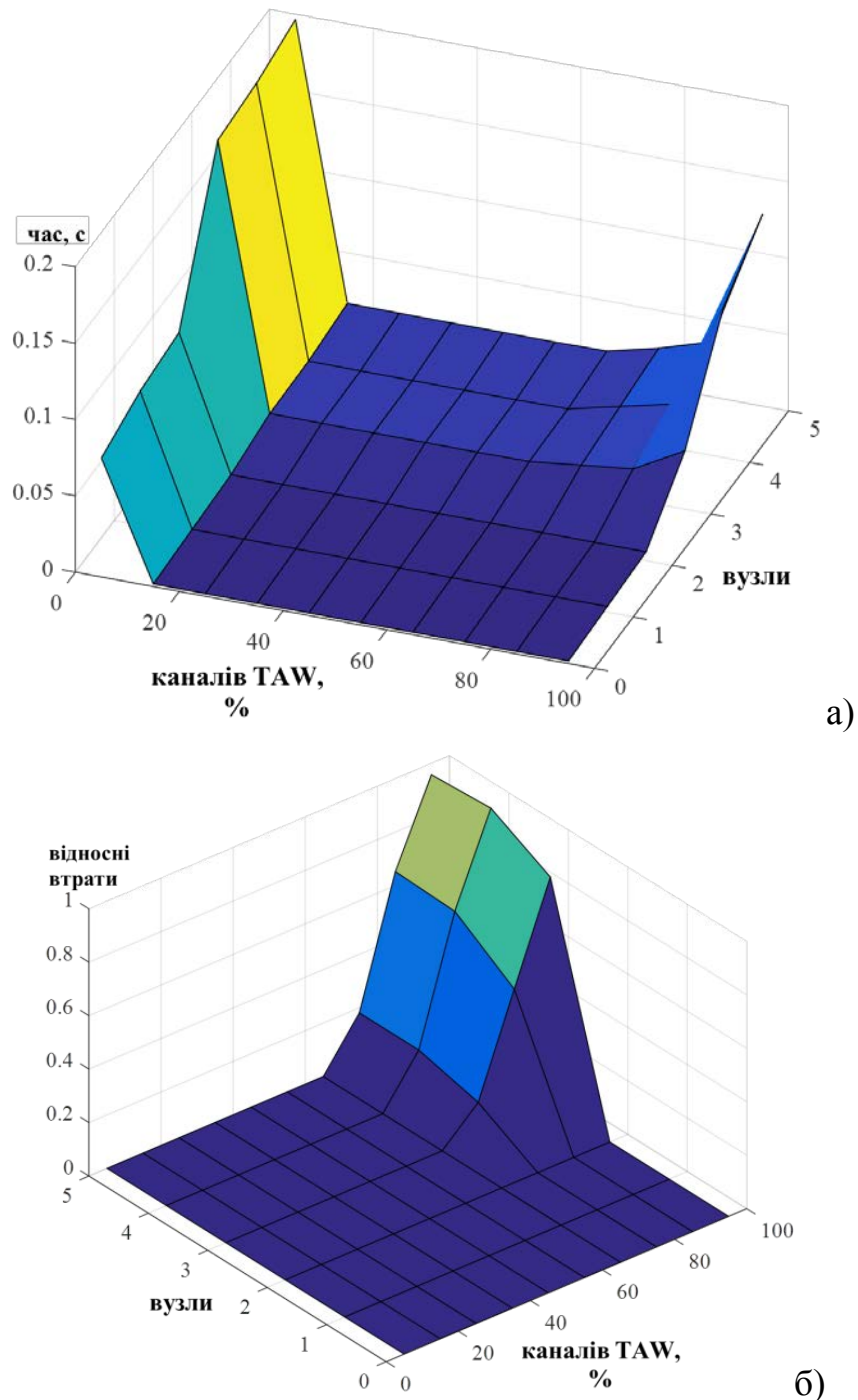


Рис. 6.13. Діаграма залежності для протоколу сигналізації INI часу доставки даних (а) та відносних втрат (б) від кількості транзитних вузлів та частки каналів протоколу TAW при максимальному завантаженні пакетів у блоці

При малій кількості каналів (від 5% до 15%) для протоколу JET або TAW, час передачі різко збільшується. Необхідно звернути увагу на втрати залежно від кількості каналів, що використовуються для протоколів JET і TAW (рис. 6.13 б та рис. 6.14 б). Якщо від 20% до 60% каналів використовують протокол TAW, то втрат немає при середній завантаженості

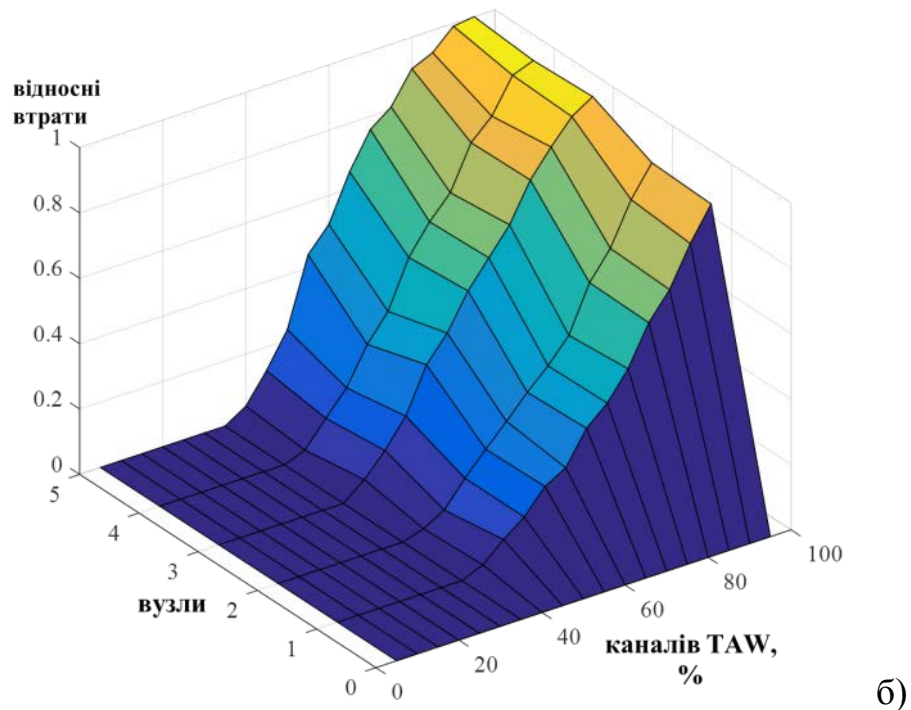
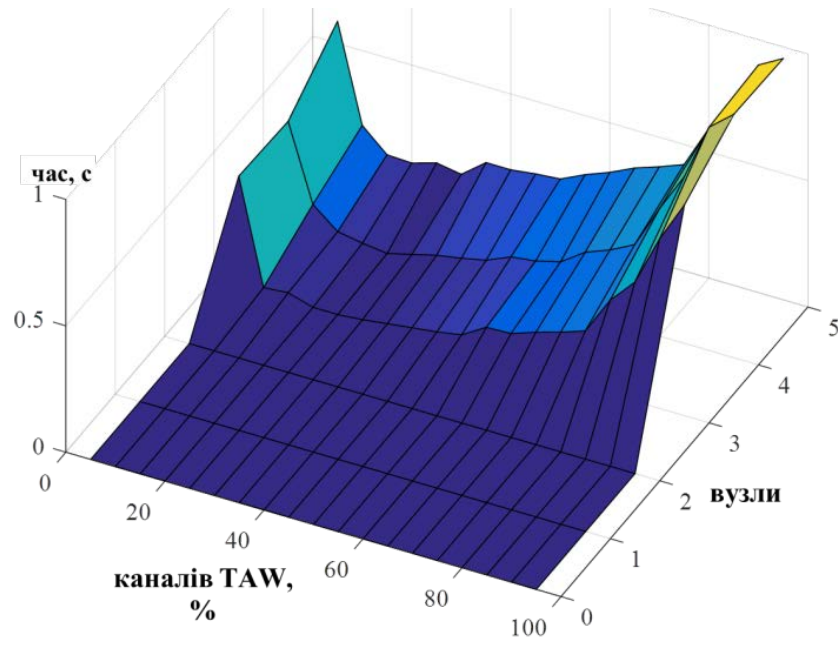


Рис. 6.14. Діаграма залежності для протоколу INI кількості часу доставки даних (а) та відносних втрат (б) від транзитних вузлів та частки каналів протоколу TAW при максимальному завантаженні пакетів у блок

мережі на рівні $\rho=0,98$ (рис. 6.13 б). Для $\rho=0,999$ (рис. 6.14) втрати мінімальні, коли 20-30% оптичних каналів використовують протокол TAW.

На рис. 6.11 та рис.6.12 для протоколу INI представлено залежності, коли 30% каналів виділено для передачі блоків за протоколом TAW, а решта – за JET. З отриманих результатів видно, що при виділенні певної кількості каналів для протоколів TAW та JET (з виділеною кількістю каналів) час доставки даних та відносні втрати є співмірний при одночасному використанні цих протоколів (без виділеної кількості каналів).

Проведено моделювання передачі даних за допомогою протоколів сигналізації JET та TAW в залежності від розміру блоків. На основі отриманих раніше результатів, пропонується передавати дані за допомогою протоколу сигналізації JET, при максимальному навантаженні пакетів у блок – протокол сигналізації TAW, коли мережа в квазіперевантаженому стані.

В результаті моделювання PTN з використанням буферів встановлено, що при змінному навантаженні пакетів у блок з використанням різних протоколів сигналізації час затримки є меншим порівняно з використанням протоколів лише сигналізації JET. Для прикладу на рис. 6.15 представлено ці випадки при $\rho=0.98$, коли є два місця у буфері. Змінне навантаження пакетів у блоці забезпечує кращий час передачі даних на 12-16 % порівняно з протоколом JET. Якщо в OBS немає буферів, то час затримки при змінному навантаженні пакетів у блок з використанням різних протоколів сигналізації фактично співпадає з часом передачі даних протоколом JET.

Для протоколів JET та INI пропонуємо не втрачати блоки, які надходять на переповнений оптичний буфер, а передавати їх на приймач транзитного вузла та здійснювати перетворення сигналу в електричний. Можливість зайняти вільне місце в оптичному буфері, або передати дані у вільному каналі має блок, що найдовше знаходиться в транзитному вузлі, який перетворюється в оптичний сигнал. Найнижчий пріоритет має блок даних, що найпізніше надходить на даний транзитний вузол.

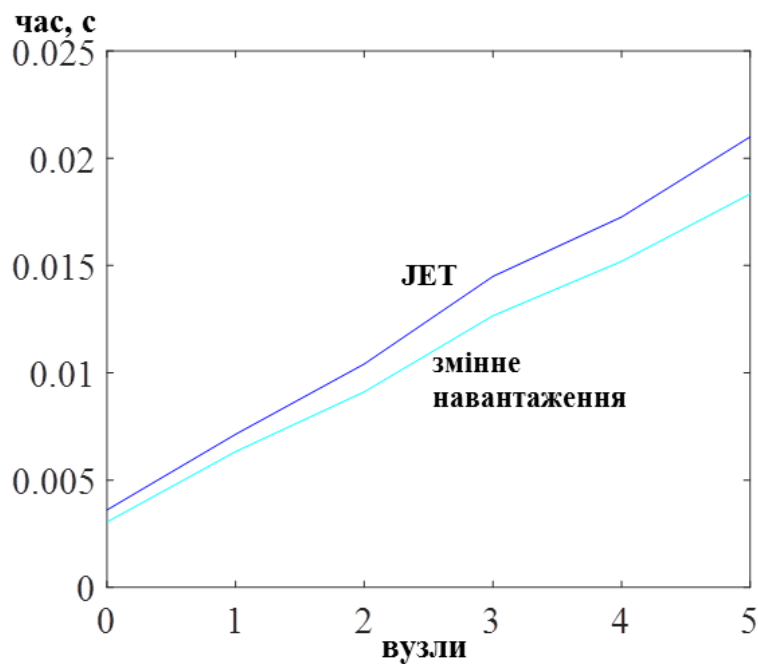


Рис. 6.15. Залежність часу доставки даних від кількості транзитних вузлів при змінному завантаженні пакетів у блок з використанням різних протоколів сигналізації та з протоколом JET

На основі результатів моделювання, при $\rho=0,98$ час доставки даних погіршується для протоколу INI на 14-19 %, а для JET – на 2-7% (рис. 6.16), забезпечуючи фактично відсутність втрат блоків. Втрати, якщо і виникають, то у тих рідкісних випадках, коли час перебування в мережі даних є більшим згідно вимог існуючих стандартів (див. табл. 6.1).

Було проведено моделювання PTN для протоколу сигналізації INI при різній кількості місць у буфері (рис. 6.17), коли граничний вузол від передавача вибирали за формулою: $k_{lim}=m/2+lim$, де m – кількість транзитних вузлів, lim – номер вузла від середнього. У випадку, коли граничного вузла немає, то передача даних здійснювалась за допомогою протоколу сигналізації TAW.

На рис. 6.17 бачимо, що коли транзитних вузлів менше шести, то час передачі не залежить від кількості буферних місць у OBS. Коли буферних місць більше шести, то час передачі блоків є різним. Для кожного з варіантів

l_{im}-го транзитного вузла від середнього, час, витрачений на передачу блоків, найбільший, коли буферних місць у OBS немає.

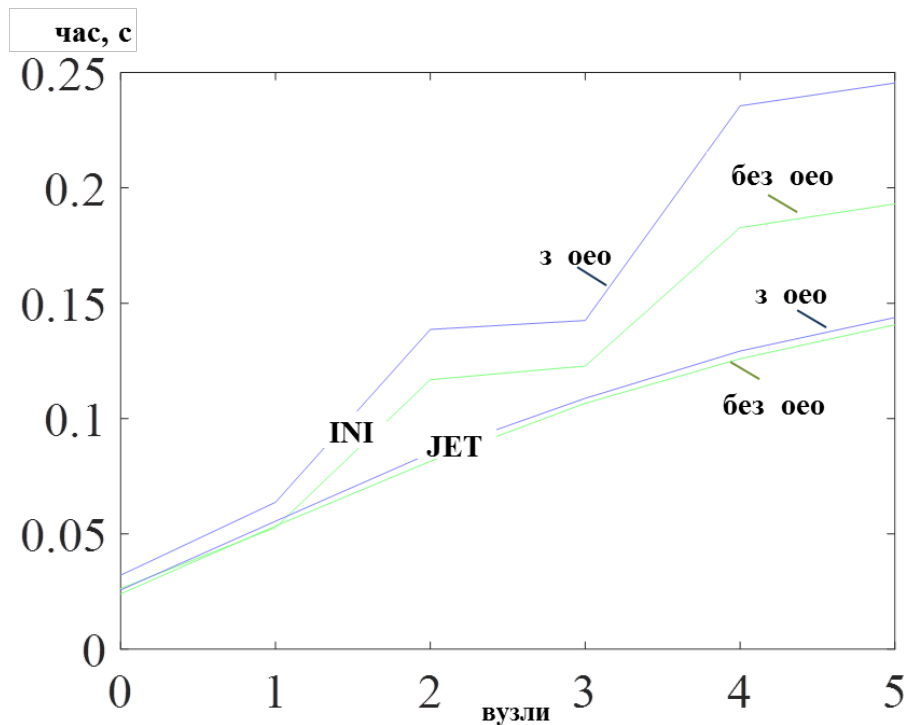


Рис. 6.16. Залежність часу доставки даних від кількості транзитних вузлів при максимальному завантаженні пакетів у блоки з ОЕО і без ОЕО перетворення для протоколів JET та INI

Проведені дослідження із застосуванням диференціальної геометрії. Показано, щоб уникнути втрат внаслідок неузгодженості отриманої інформації про зміну стану мережі на різних вузлах можна, якщо більшість компонентів тензора Рімана або дужок Лі рівні нулю (п. 2.2.3). Загалом Передача блоків протоколом TAW можна розглядати в евклідовому просторі. Це можна пояснити тим, що час $t_{OT_TAW} + t_{оик}$ є більшим, ніж t_{OT_JET} або t_{OT_INI} .

При передачі блоку даних за протоколом TAW, трафік пакету ВНР є вдвічі більшим, порівняно з протоколом сигналізації JET, а, отже, обмін інформацією між вузлами про стан мережі здійснюється частіше, що приводить до меншої ймовірності втрат.

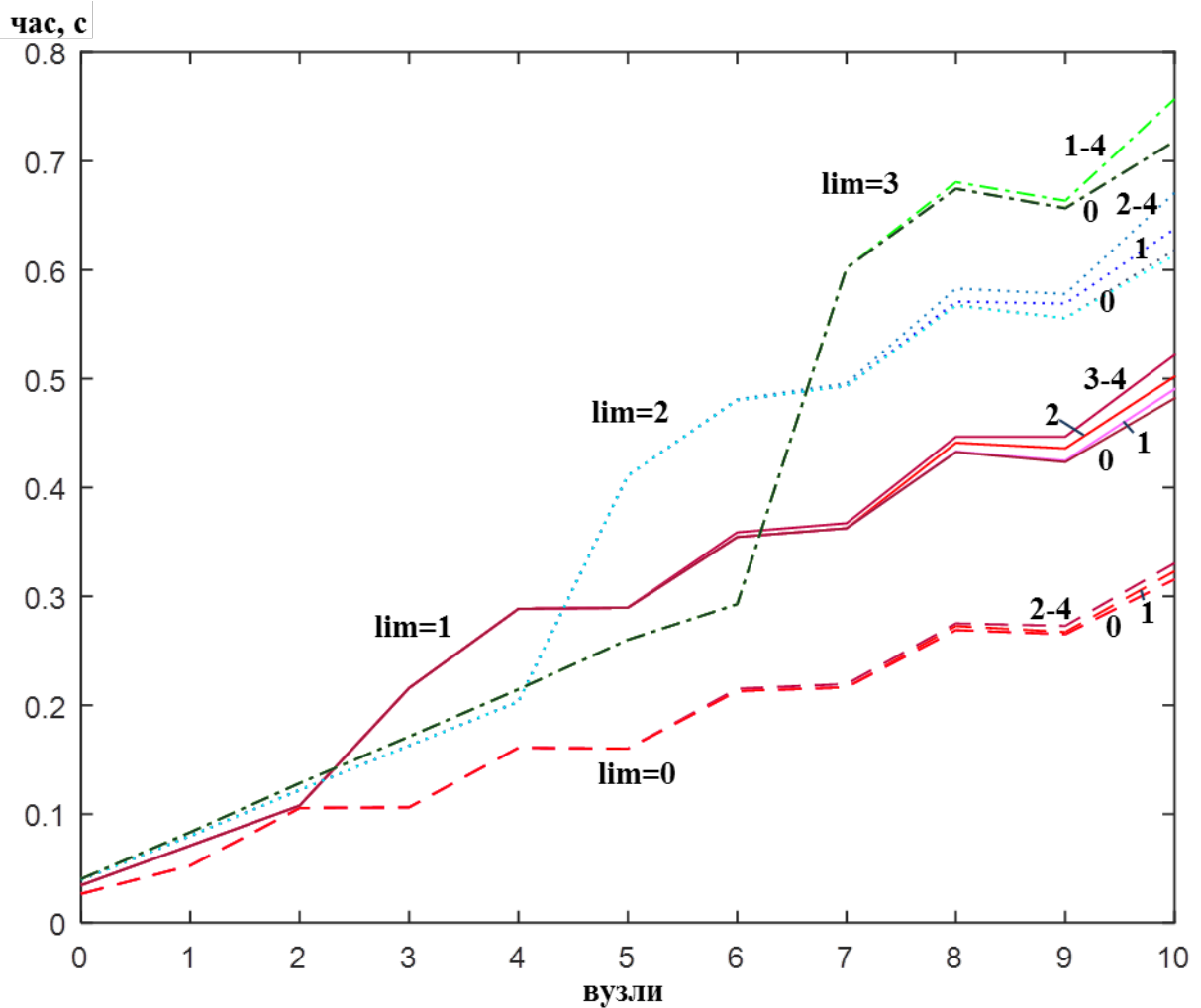


Рис. 6.17. Залежність часу доставки даних від кількості транзитних вузлів при максимальному завантаженні пакетів у блок для протоколу (числами позначено кількість місць у буфері)

Проведені дослідження показали, що для всіх протоколів сигналізації OBS при $\rho < 0,5$ більшість компонентів тензора Рімана і дужок Лі близькі до нуля. Отже, ймовірність втрат внаслідок неузгодженості отриманої інформації про зміну стану мережі на різних вузлах є мінімальною. Для протоколів сигналізації JET та INI при $\rho > 0,8$ треба збільшити інтенсивність передачі службових даних між вузлами. Зазначимо, що службові дані передають інформацію не тільки про заданий блок даних, але і про зміну стану мережі, яку отримано від різних вузлів. Таким чином, зміну навантаження в мережі при $\rho > 0,8$ доцільно передавати по службовим каналам одразу у всі вузли, наприклад за допомогою

6.8. Дослідження протоколів комутації блоків з використанням теорії перколяції

Проведемо аналіз ефективного використання OBS в PTN за допомогою теорії перколяції. Якщо в певний момент часу на вході у волокно на визначеній довжині хвилі передається певний блок, то канал вважається зайнятим. Вважатимемо, що канал є вільним, якщо виконуються кілька умов:

1. коли в певний момент часу на вході у волокно на визначеній довжині хвилі не передається блок даних;
2. якщо при передачі блоку у вхід волокна в цей же момент не надійде інший блок, передача даних якого могла бути зарезервована завчасно, наприклад при передачі згідно протоколу сигналізації TAW.

При використанні оптичного буфера необхідно враховуват, коли місця в ньому є зайнятими, а коли – вільними.

Вважається, що буфер є незайнятий, коли блок можна передати одразу у вхідне волокно із визначеною довжиною хвилі, хоча у буфері в цей час можуть перебувати інші блоки. Головною умовою є наступне: час передачі блоку не повинен накладатися з передаванням наступного блоку даних, що перебуває у буфері.

У буфері місця не послідовно можуть бути зайнятими і вільними. Вважається, що для певного блоку передачі даних зайнятими є вся сукупність місць у буфері до першого вільного місця, хоча далі деякі місця у буфері можуть бути зайнятими і вільними. Наприклад, коли для блоку вільним є друге місце у буфері, тоді зайнятим є одне місце, хоча третє місце може бути зайнятим іншим блоком.

Буфер є перевантажений, коли у визначений момент часу блок не можна передати у вхід волокна з певною довжиною хвилі, і всі місця буфера є зайнятими.

Моделювання для протоколу INI (при двох місцях у буфері) показало, що час доставки збільшується при ймовірності зайнятості комутаційного з'єднання між різними каналами від 0,8 і вище, коли середній вузол є граничний (рис. 6.18). Параметр p є ймовірністю зайнятості комутаційного

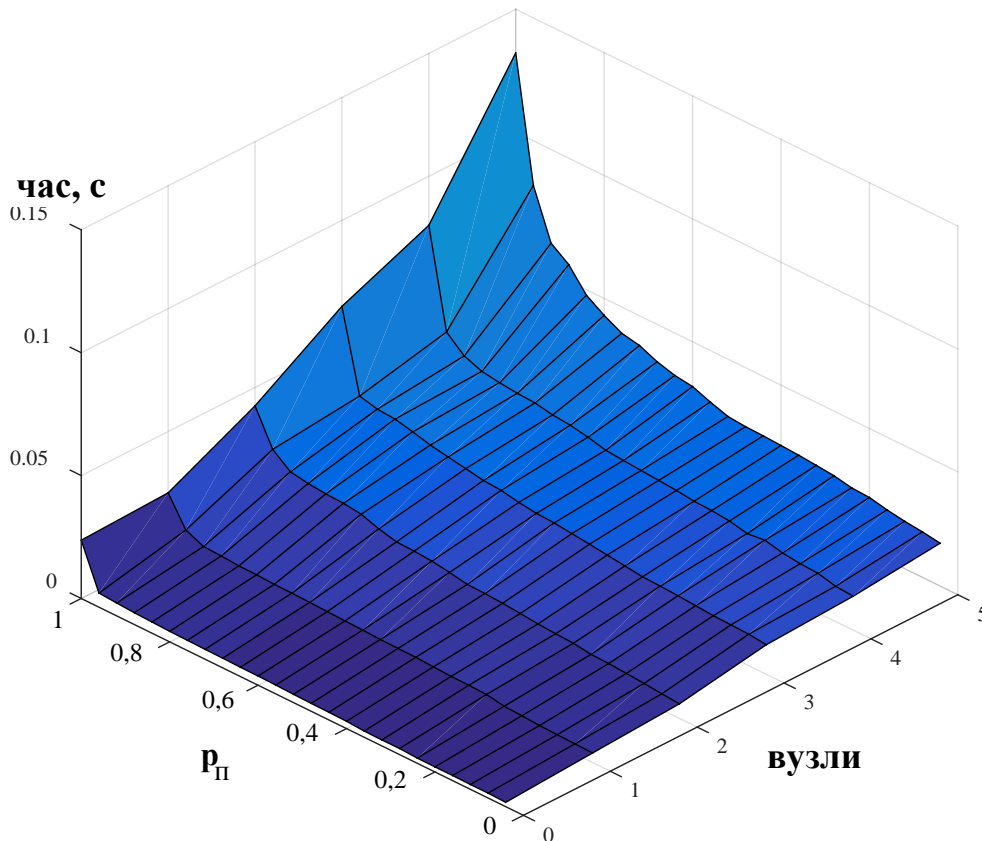


Рис. 6.18. Діаграми залежності часу доставки даних від кількості транзитних вузлів та ймовірності завантаженості комутаторів при максимальному завантаженні пакетів у блоки для протоколу INI

з'єднання між різними каналами або ймовірністю завантаженості комутаторів. Втрати блоків залежать від кількості транзитних вузлів (рис.6.19). При двох і менше транзитних вузлах втрати є незначними, навіть при ймовірності зайнятості комутаційного з'єднання між різними каналами 0,9-0,95. При чотирьох і п'яти транзитних вузлах втрати не суттєві у випадку, коли $p < 0,15-0,2$. Таким чином, при малій кількості транзитних вузлів майже завжди можна здійснювати ефективно передачу даних для протоколу INI при

двох місцях у буфері, а при великій їх кількості доцільно передавати дані, коли $p < 0,15$.

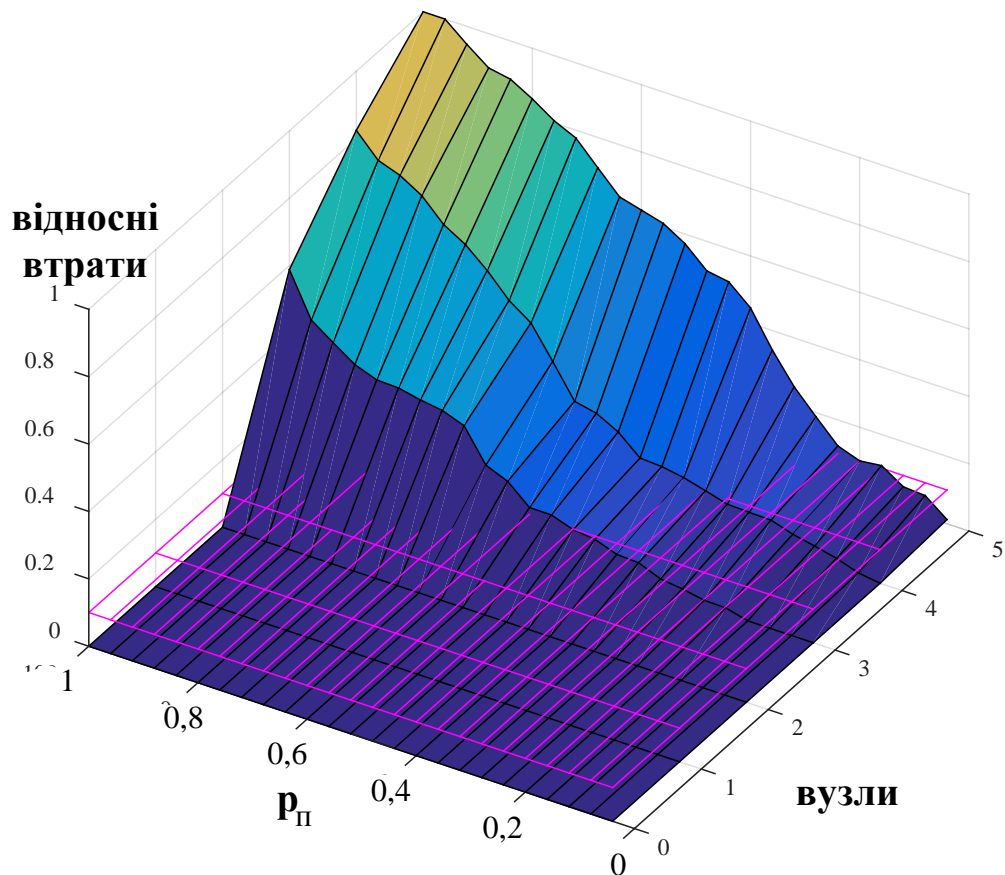


Рис. 6.19. Діаграми залежності відносних втрат від кількості транзитних вузлів та ймовірності завантаженості комутаторів при максимальному завантаженні пакетів у блоки для протоколу INI

Для протоколу JET (при двох місцях у буфері) час передачі блоків є кращим (рис. 6.20) порівняно з протоколом INI (рис. 6.18), крім випадку, коли транзитний вузол є один або його взагалі немає. Справді, у такому разі для гібридного протоколу INI передавання відбувається за протоколом JET, і тому результати співпадають.

Втрати при передачі блоків для протоколу JET є відчутно гіршими (рис. 6.21), ніж для протоколу INI (рис. 6.19).

Аналогічні результати спостерігаємо і для протоколу сигналізації TAW, де втрат немає, але час доставки є більшим, ніж у всіх інших протоколів.

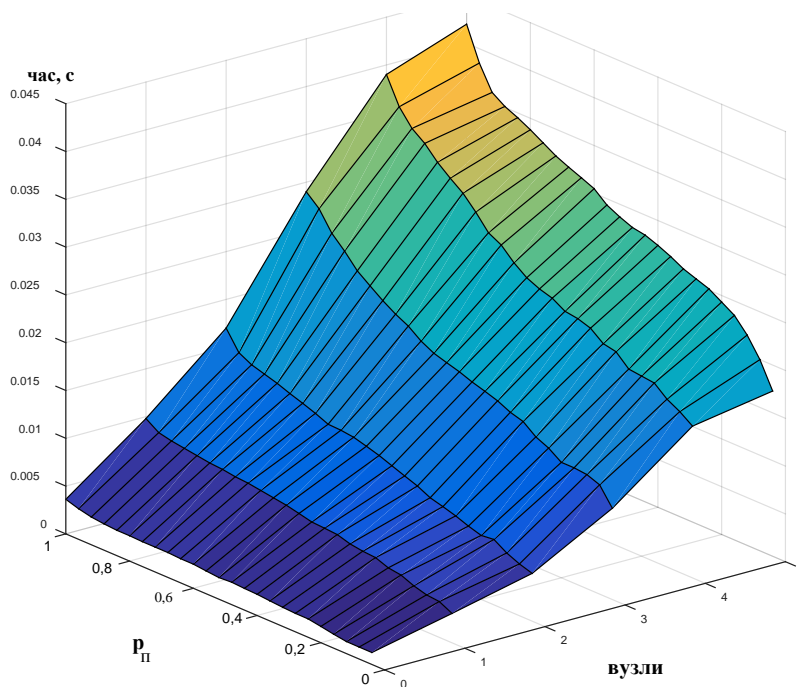


Рис. 6.20. Діаграми залежності часу доставки даних від кількості транзитних вузлів та ймовірності завантаженості комутаторів при максимальному завантаженні пакетів у блоки для протоколу JET

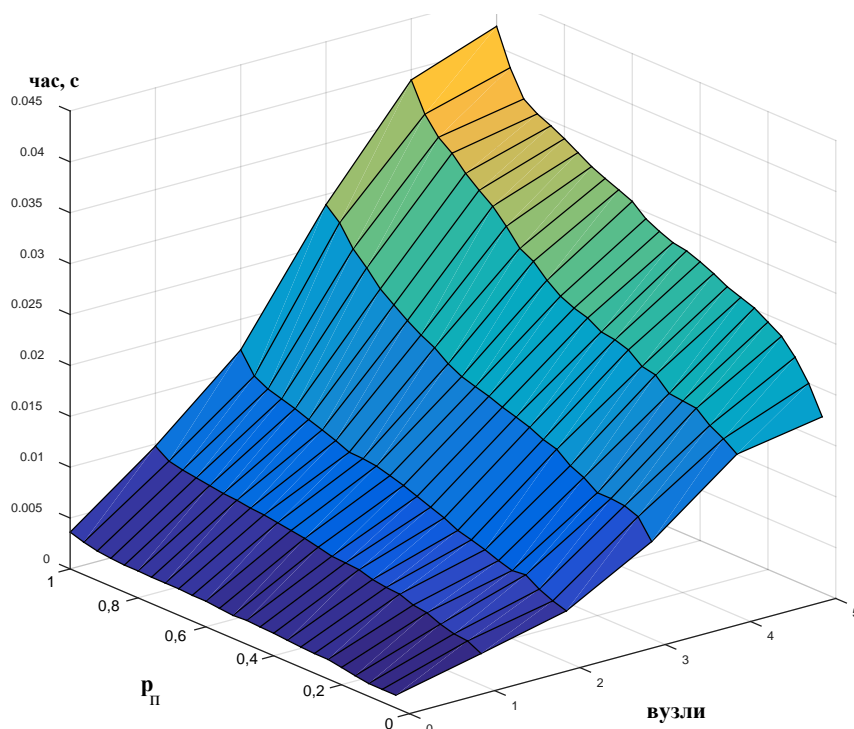


Рис. 6.21. Діаграми залежності відносних втрат від кількості транзитних вузлів та ймовірності завантаженості комутаторів при максимальному завантаженні пакетів у блоки для протоколу JET

6.9. Дослідження енергоефективності оптичного блоку комутації

Проведено дослідження енергоефективності OBS для протоколів TAW і JET. Оцінка здійснюється з використанням імітаційного моделювання [53]. Використано АО комутатор на рис. 6.2.

Для параметра енергоефективності використано співвідношення [12, 74]:

$$P_{switch}(V) = P_{proc}(v) + P_{genV}(v) + P_{wave}(v) + P_{cool}(v), \quad (6.12)$$

де $P_{proc}(v)$ – енергоспоживання контролера, $P_{genV}(v)$ – енергоспоживання генератора напруги, $P_{wave}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на проведення хвильової конвертації, $P_{cool}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на охолодження комутатора.

Вихідні дані для моделювання представлено в табл. 6.2. В результаті моделювання було встановлено, що при збільшенні кількості пакетів в одному блоці енергетичне споживання OBS комутатора зменшується. Це виникає за рахунок того, що менша кількість ресурсів комутатора залучається при обробці того ж об'єму даних (службовий пакет передає дані про блок, який містить в собі більшу кількість пакетів).

Використання JET протоколу приводить до підвищення енергетичного споживання OBS комутатора. Це пояснюється тим, що протокол JET більш ефективно використовує доступну смугу пропускання кожного каналу зв'язку. Отже, комутатор повинен обробити більшу кількість службових пакетів для кожних блоків. Проте протокол JET зменшує кількість електроенергії, яка необхідна для передачі одного біта, на 12,7% (див. табл. 6.3 при 10 пакетах в блок). Однак при збільшенні кількості пакетів в блок, протокол TAW є більш енергоефективний (див. табл. 6.3 при 100 пакетів в блок). В OBS використовують три випадки кількості пакетів у блоці, а саме 100, 150 і 200. З табл. 6.3 випливає, що з точки зору енергоефективності протокол сигналізації TAW кращий, ніж JET.

Вхідні дані для моделювання OBS комутатора

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Контролер		Параметри кристалу і генератора	
Напруга, U	1,25 В	Акустичний опір матеріалу звукопроводу, Z_{sn}	29100 кг/с
Тактова частота, f	2,8 ГГц	Ширина акустичного стовпа, b	11 мм
СЄН ALU, C_{ALU}	310 пФ	Довжина акустичного стовпа, l	6 мм
СЄН тактового генератора, C_{clk}	3330 пФ	Довжина акустичної взаємодії, L	6 мм
СЄН кешу C_C	957 пФ	Коефіцієнт передачі, η	85%
СЄН кешу і шин C_{mchl}	0,088 фФ	Параметр АО якості, M_2	$15,9 \cdot 10^{-15}$ с ³ /кг
Параметри п'єзоперетворювача			
Резонансна частота п'єзоперетворювача, f	18,5 МГц	Механічна добротність п'єзоперетворювача, Q	200
П'єзомодуль матеріалу п'єзоперетворювача, d_{ij}	17,1 м ² /В	Висота ультразвукового п'єзоперетворювача, H	1 мм
Параметри оптичного тракту			
Кількість волокон	4	Кількість оптичних хвиль в одному волокні	10

З рис. 6.22 спотерігаємо, що зі зростом кількості пакетів покращується

Параметр енергоефективності для OBS комутатора

Протокол\кількість пакетів на блок	Параметр енергоефективності пВт/біт			
	10 пакетів	100 пакетів	150 пакетів	200 пакетів
TAW	0,563	0,213	0,167	0,132
JET	0,491	0,306	0,248	0,185
%	115	70	67	71

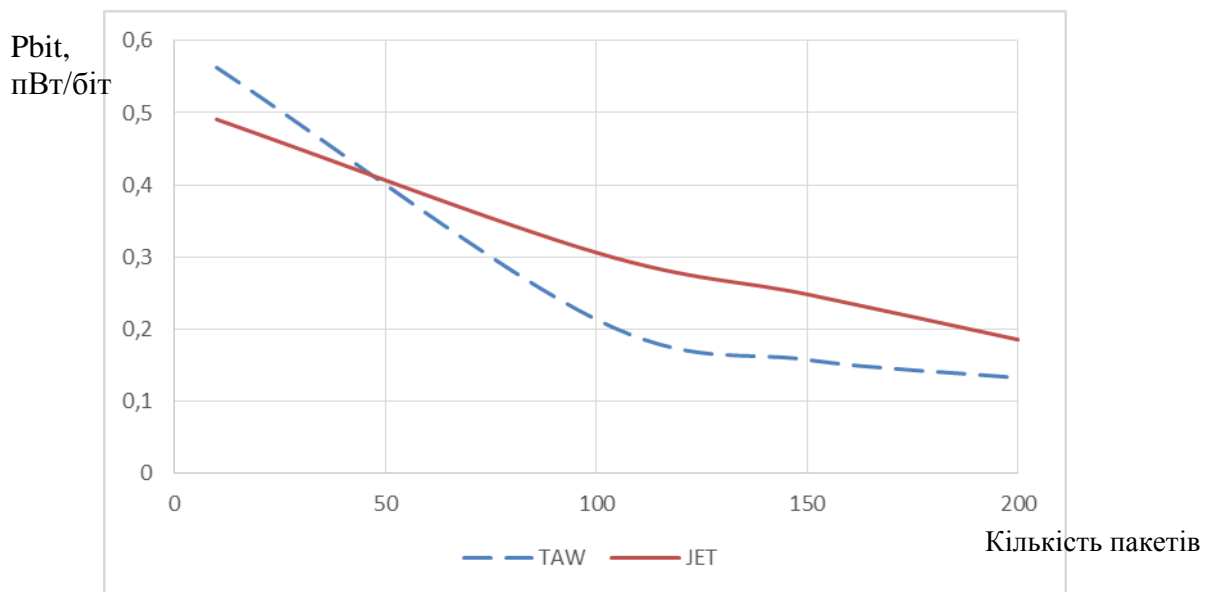


Рис. 6.22. Графік залежності параметра енергоефективності від кількості пакетів у блоці для протоколів TAW та JET [74]

параметр енергоефективності OBS. Проте при виборі мінімальної і максимальної кількості пакетів в блоці слід обов'язково звернути увагу на інші фактори крайового вузла мережі OBS – параметри якості обслуговування, допустимі втрати, ефективне використання пропускну здатності та ін. [328-330].

Отримані результати на рис.6.22 можна пояснити тим, що протокол JET приводить до збільшення енергетичного споживання OBS комутатора. Це виникає через принцип роботи даного протоколу. При передачі даних протоколом сигналізації TAW час використання обладнання в режимі

холостого ходу є більшим. Оскільки корисне навантаження відсилається із затримкою, то оптичні лінії простоюють – очікують передавання даного блоку. Це приводить до того, що параметр енергоефективності є меншим для протоколу сигналізації TAW. Можна стверджувати, що протокол JET більш ефективно використовує оптичні ресурси, тобто передає більшу кількість блоків в певному оптичному каналі по відношенню до протоколу TAW. Але більша кількість пакетів у блок приводить до зростання роботи OBS комутатора, що спричинює збільшення енергетичного споживання.

Водночас зазначимо, що збільшення кількості пакетів у блоці приводить до покращення параметра енергоефективності OBS комутатора.

Висновки до розділу 6

1. Сформовано підходи для використання OBS для PTN. 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.

2. Представлено математичну модель OBS та алгоритм функціонування імітаційної моделі оптичної комутації блоків в PTN. Проведено аналіз протоколів сигналізації для OBS на основі випадкових графів. 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 її здійснення. Визначено, що кількість місць у буфері доцільно обмежити п'ятьма місцями.

3. Проведено аналіз ефективності різних протоколів OBS в залежності від завантаження мережі. Визначено, що протокол TAW доцільно використовувати при максимальному завантаженні пакетів у блоки, коли мережа є квазіперенавантажена. Виявлено, що при ефективному чи нормальному завантаженні пакетів у блоки рекомендовано використовувати

протокол сигналізації JET. Дослідження показали, що при ефективному завантаженні пакетів у блок, протокол сигналізації TAW недоцільно використовувати для передачі даних для випадку $\rho=0,98$. 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 $\rho>0,5$.

4. 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. 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.

5. В роботі розглянуто можливість використання різних протоколів в залежності від розміру блоків. Встановлено, що при змінному завантаженні пакетів у блок з використанням різних протоколів сигналізації час затримки є меншим, порівняно з використанням лише протоколів сигналізації JET.

6. 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, але забезпечується фактично відсутність втрат блока.

7. Проведено аналіз ефективності використання протоколів OBS за допомогою теорії перколяції. Визначено сприятливі умови передачі даних у залежності від ймовірності зайнятості з'єднань у вузлі для різної кількості транзитних вузлів. Встановлено, що для протоколу JET час передачі блоків є

кращим, порівняно з протоколом INI, але водночас втрати при передачі блоків є більшими.

8. Оцінено 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 TAW.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну наукову проблему підвищення ефективності PTN 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 PTN. Вказано на необхідність впровадження математичних підходів, які дозволяють визначити ефективність використовуваних моделей, методик, алгоритмів в досліджуваних PTN. Результати проведеного аналізу підтверджують актуальність подальшого дослідження PTN з пошуком шляхів мінімізації часових параметрів, ймовірності втрат даних та витрат енергоресурсів використовуваних 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 напряму 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 EO коефіцієнта та коефіцієнта АО якості приводить до зменшення енергетичного споживання EO 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.

ЛІТЕРАТУРА

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.
3. Klymash M. Performance analysis of optical burst switching networks for different signaling protocols / M. Klymash, M. Kaidan, S. Dumych // Smart Computing Review, 2015. – Vol. 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. – vol. 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". Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів, 2014. – № 796. - С. 147–156.
6. Kaidan M.V. The indicative surfaces of photoelastic effect for Cs₂HgCl₄ 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 LiNbO₃ / 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 LiNbO₃ 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. - Vol.6. - No.4. - P. 34-44, August 2016.

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

13. 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.

14. 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.

15. 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.

16. 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.

17. 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.

18. 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 р. - №618. - С.138-144.

19. 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.

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

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

25. Кайдан М.В. Тензорна модель системи зв'язку фотонної транспортної мережі / М.В. Кайдан, М.М. Климаш М.М. // Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку. – 2014. – №3(31) – С. 10-13. 20.

26. 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.

27. Климаш М.М. Оптимізація багатошарової 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.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. 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.

33. 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.

34. 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.

35. 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.

36. Strykhalyuk B. Tensor models for the efficient multipath routing in large-scale communication networks / B. 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.

37. 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.

38. 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, February 25 – March 1, 2014, Lviv-Slavske, Ukraine – P.487-488.

39. 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.

40. 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, February 21–24, 2012. - P. 246-248.

41. 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 (EWDTW'06), Sochi, Russia, September 15-19, 2006. – P.179-183.

42. 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, Wroclaw 12-14, October 2006 – P. 396-399.

43. 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, Wroclaw 12-14, October 2006 – P. 562-565.

44. 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.

45. 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.

46. 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”, September 17-20, 2007, Kharkiv, Ukraine. – P.82.

47. 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, October 1–6, 2007, Partenit, Crimea, Ukraine. – P.170.

48. 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). – Alushta, Krimea, Ukraine. – 2-4 October 2008 - P. 66-68.

49. 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.

50. 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). – Sevastopol, Crimea (Ukraine). – September 10-14, 2010.-P.172-174.

51. Klymash M., Kaidan M., Koval V. Algorithm of optical transport network modeling based on percolation theory. т36. місце видання невідоме : // Modern problems of radio engineering, telecommunications and computer science - Proceeding of the XIIIth International Conference TCSET 2016, February 23 – 26, 2016, Lviv-Slavske, Ukraine – P.674-676.

52. 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), September 11-16, 2016, Kyiv, Ukraine.- P.338-340.

53. 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)” October 4-6, 2016 Kharkiv,Ukraine - picst16_10. P.1-3.

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

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)” October 13-15 ,2015 Kharkiv,Ukraine.- P.167-170.

56. Андрушак А.С. Проведення 3D-аналізу анізотропії ефектів в кристалах при розробці на їх основі модуляторів світла для сучасних волоконнооптичних систем передачі інформації/ А.С. Андрушак, 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“ – Львів, Україна, 17-20 жовтня 2007. – С. 25-26.

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

58. Бурий О.А. Оптимізація геометрії взаємодії електромагнітної та акутооптичної хвиль в акутооптичних приладах, що працюють в режимі Бреґівської дифракції/ О.А. Бурий, Д.М. Винник, С.Б. Убізький, А.С. Андрушак, 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.

59. 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.

60. 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. – АР Крим, Ялта-Лівадія 10-14 жовтня 2011 р. – С.27-30.

61. 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» – Львів, 27-30 жовтня 2011 р. – С.73-77.

62. 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", (Львів, 27-30 жовтня 2011 р.). - Львів, 2011. - С. 97-99.

63. 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” – ДУІКТ-Карапти, 17-21 січня 2012 р. – С.160-164.

64. 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., АР Крим, Ялта-Лівадія.- С.37-38.

65. 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., АР Крим, Ялта-Лівадія.- С.116-117.

66. 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.

67. 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 симпозиум “Нові технології в телекомунікаціях”, Матеріали конференції 21-25 січня 2013 р ДУІКТ-Карпати, м.Київ, 2013. - С.103-106.

68. 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 симпозиум “Нові технології в телекомунікаціях” Матеріали конференції 21-25 січня 2013 р, ДУІКТ-Карпати, м.Київ, 2013. - С.143-146.

69. 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, 2013. – С.211-214.

70. 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 телекомунікацій–2014”. СПТЕЛ-2014 Матеріали конференції 30-жовтня – 2 листопада 2014 – Львів, 2014. – С. 81-84.

71. 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.

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

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

74. Кайдан М. Дослідження енергоефективності процесу комутації блоків даних у оптичних транспортній мережі / М. Кайдан, В. Андрушак // V Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах»- 3-5 листопада 2016 р - м.Чернівці, Україна.- С.202-203.

75. 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". Радіoeлектроніка та телекомунікації . – 2016. - №846.-С.185-193.

76. Кайдан М.В. Дослідження анізотропних оптичних волокон / М.В. Кайдан //Всеукраїнська науково-практична конференція „Сучасні проблеми телекомунікацій і підготовка фахівців в галузі телекомунікацій–2014”. СПТЕЛ-2014: Матеріали конференції, 30-жовтня – 2 листопада2014 – Львів, 2014. – С.184-185.

77. Hu H. Single source 5-dimensional (space-, wavelength-, time-, polarization-, quadrature-) 43 tbit/s data transmission of 6 SDM \times 6 WDM \times 1.2 Tbit/s Nyquist-OTDM-PDM-QPSK / H. Hu, F. Ye, A. Medhin, P. Guan, H. Takara, Y. Miyamoto, H. Mulvad, M. Galili, T. Morioka, and L. Oxenlowe. // Conference on Lasers and Electro-Optics, OSA Technical Digest (Optical Society of America, 2014) – San Jose ,California, USA – paper JTh5B.10, 2014. – Proc. Cleo 2014.

78. DTU slår verdensrekord for datatransmission. / Jens Ramskov. // CLEO 2014 - Mode of access: WWW.URL: <https://ing.dk/artikel/dtu-slaar-verdensrekord-datatransmission-169478>. – Title from the screen.

79. Хмелев К. Основы фотонного транспорта: монография / К. Хмелев - К.: Техніка, 2008. – 680 с.

80. G.872, ITU-T Rec. ITU-T Rec. G.872 Architecture of Optical Transport Networks (11.2001).

81. G.692., TU-T Rec. TU-T Rec. G.692. Optical Interfaces for Multi-Channel Systems With Optical Amplifiers (10.1998).

82. G.694.1., TU-T Rec. TU-T Rec. G.694.1. Spectral Grids for WDM Applications: DWDM Frequency Grid (06.2002).

83. G.694.2., TU-T Rec. TU-T Rec. G.694.2. Spectral Grids for WDM Applications: CWDM Wavelength Grid (06.2002).

84. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети: [учебное пособие] / В.Г. Фокин – М: Эко-Трендз, 2008. – 284 с.

85. Iannone E. Optical path technologies: A comparison among different cross-connect architectures/ E. Iannone, R. Sabella // IEEE Journal of Lightwave Technology. - 1996. - V.14. - №10. - P.2184-2196.

86. Marom D. Switching solutions for WDM-SDM optical networks / D. Marom, M. Blau // IEEE Communications Magazine - 2015. – V.53. – № 2 – P. 60-68.
87. Dods S.D. Homodyne crosstalk in WDM ring and bus networks / S.D. Dods, J.P.R. Lacey, R.S. Tucker // IEEE Photonics Technology Letters. – 1997. – V.9. – №9. – P. 1285-1287.
88. Li C.S. Crosstalk and interference penalty in all-optical networks using static wavelength routers / C.S. Li, F. Tong // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 1996. – V.14. – №6. – P. 1120-1126.
89. TU-T Rec. G.681. Functional Characteristics of Interoffice and Long-Haul Line Systems Using Optical Amplifiers, Including Optical Multiplexers (10.1996).
90. Idzikowski F. Power Consumption of network elements in IP over WDM networks. / F. Idzikowski // In: Technische Universität Berlin, Telecommunication Networks Group, TKN Technical Report TKN-09-006. –2009 - V. 7.– P. 1-16.
91. Smart 2020: Enabling the Low Carbon Economy in the Information Age – GeSI. GeSI, The Climate Group, 2008. – 87p.
92. Tucker R. Energy efficiency in cloud computing and optical networking. / R. Tucker, K. Hinton, R. Ayre // ECOC 2012 Tutorial.IEEE Network. – 2012. – P.1-6. (Th.1.G.1.)
93. Tellium. Optical switches: making optical networks a brilliant reality. – Mode of access: WWW.URL: http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/wdm/OXC_2.pdf. – Title from the screen.
94. Nebeling M. Coarse wavelength division multiplexing: technologies and applications/ M. Nebeling, H. J. Thiele - CRC Press 2007. - P.376.
95. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев – Москва, Эко-Трендз, 2000. – 276 с.
96. ECI Telecom. XDM™ - интеллектуальная масштабируемая оптическая сетевая платформа: Общее описание // Lightscape Networks Ltd. - март 2001. - № 2. - 198 с.

97. Siemens. Technical Description SURPASS hiT 7550. - 2003. –V.8 - №2. - P. 78.
98. Заркевич Е.А. Технические возможности современных кабельных систем передачи информации / Е.А. Заркевич, Е.Б. Алексеев, О.К. Скляров, С.А. Устинов // Электросвязь. - 2003. - №9. - С. 15 - 19.
99. Кись О.М. Проектування волоконно-оптичної транспортної мережі. Навчальний посібник / О.М. Кись, В.І. Корнійчук – Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. – 92 с.
100. Singh S.P. Nonlinear effects in optical fibers: origin, management and applications/ S.P. Singh, N. Singh // Progress in electromagnetics research, PIER. – V.73. – 2007. – P. 249.
101. Siemens. Technical Description DWDM Line Systems TransXpress Infinity WL, Release 2.3 and 2.35. 2000. – V.11. - P. 36.
102. Ericsson Telecom. General Description ERJONTM. – 2000.- V.2. – P. 47.
103. Lucent Technologies. WaveStar Optical Line Systems OLS 400 G. Application, Planning&Ordering Guide (APOG). – Release 3.0. –2000. - V.3. – №2. - P. 1022.
104. КРОКУС-КОМ (проспект компании): CWDM/DWDM системы передачи и коммутации Yumix-4000 производства «Lightmaze AG» (Германия). – 2007. – С. 2.
105. Росляков А. Future Networks. Версия МСЭ-Т. Часть 1/ Росляков А. // ИКС № 12. – 2014. – С. 68-70 – Режим доступа: <http://www.iksmedia.ru/articles/5158228-Future-Networks-Versiya-MSET-Chast.html>. – Назва з екрана.
106. Новости с «кухни» МСЭ: сети будущего. На вопросы «СиБ» о появлении нового стандарта Q.3001, посвященного сетям будущего, отвечает Виктор КАТОК, директор департамента научно-технической политики «Укртелекома» [Электронный ресурс] // Сети&Бизнес – № 58 – III., 2011. – С. 32-34 – Режим доступа: <http://www.sib>. – Назва з екрана.

107. Коновалов Г.В. Многомерные сети – будущее инфокоммуникационных сетей / Г.В. Коновалов // Электросвязь. – 2008. – № 4. – С. 28-32.
108. Dutta A.K. WDM technologies: optical networks/ A.K. Dutta, N.K. Dutta, M. Fujiwara // Oxford: Elsevier Academic Press. – 2004. – 315 p.
109. Green P.E. Optical Networking Update / P.E. Green // IEEE Journal on Selected Areas in Communications. – 1996. – V.14. – №5. – P. 764-779.
110. Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи/ Р. Фриман – Пер. с англ.: М.: Техносфера. – 2003. – 447 с.
111. Приюком. Технологія синхронної цифрової ієрархії (SDH). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://priocom.com/ua/products/arterial-networks/mps>.
112. ITU. Optical transport network (OTN) tutorial. [Electronic resource] – Mode of access: <http://www.itu.int/ITU-T/studygroups/com15/otn/OTNtutorial.pdf>. – Title from the screen.
113. Алексеев И.В. Введение в архитектуру MPLS/ И.В. Алексеев // Сети. – 1999. – №12 – С. 48- 53.
114. Коммутируемый по меткам тракт LSP [Електронний ресурс] <http://www.intuit.ru/studies/courses/1150/157/lecture/28716?page=3>
115. Гольдштейн А.Б. Технология и протоколы MPLS/ А.Б. Гольдштейн, Б.С. Гольдштейн - СПб.: БХВ– Санкт-Петербург, 2005. – 304 с.
116. Джураев Р.Х. Технологии передачи данных. [Електронний ресурс] Учебное пособие. / Р.Х. Джураев, Ш.Ю. Джаббаров, Б.М. Умирзаков – Ташкент – 2008. – Режим доступа: <http://uz.denemetr.com/docs/294/index-20865-1.html?page=5>. – Название с экрана.
117. Web ProForum Tutorials. Generalized Multiprotocol Label Switching (GMPLS) [Electronic resource]. // The International Engineering Consortium Mode of access: http://www.hit.bme.hu/~jakab/edu/litr/GMPLS/GMPLS_Tutorial.pdf. – Title from the screen.

118. Cisco. GMPLS Control Plane Services in the Next-Generation Optical Internet. [Electronic resource] – Mode of access: WWW.URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/about/press/internet-protocol-journal/back-issues/table-contents-41/113-gmpls.html>. – Title from the screen.

119. RFC 3945. Generalized Multi-Protocol Label Switching. [Electronic resource] – Mode of access: WWW.URL: <https://tools.ietf.org/html/rfc3945>. – Title from the screen.

120. Зингеренко Ю.А. Оптические цифровые телекоммуникационные системы и сети синхронной цифровой иерархии / Ю.А. Зингеренко – СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 393 с.

121. Бакланов И.Г. SDH-NGSDH Практический взгляд на развитие транспортных сетей / И.Г. Бакланов – Метротек, 2006. – 736 с.

122. Yan Y. FPGA-based optical programmable switch and interface card for disaggregated OPS/OCS data centre networks / Y. Yan, Y. Shu, G. M. Saridis, B. R. Rofoee, G. Zervas, D. Simeonidou. // 2015 European Conference on Optical Communication (ECOC) – Valencia, 2015,- P. 1-3.

123. Szymanski T.H. An FPGA controller for deterministic guaranteed-rate optical packet switching / T.H. Szymanski, M. Rezaee // 2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM) – Ottawa, ON, 11-15 May 2015. – P. 1177-1183.

124. Rezaee M. Demonstration of an FPGA controller for guaranteed-rate optical packet switching / M. Rezaee, T.H. Szymanski. // 2015 IFIP/IEEE International Symposium on Integrated Network Management (IM) – Ottawa, ON, 2015. – P. 1139-1140.

125. Tanaka K. Experimental Evaluation of Recovery From Multiple Failures in Multicore Fiber Links Using FPGA-Based Optical Switch Units / K. Tanaka, Y. Lee, E. Nomoto, T. Sugawara, H. Arimoto. // Journal of Lightwave Technology. – Jan.1, 1 2.– V. 33. – № 1. - P. 201-211.

126. Chen Y. Optical Burst Switching: A New Area in Optical Networking Research/ Y.Chen, C.Qiao, X.Yu // IEEE Network Magazine. – 2004. - V.18. - №3 – P. 16-23.
127. Balamurugan A.M. Optical burst switching issues and its features / A.M. Balamurugan, A. Sivasubramanian. // International Journal of Emerging Trends & Technology in computer Science (IJETTCS). – 2013. – V.2. – №3. – P. 306-315.
128. Клейнрок Л. Коммуникационные сети стохастические потоки и задержки сообщений / Л. Клейнрок; пер. с англ. – М: Наука, 1970. – 256 с.
129. Клейнрок Л. Вычислительные системы с очередями / Л. Клейнрок; пер. с англ. под ред. Б.С. Цыбакова. – М: Мир, 1979. – 600 с.
130. Кофман А. Массовое обслуживание (теория и приложения) / А. Кофман, Р. Крюон; пер. с фр. под ред. И.Н. Коваленко. – М.: Мир, 1965. – 302 с.
131. Филлипс Д. Методы анализа сетей / Д.Филлипс, А.Гарсиа-Диас; пер. с англ. – М.: Мир, 1984. – 496 с.
132. Diestel R. Graph Theory. Electronic Edition / R. Diestel – NY: Springer-Verlag, 2005. – 422 p.
133. Зыков А.А. Основы теории графов. / А.А. Зыков – М.: Вузовская книга, 2004. - 664 с.
134. Watts D.J. Small worlds: The dynamics of networks between order and randomness / D.J. Watts. – Princeton, NJ, 1999.- 280 p.
135. Barthelemy M. Small-world networks: evidence for a crossover picture. / M. Barthelemy, L.A.N. Amaral // Phys. Rev. Lett. – 1999 – V.82. – P. 3180-3183.
136. Albert R. Statistical mechanics of complex networks / R. Albert, A.L. Barabasi // Rev. Mod. Phys. – 2002. – V. 74. – P.47-97.
137. Erdős P. On random graphs. / P. Erdős, A. Rényi // Publicationes Mathematicae Debrecen. - 1959– V.6. – P. 290-297.

138. Erdos P. On the evolution of random graphs. / P. Erdős, A. Rényi // Bull. Inst. Internat. Statist. – 1961- V.38. - №4. – P. 343-347.
139. Соколов. Н.П. Пространственные матрицы и их приложения / Н.П. Соколов – М.: Физмат, 1960. – 299 с.
140. Kron G. Tensor analysis of networks. / G. Kron. – London: MacDonald, 1965. – 635 p.
141. Арменский А.Е. Тензорные методы построения информационных систем / А.Е. Арменский. – М.: Наука, 1989. – 148 с.
142. Пасечников И.И. Методология анализа и синтеза предельно нагруженных информационных сетей. Монография. / И.И. Пасечников – М.: «Издательство Машиностроение-1», 2004. – 216 с.
143. Петров А.Е. Тензорная методология в теории систем / А.Е. Петров – М.: Радио и связь, 1985. – 151 с.
144. Математичні основи теорії телекомунікаційних систем / В.В. Поповський, С.О. Сабурова, В.Ф. Олійник та ін.: За загальною редакцією В.В. Поповського. - Харків: ТОВ «Компанія СМІТ», 2006. - 564 с.
145. Лемешко А.В. Тензорная модель многопутевой маршрутизации с гарантиями качества обслуживания одновременно по множеству разнородных показателей / А.В. Лемешко, О.Ю. Евсеева // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. –Т.4, №9. – С.16-31.
146. Пасечников И.И. Анализ и синтез цифровых сетей связи на основе тензорного модельного отображения. / И.И.Пасечников – Тамбов: ТВАИИ, 2004. – 179 с.
147. Поповский В.В. Тензорный анализ в задачах системного исследования телекоммуникационных систем. / В.В. Поповский, А.В. Лемешко // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. – № 125 – 2002. – С. 156-164.
148. Григорьева Т.И. Применение свойства инвариантности тензора при математическом моделировании телекоммуникационных систем. /

Т.И. Григорьева // Наукові праці ОНАЗ ІМ. О.С. Попова – 2005. – № 2. – С. 49-53.

149. Кристофидес Н. Теория графов. Алгоритмический подход. / Н. Кристофидес – М.: Мир, 1978. – 429 с.

150. Оре О. Теория графов / О. Оре. – М.: Наука, 1980. – С. 336.

151. Свами М. Графы, сети и алгоритмы / М. Свами, К. Тхуласираман – М.: Мир, 1984. – 455 с.

152. Татт У. Теория графов. / У. Татт; пер. с англ. – М.: Мир, 1988. – 424 с.

153. Christensen K. Evolution of Random Networks / K. Christensen, R. Donangelo, B. Koiler, K. Sneppen. // Phys. Rev. Lett. – 1998. – V.81. - P. 2380-2383.

154. Тарасевич Ю.Ю. Перколяция: теория, приложения, алгоритмы / Ю.Ю. Тарасевич – М.: УРСС, 2012. – 112 с.

155. Эфрос А.Л. Физика и геометрия беспорядка. (Библиотечка «Квант», выпуск 19). / А.Л. Эфрос. – М.: Из-во «Наука», 1982. – 176 с.

156. Алешкин А.С. Использование теории перколяции при описании информационных вычислительных сетей / А.С. Алешкин // Информатизация и глобализация социально-экономических процессов: сб. науч. тр. II Междунар. науч.-практ. конф. – М.: ВНИИПВТИ, 2007. – 16 с.

157. Тарасевич Ю.Ю. Математическое и компьютерное моделирование / Ю.Ю. Тарасевич. – М.: Едиториал УРСС, 2003.- 144 с.

158. Голубев А.С. Эффект перколяции в информационных сетях с неустойчивыми связями. / А.С. Голубев, М.Ю. Звягин, Д.С. Милованов. // Информационные технологии Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 3 (2). – С. 260–263.

159. Иванской В.А. Подходы теории перколяции и свободная энергия кластеров дислокаций / В.А. Иванской. // Журнал технической физики. – 2008. – Т. 78. – Вып. 4. – С. 65-75.

160. Стрелковская И.В. Исследование характеристик качества систем сложной структуры с применением тензоров на основе декомпозиции / И.В. Стрелковская, И.Н. Соловская, Г.Г. Смаглюк. // Проблемы телекоммуникаций. – 2012. – № 3 (8). – С. 47 – 57.
161. Нарр Н.Н. Diakoptics and networks. / Н.Н. Нарр. – Academic Press, New York, 1971. – 312 p.
162. Сиротин Ю.И. Основы кристаллофизики. / Ю.И. Сиротин, М.П. Шаскольская – М.: Наука, 1979. – 640 с.
163. Балакший В.И. Физические основы акустооптики. / В.И. Балакший, В.Н. Парыгин, Л.Е. Чирков. – М.: Радио и связь, 1985. – 280 с.
164. Стрихалюк Б.М. Підвищення ефективності динамічної маршрутизації у гетерогенних сервісно-орієнтованих системах з використанням гіперболічних потоків Річі / Б.М.Стрихалюк, Ю.В. Климаш, І.Б. Стрихалюк, Б.В. Коваль // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : збірник наукових праць. – 2015. – № 818. – С. 189–194.
165. Nye J.F. Physical Properties of Crystals. / J.F. Nye – Oxford: Clarendon, 1985. – 325 p.
166. Агранович В.М. Кристаллооптика с учетом пространственной дисперсии и теория экситонов: монография / В.М. Агранович, В.Л. Гинзбург. – М. : Наука, 1979. – 432 с.
167. Романюк М.О. Кристаллооптика [навч. посіб. для студ. радіофіз. спец.] / М.О. Романюк. – М-во освіти України, Ін-т змісту і методів навчання, Львів. держ. ун-т. – К.: 1997. – 431 с.
168. Theocaris P.S. Matrix theory of photoelasticity. / P.S.Theocaris, E.E. Gdoutos. – Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1979. – 352 p.
169. Блистанов А.А. Акустические кристаллы: Справочник. / А.А. Блистанов, В.С. Бондаренко, В. В. Чкалова и др.; Под ред. М.П. Шаскольской. – М.: Наука, 1982 – 632 с.

170. Dmitriev V.G. Handbook of nonlinear optical crystals. / V.G. Dmitriev, G.G. Gurzadyan, D.N. Nikogosyan. – Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 1997. – 414 p.

171. Схоутен Я.А. Тензорный анализ для физиков. / Схоутен Я.А.; пер. с англ. – М., 1965. – 456 с.

172. Мицик Б.Г. Фотопружність анізотропних матеріалів: [монографія] / Б.Г. Мицик; ред.: З. Т. Назарчук; НАН України, Фіз.-мех. ін-т ім. Г.В. Карпенка. – Л. : Ліга-Прес, 2012. – 399 с.

173. Кожем'яко В.П. Перспективи застосування фотонних кристалів у сучасних системах обробки даних. / В.П. Кожем'яко, О.А. Іванов, І.А. Іванов. – Наукові праці ВНТУ. 2012. – № 4. – С. 1-4.

174. Слепов Н. Фотонно-кристаллическое волокно – уже реальность. Новые типы оптических волокон и их применение. / Н.Слепов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. – №5. – С. 80-84.

175. Luo C.L. All-angle negative refraction without negative effective index/ C.L.Luo, S.G.Johnson, J.D.Jannopoulos, J.B. Pendry// Phys. Rev. B. - 2002.- V. 65. - P.201104–201107.

176. Kosaka H. Phenomena in photonic crystals: Toward microscale lightwave circuits / H. Kosaka, T. Kawashima, A. Tomita, M. Notomi, T. Tamamura, T. Sato, S. Kawakami, J. Superprism. // Journal of Lightwave Technology - 1999. - V.17. - P. 2032 – 2038.

177. Cubukcu E. Negative refraction by photonic crystals / E. Cubukcu, K. Aydin, E. Ozbay, S. Foteinopoulou, C. M. Soukoulis // Nature. – 2003. - V. 423. - P. 604–605.

178. Желтиков А. Микроструктурированные световоды для нового поколения волоконно-оптических источников и преобразователей световых импульсов / А. Желтиков // УФН. - 2007. - Т. 122, №7. - С. 737-762.

179. Cundiff S.T. Optical frequency synthesis based on mode-locked lasers/ S.T. Cundiff, J.Ye, J.L.Hall // Rev. Sci. Instrum. -2001. - V. 72.- N 10. - P. 3749-3771.

180. Momeni B. Optimization of photonic crystal demultiplexers based on the superprism effect / B.Momeni, A.Adibi // Appl. Phys. B. – 2003. – V.77.- N 6-7. – P.555-560.

181. Килин С.Я. Квантовая информация / С.Я. Килин // УФН. – 1999. – Т.169, N5. - С.507-527.

182. <http://www.dailytechinfo.org/electronics/6107-sozdan-pervyy-v-mire-kvantovyy-fotonnyy-marshrutizator.html>. dailytechinfo.org.

183. Li M.J. Effect of residual stress on polarization mode dispersion of fibers made with different types of spinning / M.J. Li, X. Chen, D.A. Nolan // Opt. Lett. – 2004. – Vol. 29, No5. – P. 448-450.

184. Беспрозванных В.Г. Нелинейные эффекты в волоконной оптике / В.Г. Беспрозванных, В.П. Первадчук – Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2011. – 228 с.

185. Agrawal G.P. Nonlinear Fiber Optics/ G.P.Agrawal — Academic Press, 2013. - 629 p.

186. Семенов А.Б. Структурированные кабельные системы / А.Б. Семенов, С.К. Стрижаков, И.Р. Сунчелей - Москва: АйТи Пресс 2004.- 640 с.

187. Данилов В.В. Классификационный анализ акустооптических устройств управления лазерным пучком / В.В. Данилов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре - 2000. - № 2-3. - С. 52-57.

188. Берикашвили В.Ш. Электрооптические модуляторы и фильтры на основе кольцевых микрорезонаторов для волоконно-оптических систем связи. / В.Ш.Берикашвили, Н.Т. Ключник, М.Я.Яковлев. // Берикашвили. місце видання невідоме : / Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2011. - №4. – С. 3-9.

189. Yadav. R. Survey and comparison of optical switch fabrication techniques and architectures. / R.Yadav, R.R.Aggarwal // Journal of computing – 2010. – V.2, - N.4. – P. 133-137.

190. Watanabe K. Extremely-low-power-consumption thermo-optic switch with silicon-silica hybrid structure / K. Watanabe, R. Kasahara, Y. Hashizume. // NTT Technical Review – 2010. -V.8. – N.2. – P.1-5.
191. Bahuguna R. Magneto-optic-based fiber switch for optical communications. / R.Bahuguna, M. Mina, J-W. Tioh, R.J. Weber // Bahuguna: IEEE Trans. Magn. – 2006. – V. 42, N. 10. – P. 3099–3101.
192. Scholles M. Electro-optical liquid crystal waveguide switch / M. Scholles, F. Costache // Fraunhofer institute for photonic microsystems ipms.: Mode of access: WWW.URL: www.ipms.fraunhofer.de/content/dam/ipms/common/products/AMS/lc-multiplexer-e.pdf. - Title from the screen.
193. Маккавеев В. Фотонные коммутаторы / В. Маккавеев // Компоненты и технологии -2006. - №2. –С.142-146.
194. Слепов. Н.Н. Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н.Н. Слепов– Москва. – 2000. – с.339.
195. EOspace. EOspace. “Exceptionally-low-loss LiNbO₃ optical devices & ICs”. Интернет: <http://www.eospace.com/pdf/EOSPACЕ-custom-optical-switch.pdf>.
196. Todoroki S. Optical fuse by carbon-coated TeO₂ glass segment inserted in silica glass optical fiber circuit. / S.Todoroki, S.Inoue. // Japanese journal of applied physics. – 2004. – V.43. – P.256-257.
197. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. 3 том, 2 книга. / В.Вуйцік, З.Готра, В.Черпак та ін. – Х: Львів. – Ліга-Прес. – 2007. – с.81.
198. Нарасимхамурти Т. Фотоупругие и электрооптические свойства кристаллов / Нарасимхамурти Т.: пер. с англ. : - М.: Мир, 1984. – 624 с.
199. Колодезная Г.В. Оптические системы передачи / Г.В. Колодезная. – Учебное пособие. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2002. – 99 с.
200. Магдич Л.Н. Акустооптические устройства и их применение / Л.Н. Магдич, В.Я. Молчанов – М. : Сов.радио, 1978. – 112 с.
201. Утида Н. Материалы и методы акустооптического отклонения / Н. Утида, Н. Ниидзеки: ТИИЭР. – 1973. – Т. 61, №8. – С. 21-43.

202. Корпел А. Акустооптика: Обзор основных принципов / А.Корпел: ТИИЭР. – 1981. – Т. 69, №1. – С. 55-62.
203. Klein W.R. Unifind approach to ultrasonic light diffraction./ W.R. Klein, B.D. Cook: IEEE Trans. – 1967. - Vol.SU-14, №3. - P. 123-134.
204. Купченко Л.Ф. Выбор условий акустооптического взаимодействия для процессоров, используемых составляющие второго порядка брэгговской дифракции / Л.Ф. Купченко, Ю.М. Плахов, О.В.Ефимова, В.Б. Лобырев, Е.Л. Черкашина, Шевченко А.В.. // Радиофизикаи радиоастрономия : Харків. – 2002. – Т. 7, №2. – С. 201-207.
205. Янг Э.Х. Расчет акустооптических устройств / Э.Х.Янг, Ш.Яо – ТИИЭР : 1973. – Т. 69, №1. – С. 62-74.
206. Бондаренко В.С. Акустооптические модуляторы света / Бондаренко В.С., Зоренко В.П., Чкалова В.В. – М.: Радио и связь, 1988. – 136 с.
207. Ярив А. Оптические волны в кристаллах / Ярив А., Юх П. ; Пер. с англ. - М.: Мир, 1987. - 616 с.
208. Писаревский Ю.В. Рассеяние света на упругих волнах в оптически двуосных кристаллах / Ю.В. Писаревский, И.М. Сильвестрова // Кристаллография. – 1973. – Т. 18, №5. – С. 1003-1013.
209. Бондаренко В.С. Об экстремальных направлениях анизотропной дифракции и коллинеарного акустооптического взаимодействия. місце видання невідоме / В.С. Бондаренко, О.А. Бышевский, Н.В. Переломова, Л.Е.Чирков // Кристаллография. – 1986. – Т. 31, №2. – С. 333-336.
210. Мустель Е.Р. Методы модуляции и сканирования света. / Е.Р. Мустель, В.Н. Парыгин - М.: Наука, 1970. - 296 с.
211. Бышевский О.А. Связь экстремумов акустооптического взаимодействия с элементами симметрии кристаллов / О.А. Бышевский, Н.В. Переломова, Чирков Л.Е. // Оптика анизотропных сред. – М.: МФТИ. – 1987. – С. 143-145.

212. Nelson D.F. Electric, optic and acoustic interaction in dielectric / D.F. Nelson - New York : A Wiley-Interscience publication, 1979. – 539 p.
213. Dieulesaint E. Elastic waves in solids: applications to signal processing / E. Dieulesaint, D. Royer, J. Wiley : Chichester – 1980.- 511 p.
214. J. Luu. Optical Switching.// – Mode of access: <http://services.eng.uts.edu.au/~kumbes/ra/Emerging/OpticalSwitchingReport/justin/optical.htm#>
215. EOspace. “Exceptionally-low-loss LiNbO3 optical devices & ICs”. Интернет: <http://www.eospace.com/pdf/EOSPACE-custom-optical-switch.pdf> .
216. McCarron D.J. A Guide to acousto-optic modulators. Интернет: <http://massey.dur.ac.uk/resources/slcornish/AOMGuide.pdf> .
217. Enscoe R.F., Kocka R.J. Electro-optic modulation: system and applications. Интернет: http://www.polytec.com/fileadmin/user_uploads/Products/Laser_und_Zubehoer/Laserkomponenten/Documents/Accessories.pdf.
218. Murakami M. Analyzing power consumption in optical cross-connect equipment for future large-capacity optical network / M. Murakami // Journal of network. – Vol.5. – No.11. – P.1254-1259.
219. S. Perrin. The need for next-generation ROADM network. Интернет: http://www.calient.net/wp-content/uploads/downloads/2010/11/NG_ROADM_WP.pdf
220. Слепов Н. Оптические волновые конверторы и модуляторы / Н.Слепов// Электроника: наука, технология, бизнес//. – 2000. - №. – С.6.-10.
221. Boyd R.W. Nonlinear optical materials/ R.W. Boyd, G.L.Fischer. // Encyclopedia of Materials: Science and Technology. Amsterdam: Elsevier, – 2001. - P. 6237–6244.
222. Ramamurthy B. Wavelength conversion in WDM networking/ B. Ramamurthy, B. Mukherjee.// IEEE journal on selected areas in communications – 1998. Vol.16. – No.7. – P. 1061 - 1073.

223. Hinton K. Power consumption and energy efficiency in the internet / K. Hinton, J. Baliga, M. Feng, R. Ayre and R. S. Tucker // IEEE Network - V.25, N2. - 2011. -P.6-12
224. Богуш М.В. Пьезоэлектрическое приборостроение: сборник в 3 томах. / М.В. Богуш - Ростов-на-Дону: Издательство СКНЦ ВШ, 2006. - Т. 3. Пьезоэлектрические датчики для экстремальных условий эксплуатации. - 346 с.
225. Сапожков М.А. Электроакустика. / М.А. Сапожков - М., «Связь», 1978. - 272 с.
226. Фурдудев В.В. Акустические основы вещания/ В.В. Фурдудев [Учеб. пособие для втузов]. - М.: Связьиздат, 1960. - 320 с.
227. Physical acoustics-principles and methods / edited by W.P. Mason- volume I, Parts A and B, Methods and Devices, New York: Academic Press Inc. Cloth. - V.IA 1964- 515 p.
228. Красильников В.А. Введение в физическую акустику/ В.А. Красильников, В.В. Крылов - М.: Наука, 1984. — 403 с.
229. Королюк А.П., Мацаков Л.Я., Васильченко В.В. Определение упругих и пьезокристаллических постоянных монокристаллов ниобата лития / А.П. Королюк, Л.Я. Мацаков, В.В. Васильченко // Кристаллография –1970 - Т.15, №5 - С.1028-1032.
230. Xue D. The effect of stoichiometry on nonlinear optical properties of LiNbO₃ / D. Xue, S. Zhang // J. Phys.: Condens. Matter. – 1997. – V. 9 – P. 7515–7522.
231. Abrahams S.C. Ferroelectric lithium niobate. III. Single crystal X-ray diffraction study at 24°C / S.C. Abrahams, J.M. Reddy, J.L. Bernstein // J. Phys. and Chem.Solids. – 1966. – V. 27. – P. 997–1012.
232. Мыщык Б.Г. Неоднозначность выбора кристаллофизической системы координат при изучении пьезооптического эффекта на примере кристаллов LiNbO₃ / Б.Г. Мыщык, А.С. Андрущак // Кристаллография. –1990. – Т.35. – С. 1574–1575.

233. Palik E.D. Lithium Niobate (LiNbO_3). Handbook of Optical Constants of Solids / Palik E.D. – Amsterdam: Elsevier, 1997. – P. 695–702. . Palik.
234. Byer R.L. Growth of high-lithium niobate crystals from the congruent melt / R.L. Byer, J.F. Young // J. Appl. Phys. – 1970. – V. 41. P. 2320-2325.
235. Ballman A.A. Growth of piezoelectric and ferroelectric materials by Czochralski technique / A.A. Ballman // J. Amer. Ceram. Soc. – 1965. – V. 48. – P. 112–113.
236. Chen H. Growth of LiNbO_3 crystals by the Bridgman method / H. Chen, H. Xia, J. Wang [et al] // Journal of Crystal Growth. – 2003. – V. 256. – P. 219–222.
237. Влох О.Г. Пространственное распределение пьезоиндуцированного изменения оптического пути на примере кристаллов ниобата лития. / О.Г. Влох, Б.Г. Мыцык, А.С. Андрущак, Я.В. Прыриз // Кристаллография. - 2000. - Т.45. - №1.- С.144–150.
238. Веневцев Ю.Н. Сегнетоэлектрики LiNbO_3 и LiTaO_3 : структура, синтез, свойства и применение / Под ред. Н.В. Белова. – Москва: Наука, 1973, С. 118-133. Веневцев.
239. Mytsyk B.G. The lithium niobate piezooptical features / B.G. Mytsyk, Ya.V. Pryriz, A.S. Andrushchak // Cryst. Res. Technol. – 1991. – V.26. – P. 931–940.
240. Lenzo P.V. Electro-optic coefficients in single-domain ferroelectric lithium niobate / P.V. Lenzo, E.G. Spencer, K. Nassau // J. Opt. Soc. Amer. – 1966. – V. 56. - P. 633 – 635.
241. Turner E.H. High-frequency electrooptic coefficients of lithium niobate / E.H. Turner // Appl. Phys. Lett. – 1966. – V.8. P. 303–304.
242. Клудзин В.В. Фотоупругие константы кристаллов LiNbO_3 / В.В. Клудзин // Физ. тверд. тела. 1971. – Т. 13. – С. 651–653.
243. Киселев Д.Ф. Измерение пьезоэлектрических коэффициентов ниобата лития при помощи интерференционного дилатометра / Д.Ф. Киселев, М.М. Фирсова // Физ. тверд. тела. – 1973. – Т. 15. – С. 279–281.

244. Чкалова В.В. Пьезоэлектрические, упругие и диэлектрические свойства монокристаллов ниобата и танталата лития / В.В. Чкалова, В.С. Бондаренко, З.И. Шапиро // Изв. АН СССР. Неорганические материалы. –1967. –Т. 3. –С. 1715–1716.
245. Авакянц Л.П. Фотоупругость LiNbO_3 / Л.П. Авакянц, Д.Ф. Киселев, Н.Н. Шитов // Физ.твёрд.тела. – 1976. – Т. 18. – С. 1547–1551.
246. Graham R.A. Second-and third-order piezoelectric stress constants of lithium niobate as determined by the impact-loading technique // R.A. Graham // J. Appl. Phys. – 1977. – V. 48. P. 2153–2163.
247. Кузьминов Ю.С. Ниобат и танталат лития. Материалы для нелинейной оптики / Ю.С. Кузьминов - М.: Наука, 1975. – 224 с.
248. Воронин В. Г. Основы нелинейной волоконной оптики / В.Г. Воронин, О.Е. Наний - М.: 2011. - 128 с.
249. Erdős P. On random graphs I./ P. Erdős, A. Rényi // Publ. Math. Debrecen- 1959- V.6- P.290-297.
250. Erdős P. On the evolution of random graphs/ P. Erdős, A. Rényi // Publ. Math. Inst. Hung. Acad. Sci- 1960 - V.5 (1) - P.17-60.
251. Barabási A.-L. Emergence of scaling in random networks/ A.-L. Barabási, R. Albert// Science -1999 - V.286 (5439) - P. 509-512.
252. Barabási A.-L. Mean-field theory for scale-free random networks/ A.-L.Barabási, R. Albert, H. Jeong // Physica A: Statistical Mechanics and its Applications - 1999 - V. 272(1) - P. 173-187.
253. Newman M. E. J. Random graphs with arbitrary degree distributions and their applications/ M. E. J. Newman, S. H. Strogatz, D. J. Watts// Phys. Rev. E -2001- V. 64 -N2. August 2001 - 026118 P.1-19/
254. Wilf H. S. Generatingfunctionology/ Wilf H. S. - Academic Press San Diego- 1990 -184 p.
255. Burda Z. Statistical ensemble of scale-free random graphs. / Z. Burda, J. D. Correia, A. Krzywicki // Phys. Rev. E-2001- V. 64- 046118.

256. Watts D.J. Collective dynamics of 'small-world' networks/ D.J.Watts, S. H. Strogatz // Nature. – 1998 - Vol.393 – P. 440-442.

257. Жаринов И.В. Конструирование графов с минимальной средней длиной пути / И.В. Жаринов, В.В. Крылов // Вестник ИжГТУ. – 2008. – №4. – С.164-169.

258. Федер Е. Фракталы / Е. Федер. – М. : Мир, 1991. – 260 с.

259. Некрасова А.А. Исследование возможности применения теории перколяции для управления потоками данных в информационных сетях на транспорте / А.А. Некрасова, С.С. Соколов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. – 2015. – № 4 (32) - С.192-198.

260. Keane R.M. Density and uniqueness in percolation / R.M. Keane, M. S. Burton // Comm.Math.Phys. – 121 (1989). – N 3. – P. 501–505.

261. Vakulya G. Energy efficient percolation driven flood routing for large-scale sensor networks / G. Vakulya, G. Simon // Proceedings of the International Multiconference on Computer Science and Information Technology. Wisla, Poland, 2008. – P. 877–883.

262. Okorafor E. Percolation routing in a three-dimensional multicomputer network topology using optical interconnection / E. Okorafor, M. Lu // Journal of Optical Networking. – 2005. – Vol. 4. – N 3. – С. 157–175.

263. Sarshar N. Scalable percolation search in power law networks / N. Sarshar, P.O. Boykin, V.P. Roychowdhury // Proceedings of the Fourth International Conference on Peer-to-Peer Computing. 2004 August 25-27, 2004 in Zurich, Switzerland.

264. Фрэнк Г. Сети, связь и потоки : пер. с англ. / Г. Фрэнк, И. Фриш под ред. Д.А. Поспелова. – М.: Связь, 1978. – 448 с.

265. Hammersley J.M. Percolation processes: lower bounds for the critical probability / J. M. Hammersley // Ann. Math. Statist – 1957. – V.28 - N. 3. – P. 790-795.

266. Grimmett G. Percolation / G. Grimmett. – Springer, Berlin. – 1999. – 444 p.
267. Schouten J.A. Tensor analysis for physics / J.A. Schouten. – Clarendon Press, Oxford, 1951. – 354 p.
268. Сиротин Я.И. Разложение материальных тензоров на неприводимые части / Я.И. Сиротин // Кристаллография. – 1974. – Т. 19. – С. 909-915.
269. Мінаєв Ю.М. Моделювання трафіка комп'ютерних мереж в базисі тензорних отогональних інваріантів. Проблеми інформатизації та управління / Ю.М. Мінаєв, О.Ю. Філімонова. – 2005. – Т. 12. – С. 120-125.
270. Стрихалюк Б.М. Підвищення ефективності динамічної маршрутизації у гетерогенних сервісно-орієнтованих системах з використанням гіперболічних потоків Річі / Б.М.Стрихалюк, Ю.В. Климаш, І.Б. Стрихалюк, Б.В. Коваль // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Радіоелектроніка та телекомунікації : збірник наукових праць. – 2015. – № 818. – С. 189–194.
271. Картан А. Дифференциальное исчисление. Дифференциальные формы./ А. Картан — М.: Мир, 1971. - 393 с.
272. Кумпяк Д. Е. Векторный и тензорный анализ. Учебное пособие. / Д. Е. Кумпяк – Тверь: Тверской гос. университет, 2007. – 158 с.
273. Лемешко А.В. Результаты исследования тензорной модели многопутевой маршрутизации с обеспечением качества обслуживания в телекоммуникационных сетях/ А.В. Лемешко, О.Ю. Евсева, С.В. Гаркуша // Журнал Вестник Южно-Уральского государственного университета. – 2013. – № 4. – Т. 13.
274. Крон Г. Исследование сложных систем по частям – диакоптика / Г. Крон – М.: Наука, 1972. – 542 с.
275. Бех О.В. Математичне програмування: Навч. посіб / О.В. Бех, Т.А. Городня, А.Ф. Щербак. – Львів: "Магнолія 2006", 2017. – 200 с.

276. Shuvalov L.A. Physical properties of crystals. / L.A. Shuvalov, A.A. Urusovskaya, I.S. Zheludev // Berlin: Springer. – vol. 4. – 1988. – 583 p.

277. Бутабаев Ш.М. Указательные поверхности продольных компонент некоторых тензоров четвертого ранга. / Ш.М. Бутабаев, И.И. Смыслов // Кристаллография. – 1971. – Т. 4. – №4. – С. 796-800.

278. Бережной А.А. Анизотропия электрооптического взаимодействия в кристаллах LiNbO_3 . / А.А. Бережной // Оптика и спектроскопия. – 2002. – Т. 92. – №3. – С.503-509.

279. Бондаренко В.С. Об экстремальных направлениях эффективной фотоупругой постоянной. / В.С. Бондаренко, О.А. Бышевский, Н.В. Переломова, Л.Е. Чирков. // Кристаллография. – 1985. – Т. 30. – №2. – С. 220-226.

280. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: О-75 Учебник для вузов / В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко, А.Д. Моченов и др.; под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалева. – М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 510 с.

281. Климаш М.М. Оптичні та радіоканали телекомунікацій. / М.М. Климаш, О.А. Лаврів, Р.І. Бак – Львів, 2010 р. – 424 с.

282. Stern T.E. Multiwavelength optical networks. Architectures, design, and control. / T.E. Stern, G. Ellinas, K. Bala – Cambridge, UK:Cambridge University Press, 2009. – 966 p.

283. Warner A.W. Determination of elastic and piezoelectric constants for crystals in class (3 m) / A.W. Warner, M. Onoe, G.A. Coquin // The Journal of the Acoustical Society of America – 1967. – V. 42. – N 6 – P. 1223-1231.

284. Герман В.Л. Некоторые теоремы об анизотропных средах. / В.Л. Герман // Докл. АН СССР. – 1945. – Т. 48. – №2. – С. 95-98.

285. Chang I.C. Selection of materials for acousto-optic devices. / I.C. Chang // Optical engineering. – 1985. – V. 24. – P. 132-137.

286. Чан С.Ч. Консервативные и диссипативные световодные брэгговские солитоны (обзор) / С.Ч.Чан, Н.Н. Розанов // Оптика и спектроскопия. – 2008. – Т.105. – №3. – С. 432-477.

287. Белокопытов Г.В. Акустооптическое взаимодействие в двумерных фотонных кристаллах: эффективность дифракции брегга / Г.В. Белокопытов, З.А. Пятакова // Оптика и спектроскопия, 2011. – Т. 110. – № 4. – С. 636–644.

288. Chu T. Compact, lower-power-consumption wavelength tunable laser fabricated with silicon photonic-wire waveguide micro-ring resonator/ T. Chu, N Fujioka, M. Ishizaka // Optical express. – 2009. – Vol. 17. No.16.p. 14063. Chu.

289. Muramoto Y. High-speed photodetector technologies. / Y. Muramoto, T. Yoshimatsu, M. Nada, T. Ishibash // NTT technical review. – Vol.10. – No.12. – XII., 2012. – P. 1.

290. Maksymyuk T. Software defined optical switching for cloud computing transport systems / T. Maksymyuk, S. Dumych, O. Krasko, M. Jo // ACM International Conference on Ubiquitous Information Management and Communication (IMCOM'2015). – N. 46. – Jan. 2015.

291. Лопатина П.С. Электрооптический модулятор для волоконно-оптических линий связи. / П.С.Лопатина, В.В.Криштоп. // Изв.Вузов.Приборостроение. – 2009. – Т.52. – №12. – С.67-71.

292. Chabarek J. Power awareness in network design and routing. / J. Chabarek, J. Sommers, P. Barford and others // INFOCOM 2008. The 27th Conference on computer communications. IEEE. - 13-18 April. – 2008.

293. Cisco Carrier Routing System. Cisco CRS-3 24-Slot Fabric-Card Chassis Data Sheet [Electronic resource] // Data Sheet 2013. – Mode of access: WWW.URL: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/data_sheet_c78-408226.html. – Title from the screen.

294. Cisco Carrier Routing System. Cisco CRS 4-, 8-, and 16-Slot Line Card Chassis Performance Route Processors Data Sheet [Electronic resource] // Data Sheet 2014. – Mode of access: WWW.URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/datasheet-c78-730789.html>.

295. Franklin M.A. Power considerations in network processor design. / M.A. Franklin, T. Wolf // Network Processor Design: Issues and Practices. – 2003. – № 2. – P. 29-50.

296. Cisco. Cisco Carrier Routing System - Data Sheets [Electronic resource] // Data Sheet 2014. – Mode of access: WWW.URL: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/routers/carrier-routing-system/datasheet-listing.html>.

297. Huawei. Huawei NE 5000E Cluster Router [Electronic resource] // Product Brochure 2014. – Mode of access: WWW.URL: http://e.huawei.com/en/related-page/products/enterprise-network/routers/ne/ne5000e/brochure/Router_NE5000E.

298. Acousto-optic modulator [Electronic resource] // 2016. – Mode of access: WWW.URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Acousto-optic_modulator. – Title from the screen.

299. Kaminow I. Optical Fiber Telecommunications VB: Systems and Networks. / I.Kaminow, T. Li, A.E. Willner // Elsevier. – 2010. – P. 928.

300. Lach E. Modulation formats for 100G and beyond. / E. Lach, Wilfried Idler // Optical Fiber Technology. – 2011. – №17. – P.377-386.

301. Гуркин Н.В. Производительность когерентных DWDM-систем с канальной скоростью 100 Гбит/с. / Н.В. Гуркин, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, Р.Р. Убайдуллаев // Весник связи. – 2013. – №2. – С. 40-42.

302. Гуркин Н.В. Оптические когерентные DWDM системы связи с канальной скоростью 100 Гбит/с. / Н.В. Гуркин, В.Н. Трещиков, О.Е. Наний // Фотон-Экспресс. 2014. – №4(116). – С. 24-27.

303. Rao U.R. Development of Erbium Doped Fiber Amplifier using Photonic Crystal Fibers as Gain Media / U.R. Rao, B.K. Lande // International Journal of Recent Trends in Engineering. – XI., 2009. – V.12. – №7. – P. 34-36.

304. FAQHard. Как рассчитать охлаждение CPU. [электронный ресурс]– Режим доступа: <http://faqhard.ru/articles/13/11.php>. – Название с экрана.

305. Infinera. Скорость передачи данных по суперканалам в сетях DWDM превышает 100 Гбит/с. [электронный ресурс] – Режим доступа: https://www.infinera.com/russian/files/RU-Infinera-DWDM_Networks.pdf. –

Название с экрана.

306. Трешиков В.Н. Разработка DWDM-системы ёмкостью 25 Тбит/с. / В.Н. Трешиков // Фотон-экспрес. – Март 2013. – №2(106). – С. 24-28.

307. Wooten Ed. L. A review of lithium niobate modulators for fiber-optic communications systems. / Ed. L. Wooten., K. M. Kissa, A. Yi-Yan. // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2000. – V.6. – №1. – P. 69-82.

308. Cisco ONS 15454 DWDM Reference Manual, Release 9.0. Chapter 9, Transponder and Muxponder Cards. [Electronic resource] – Mode of access: WWW.URL:

http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/optical/15000r9_0/dwdm/reference/guide/454d90_ref/454d90_txpmxpcard.html. – Title from the screen

309. Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System Data Sheet. [Electronic resource] – Mode of access: WWW.URL: http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/CRS-3_16-Slot_DS.html. – Title from the screen

310. Avara Technologies. EDFA. [Electronic resource] – Mode of access: WWW.URL: <http://www.avaratechnologies.com/products/EDFA.php>. – Title from the screen.

311. Monti P. Is green networking beneficial in terms of device lifetime? / P. Monti, J. Chen, J. Lorincz, L. Wosinska // IEEE Communications Magazine. – May 2015. – P.231-240.

312. Chen P. Crystal fiber based erbium doped amplifier and their gain. / P. Chen, S. Feng, L. An , H. Song, X. Zhao, C. Xu // International Journal of Future Computer and Communication. June 2012. – V.1. – №1. – P. 40-43.

313. Cisco CRS 100 Gigabit Ethernet Interface Modules Data Sheet [Electronic resource] – Mode of access: WWW.URL: <http://www.cisco.com/c/en/>

us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/datasheet-c78-730788.html. – Title from the screen.

314. Cisco. 40-channel Single-module ROADM for the Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform. [електронний ресурс] Режим доступу: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/optical-networking/ons-15454-series-multiservice-provisioning-platforms/dat>.

315. Watts, D. J. Small worlds: the dynamics of networks between order and randomness. / D. J. Watts. – Princeton University Press, Princeton, New Jersey, 1999. 262 p.

316. Задорожний В.Н. О надежности больших статистически однородных сетей / В.Н. Задорожний, Е.Б. Юдин // Информационные технологии и автоматизация управления : матер, межвуз. научно-практ. конф. 20 -24 апреля 2009 г. - Омск: ОмГТУ, 2008. - С. 184- 186.

317. Додонов. А.Г. Живучесть информационных систем. / А.Г. Додонов, Д.В. Ландэ. – К.: Наук. думка, 2011. – 256 с.

318. Стрихалюк Б.М. Підвищення якості надання послуг у мультисервісних мережах шляхом інтеграцій технологій IP/MPLS та DWDM. Стрихалюк. місце видання невідоме : / Б.М. Стрихалюк, П.О. Гуськов, В.С, Андрущак, В.Є. Мурак, С.М. Редчук // Вісник НУ «Львівська політехніка» Радіоелектроніка і телекомунікації. – 2015. - №818 – с. 94 – 103. .

319. Климаш М.М. Метод підвищення ефективності використання мережевих ресурсів в інформаційно-телекомунікаційних систем. місце видання невідоме : / М.М. Климаш, О.М. Шпур, М.О. Селюченко, Б.В. Киричук, Т.В. Мельник. // Радіоелектроніка і телекомунікації.– 2015.- No 818. – с. 137 – 150.

320. Нелин Е.А. Устройства на основе фотонных кристаллов / Е.А. Нелин // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. - 2004. - № 3. - С. 18-25.

321. Momeni B. Optimization of photonic crystal demultiplexers based on the superprism effect / B.Momeni, A.Adibi // Appl. Phys. B. – 2003. – V.77.- N 6-7. – P.555-560.

322. Чернихівський Є. М. Математичне моделювання телекомунікаційних систем та мереж: навч. посіб. / Є. М. Чернихівський. – Львів. Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2011. – 270 с.

323. Beshley M.M. Increasing the efficiency of real-time content delivery by improving the technology of priority assignment and processing of IP traffic / M. Beshley, M. Seliuchenko, O. Lavriv, V. Chervenets, H. Kholiavka, M. Klymash // Smart Computing Review - 2015.- V.5 - N.2. – P.76-88.

324. Beshley M. SOA quality management subsystem on the basis of load balancing method using fuzzy sets / M. Beshley, M. Klymash, B.Strykhalyuk, O. Shpur, B. Bugil, I. Kagalo // International Journal of Computer Science and Software Engineering (IJCSSE). – 2015 - V. 4 - N. 1 – P.10-21.

325. Бешлей М.І. Розвиток методів передавання даних реального часу шляхом вдосконалення процесів пріоритезації потоків у маршрутизаторах / М.І. Бешлей, В.В. Червенець, І.В. Демидов, В.І. Романчук, О.М. Панченко// Системи обробки інформації: наук. журнал -. Х: Харк. ун-т Повітр. Сил ім. Івана Кожедуба. - 2016. –№5(142) - С. 114-123.

326. ITU-T Recommendation Y.1540/Y.1541. Network performance objectives for IP-based services. Geneva: International Telecommunication Union.[Електронний ресурс] – 2006./ - Режим доступу до статті: <http://www.itu.int/rec/dologin~type=items>.

327. Корецький О.В. Моделі та алгоритми підвищення ефективності комутації інформаційних потоків у повністю оптичних телекомунікаційних системах. Ко. місце видання невідоме: / О.В.Корецький, С.С.Думич // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Радіоелектроніка та телекомунікації – 2013. – № 766. – С. 96-103.

328. Qiao C. Choices, features and issues in optical burst switching. / C.Qiao, M. Yoo // Spie optical networks magazine. – 2000. – V. 1. – №. 2. – P. 36-44.

329. Lee S.Y. The influence of burst length in optical burst switching system with completely isolated classes / S.Y. Lee, I.-Y. Hwang, H.-Sh. Park. // The 7th International Conference on Advanced Communication Technology. – ICACT 2005. – P. 303-306.

330. Vokkarane V.M. Burst segmentation: an approach for reducing packet loss in optical burst-switched networks. / V.M. Vokkarane, J.P.Jue // Spie/Kluwer optical networks. – 2003. – V.4. – №6. – P. 1-8.

ДОДАТОК

А. Акти впровадження результатів дисертаційних досліджень

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор
ТзОВ "Телекомунікаційна компанія"

Пентак І.М.
19 вересня 2016 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи
Кайдана Миколи Володимировича

"Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних мереж"

Даний акт складений про те, що у ТзОВ "Телекомунікаційна компанія" використані результати докторської дисертаційної роботи Кайдана М.В. "Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних мереж". А саме:

- для оцінки часових параметрів та втрат передавання даних використано модель керування навантаженням на основі теорії позиційної перколяції, що дозволило визначити сприятливі умови передачі даних у залежності від ймовірності зайнятості з'єднань для різної кількості транзитних вузлів у транспортній мережі;

- для зменшення втрат внаслідок перевантаження каналів та переповнення оптичного буфера комутатора в тестовому режимі здійснюється передавача даних на приймач транзитного вузла з перетворення сигналу в електричний.

Внаслідок перевірки використаних моделей на мережному обладнанні у ТзОВ "Телекомунікаційна компанія" встановлено, що результати знаходяться в межах двохвідсоткового середньоквадратичного відхилення від поданих у дисертаційній роботі.

Головний інженер



Рубаха І.М.

"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Директор
ТзОВ ВТФ "Контек"

Смольницький Є.С.

"14" вересня 2016р.



АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи

Кайдана Миколи Володимировича

"Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних мереж"

Даний акт складений про те, що у ТзОВ ВТФ "Контек" використані результати докторської дисертаційної роботи Кайдана М.В. "Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних мереж". А саме:

- реалізовано в тестовому режимі на основі акустооптичної комірки технологію OBS, що дозволило знизити затримку в процесі комутації та підвищити енергоефективність транспортної мережі
- впроваджено в тестовому режимі модулятори на основі електрооптичного ефекту з метою модернізації транспортної мережі шляхом переходу модуляторів від PM-QPSK до PM-16QAM, що дозволяє досягти чотирикратного зменшення ймовірності відмови пристроїв.

Результати експериментальних досліджень, виконаних на виробничих потужностях ТзОВ ВТФ "Контек" відповідають результатам досліджень, що представлені у дисертаційній роботі, похибка не перевищує 2 %.

Директор

Смольницький Є.С.



"ЗАТВЕРДЖУЮ"

Проректор з науково-педагогічної роботи
НУ "Львівська політехніка"



доц. Давидчак О.Р.

Davidchak 2016 р.

АКТ

про використання результатів докторської дисертаційної роботи
Кайдана Миколи Володимировича

"Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних мереж"

у навчальному процесі кафедри телекомунікацій

Даний акт складений комісією у складі:

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

про те, що в навчальному процесі кафедри телекомунікацій використано результати докторської дисертаційної роботи "Методи та моделі побудови енергоефективних фотонних транспортних мереж", а саме використано у курсі лекцій для студентів напряму 6.050903 «Телекомунікації» з дисциплін:

- «Напрявні системи електричного та оптичного зв'язку» - у частинах «Сучасний електричний зв'язок», «Принципи побудови волоконно-оптичних систем передачі», «Компоненти волоконно-оптичних систем передачі»;
- «Телекомунікаційні системи передачі» - у частині «Принципи побудови ВОСП»;
- «Телекомунікаційні та інформаційні мережі» - у частині «Фізичний рівень. Пасивний мережевий рівень обладнання».

Члени комісії:

Убізський С.Б.

Озірковський Л.Д.

Климаш М.М.

Б. Список публікацій здобувача

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

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.

3. Klymash M. Performance analysis of optical burst switching networks for different signaling protocols / M. Klymash, M. Kaidan, S. Dumych // Smart Computing Review, 2015. – Vol. 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. – vol. 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". Радіоелектроніка та телекомунікації, Львів, 2014. – № 796. - С. 147–156.

6. Kaidan M.V. The indicative surfaces of photoelastic effect for Cs₂HgCl₄ 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 LiNbO₃ / 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 LiNbO₃ 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. - Vol.6. - No.4. - P. 34-44, August 2016.

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 багатошарової 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. Андрушак // 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". Радіoeлектроніка та телекомунікації . . - 2013. -№766. - С.90–95.

20. Стрихалюк Б.М. Тензорне подання топологічних структур тороїдальних мереж/ Б.М. Стрихалюк, М.М. Климаш, М.В. Кайдан // Вісник НУ "Львівська політехніка" Радіoeлектроніка та телекомунікації.- 2008 р. - №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 акустооптичного 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.

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

37. Strykhalyuk B. Tensor models for the efficient multipath routing in large-scale communication networks / B. 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. (заочна участь із доповіддю за кордоном, доповідь співавтора)

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. (очна участь із доповіддю)

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, February 25 – March 1, 2014, Lviv-Slavske, Ukraine – P.487-488. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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, February 21–24, 2012. – P. 246-248. (очна участь із доповіддю)

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 (EWDTW'06), Sochi, Russia, September 15-19, 2006. – P.179-183. (заочна участь із доповіддю за кордоном, доповідь співавтора)

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, Wroclaw 12-14, October 2006 – P. 396-399. (заочна участь із доповіддю за кордоном, доповідь співавтора)

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, Wroclaw 12-14, October 2006 – P. 562-565. (заочна участь із доповіддю за кордоном, доповідь співавтора)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (заочна участь із доповіддю за кордоном, доповідь співавтора)

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”, September 17-20, 2007, Kharkiv, Ukraine. – P.82. (заочна участь, доповідь співавтора)

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, October 1–6, 2007, Partenit, Crimea, Ukraine. – P.170. (заочна участь, доповідь співавтора)

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). – Alushta, Krimea, Ukraine. – 2-4 October 2008 - P. 66-68. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

51. Andrushchak A.S. Application efficiency increasing of LiNbO₃: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. Mytskyk, A.V. Kityk // Proceeding of 10-th International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling (LFNM 2010). – Sevastopol, Crimea (Ukraine). – September 10-14, 2010.-P.172-174. (заочна участь, доповідь співавтора)

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, February 23 –26, 2016, Lviv-Slavske, Ukraine. – P.674-676. (очна участь із доповіддю)

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), September 11-16, 2016, Kyiv, Ukraine.- P.338-340. (очна участь із доповіддю)

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)” October 4-6, 2016 Kharkiv,Ukraine, - picst16_10. P.1-3. (очна участь із доповіддю)

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)” October 13-15 ,2015 Kharkiv,Ukraine.- P.167-170. (очна участь із доповіддю)

56. Кайдан М. Оцінка параметру енергоефективності оптичних транспортних мереж на базі електрооптичних пристроїв / М. Кайдан, В. Андрушак // Десята міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми телекомунікацій” і Восьма міжнародна науково-технічна конференція “Перспективи розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій та

систем”, 19-22 квітня 2016р. – м. Київ 2016 – С.107-109. (очна участь із доповіддю)

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” – Львів, Україна, 17-20 жовтня 2007. – С. 25-26. (очна участь із доповіддю)

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 международной научно-практической конференции «Современные информационные и электронные технологии», 19-23 Мая, 2008, Одесса, Украина. - Т.2. - С.135. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (заочна участь, доповідь співавтора)

61. Климаш М.М. Потокова 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. – АР Крим, Ялта-Лівадія 10-14 жовтня 2011 р. – С.27-30. (заочна участь, доповідь співавтора)

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» – Львів, 27-30 жовтня 2011 р. – С.73-77. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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” – ДУІКТ-Карапти, 17-21 січня 2012 р. – С.160-164. (очна участь із доповіддю)

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., АР Крим, Ялта-Лівадія.- С.37-38. (очна участь із доповіддю)

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., АР Крим, Ялта-Лівадія.- С.116-117. (заочна участь, доповідь співавтора)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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, 2013. – С.211-214. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

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 року. – Львів, 2014. – С.184-185. (очна участь із доповіддю)

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. (очна участь із доповіддю)

75. Кайдан М. Модель розрахунку енергоефективності для електро- та акутооптичних 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. (очна участь із доповіддю)

76. Кайдан М. Дослідження енергоефективності процесу комутації блоків даних у оптичних транспортній мережі / М.Кайдан, В.Андрущак //V Міжнародна науково-практична конференція «Фізико-технологічні проблеми передавання, обробки та зберігання інформації в інфокомунікаційних системах»- 3-5 листопада 2016 р - м.Чернівці, Україна.- С.202-203. (очна участь із доповіддю)