

Харківський національний університет радіоелектроніки

**Хайдара Абдалла Абдулрахман**



УДК 621.391

**МЕТОДИ СИНТЕЗУ ОПТИЧНОЇ ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ WDM З  
ВИКОРИСТАННЯМ МОДЕЛІ БАГАТОШАРОВИХ ГРАФІВ**

05.12.02 – телекомунікаційні системи та мережі

**АВТОРЕФЕРАТ**

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

Харків 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник доктор технічних наук, доцент

**Агєєв Дмитро Володимирович,**

Харківський національний університет радіоелектроніки,  
професор кафедри телекомунікаційних систем.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор

**Безрук Валерій Михайлович,**

Харківський національний університет радіоелектроніки,  
завідувач кафедри мереж зв'язку;

кандидат технічних наук, доцент

**Польщиків Костянтин Олександрович,**

Донбаська державна машинобудівна академія,  
доцент кафедри комп'ютерних інформаційних технологій.

Захист відбудеться “ **31** “ *жовтня 2012 р.* о **15** годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.09 при Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166 м. Харків, пр. Леніна. 14.

Автореферат розісланий “ **28** ” *вересня 2012 р.*

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Є.В. Дуравкін

## Загальна характеристика роботи

**Актуальність теми.** Останнім часом спостерігається бурхливий розвиток інформаційних технологій, при яких телекомунікаційні системи становлять матеріальну і системоутворюючу основу. Важливою складовою сучасних телекомунікаційних систем є транспортні мережі, серед яких найбільш перспективними і ефективними є оптичні мережі WDM, що забезпечують високі швидкості передачі даних, більш повне використання пропускну здатності волоконно-оптичного кабелю і можуть використовуватися як самостійно, так і бути базовими для накладених на них мереж.

В оптичних мережах WDM інформаційні потоки передаються з використанням оптичних несучих, і вздовж усього шляху передачі потоку через мережу він не обробляється і не змінюється як зміст, так і довжина хвилі, яка використовується при цьому. Зазначені особливості мереж WDM роблять непридатними методи структурного і параметричного синтезу, що використовуються при проектуванні мереж з комутацією пакетів.

Сучасні телекомунікаційні системи є великими складними системами, що володіють багаторівневою структурою в багатьох аспектах розгляду. Особливої уваги заслуговує структура, утворена накладеними мережами. Телекомунікаційні транспортні мережі, що базуються на застосуванні технологій і протоколів, таких як: MPLS, SDH, ATM, WDM, мають властивість багатошаровості згідно з їх технічною специфікацією. Такий багаторівневий, багатоаспектний опис існуючих телекомунікаційних систем важко піддається математичному опису без втрати наочності або адекватності.

Однією з найбільш вдалих моделей є багатошаровий граф. Використання даної моделі дозволяє адекватно описувати топологію кожної з накладених мереж і взаємозв'язок між процесами, що протікають на різних її рівнях, а також дозволяє представляти телекомунікаційну систему на етапі її проектування як єдиний цілісний об'єкт. Це дозволяє підвищити ефективність розв'язку задач синтезу в порівнянні з методами, які використовуються зараз, та базуються на послідовному розв'язку задач синтезу для кожної з накладених мереж.

Зазначені особливості технології WDM, яка використовується в транспортних мережах, а також накладений принцип побудови сучасних телекомунікаційних систем вимагає проведення додаткових досліджень та перегляду методів структурного і параметричного синтезу, що використовується для їх проектування.

На сьогоднішній день розв'язання задач параметричного синтезу базується на використанні моделей найпростішого потоку, який також має назву стаціонарного пуассонівського потоку. У той же час, як показали результати дослідження, потоки в мультисервісних мережах мають зовсім іншу структуру, яка відрізняється від прийнятої в класичній теорії телетрафіка. Це робить сильний вплив на результати

проектування сучасних телекомунікаційних мереж і викликає потребу в значній корекції методів синтезу.

Таким чином, тему дисертаційної роботи та **науково-прикладну задачу**, яка полягає у розробці нових і вдосконаленні існуючих методів структурного та параметричного синтезу оптичних транспортних телекомунікаційних мереж WDM з використанням моделей багат шарових графів та представлення потоків у мережі як самоподібних процесів з метою використання їх при проектуванні, можна вважати актуальною.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** . Робота виконувалася у відповідності до положень «Концепції національної інформаційної політики», «Концепції Національної програми інформатизації», «Концепції конвергенції телефонних мереж і мереж з пакетною комутацією в Україні» і з «Основними засадами розвитку інформаційного суспільства в Україні на 2007-2015 роки», планами перспективного розвитку ВАТ «Укртелеком».

Крім того, напрям досліджень було пов'язано з планами університету та кафедри телекомунікаційних систем, де виконувалась дана робота, зокрема, матеріали дисертації були використані у науково-дослідній роботі, що виконувалася на кафедрі телекомунікаційних систем ХНУРЕ: «Методи проектування телекомунікаційних мереж NGN та управління їх ресурсами» (тема №235-1).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності параметричного та структурного синтезу оптичних транспортних мереж, який базуються на використанні багат шарових графів та застосуванні властивостей інформаційних потоків як самоподібних процесів.

*Об'єктом дослідження* в дисертаційній роботі є процес проектування мультисервісних телекомунікаційних систем.

*Предметом дослідження* є методи структурного та параметричного синтезу оптичної транспортної мережі мультисервісної телекомунікаційної системи.

*Методами дослідження* є: методи оптимізації, математична статистика і теорія ймовірностей, теорія масового обслуговування, теорія графів, теорія самоподібних процесів, методи імітаційного моделювання.

*Задачі дослідження.* Відповідно до поставленої мети в дисертаційній роботі вирішуються наступні основні задачі дослідження:

- аналіз теоретичних результатів в галузі структурного та параметричного синтезу оптичних транспортних мереж;
- розробка методу структурного та параметричного синтезу гетерогенної оптичної мережі WDM з кільцевою топологією магістрального сегмента;
- розробка методу структурного та параметричного синтезу оптичних транспортних мереж WDM з оптичними конверторами;
- розробка методу структурного та параметричного синтезу транспортної мережі IP/MPLS, накладеної поверх мережі WDM;

- розробка методу визначення маршрутів та розподілу потоків у накладеній IP/MPLS мережі поверх оптичної мережі;
- проведення числових та натурних експериментів по дослідженню ефективності запропонованих методів та вироблення практичних рекомендацій щодо їх застосування.

**Наукова новизна одержаних результатів** полягає в тому, що:

1. Одержав подальший розвиток метод синтезу гетерогенних оптичних транспортних телекомунікаційних мереж з використанням мультиплексування за довжиною хвилі, що мають топологію «кільце» на рівні ядра мережі, за рахунок використання процедури визначення місць концентрації навантаження на попередньому етапі та використання евристики еластичної мережі для знаходження топології ядра мережі. Це дозволило зменшити обчислювальну складність та час розв'язання задачі.

2. Одержав подальший розвиток метод синтезу оптичної телекомунікаційної мережі з оптичними конверторами за рахунок використання моделі багатопланового графу з представленням оптичної мережі як сукупності графів, що дозволило розв'язати задачу одночасного синтезу топології, вибору світлових шляхів і місць встановлення оптичних конверторів та призначення довжин хвиль, що дозволило підвищити ефективність отриманого рішення задачі в порівнянні з раніш відомими методами.

3. Одержав подальший розвиток метод синтезу накладеної IP/MPLS мережі поверх оптичної мережі з мультиплексуванням за довжиною хвилі за рахунок використання моделі багатопланового графу з представленням оптичної мережі як сукупності графів, що дозволило розв'язати задачу одночасного синтезу топології, вибору маршрутів, призначення довжин хвиль та групування потоків. Це дозволило підвищити ефективність отриманого розв'язку задачі у порівнянні з раніш відомими методами.

4. Розвинуто метод вибору маршрутів передачі інформаційних потоків у IP/MPLS мережі, накладеній поверх оптичної транспортної мережі з мультиплексуванням за довжиною хвилі, за рахунок використання для опису інформаційних потоків у мережі моделей самоподібних потоків, що дозволило підвищити ефективність використання мережного ресурсу та зменшити середній час доставки пакетів.

**Практичне значення одержаних результатів.** Запропоновані в роботі математичні моделі і методи структурного та параметричного синтезу мають важливе практичне значення, оскільки відкривають можливість синтезу високоефективних за економічними та технічними показниками структур телекомунікаційних мереж в процесі проектування мережі NGN на рівні транспортної мережі, яка побудована по технології WDM, а також транспортної мережі MPLS, накладеної на оптичну мережу.

Практична цінність отриманих результатів полягає в тому, що запропоновані в дисертаційній роботі математичні моделі та методи структурного та параметричного синтезу отримали програмну реалізацію у вигляді підпрограм у складі програмного комплексу, що дає можливість розв'язувати задачі синтезу структури та визначення параметрів структурних елементів оптичної транспортної мережі WDM, а також MPLS мережі, накладеної поверх мережі WDM. За допомогою даного програмного забезпечення було доведено можливість практичної реалізації та працездатності запропонованих у роботі методів. Розробка призначена для застосування при проектуванні телекомунікаційних мереж, що відносяться до рівня транспорту мережі NGN.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі кафедри телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки у практичних та лабораторних заняттях з дисципліни «Проектування телекомунікаційних систем», яку читають у 8 семестрі студентам спеціальності «Телекомунікаційні системи та мережі», що підтверджується актом впровадження.

**Особистий внесок здобувача.** Робота виконана на кафедрі телекомунікаційних систем Харківського національного університету радіоелектроніки. Всі основні наукові результати, подані в дисертаційній роботі, отримано автором самостійно й повністю опубліковано в спеціалізованій літературі [1-11].

У роботах, виконаних у співавторстві, особисто Хайдаре Абдалле належать такі наукові результати: в [1] синтез математичної моделі мультисервісного вузла доступу та вибір методики розрахунку пропускних здатностей каналів зв'язку транспортної мережі; у [2] методика синтезу вихідного багат шарового графу; у [3] потокова модель для багат шарового графа з врахування ефекту самоподоби трафіка; у [4] метод синтезу гетерогенної оптичної транспортної мережі та метод визначення вагових коефіцієнтів у методиці еластичної мережі; у [5] синтез математичної моделі мережі, що проектується у вигляді багат шарового графа.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертації доповідалися на 6-ти міжнародних форумах та конференціях: 10-му, 11-му, 12-му, 13-му та 16-му Міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в XXI сторіччі» (м.Харків, ХНУРЕ, 2009, 2012); 4-му Міжнародному радіоелектроному форумі «Прикладна радіоелектроніка. Стан та перспективи розвитку». МРФ – 2011 (м.Харків, АНПРЕ); 7-й Науково-технічній конференції «Світ інформації та телекомунікацій - 2010» (м.Київ, ДУІКТ); 1-й Міжнародній науково-практичній конференції молодих вчених «Інфокомунікації – сучасність та майбутнє» (м.Одеса, ОНАЗ, 2011); XI<sup>th</sup> International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science. TCSET' 2012 (Львів-Славсько, НУ «Львівська політехніка»), а також на наукових семінарах кафедри телекомунікаційних систем ХНУРЕ.

**Публікації.** За матеріалами дисертації опубліковано 11 робіт, у тому числі 5 статей у фахових виданнях України [1 - 5]. Усі по темі дисертаційної роботи. Інші публікації є тезами доповідей на конференціях [6 – 11].

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертація обсягом 142 сторінки складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків, містить 18 рисунків, 6 таблиць та список використаних джерел з 67 найменувань.

### **Основний зміст роботи**

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету та задачі дослідження, наведено 4 пункти наукової новизни одержаних результатів та визначено практичну цінність отриманих у роботі результатів. Наведено основні дані по публікаціям та особистому внеску здобувача. Дано загальну характеристику роботи.

У **першому розділі** наведено загальну архітектуру побудови мультисервісної телекомунікаційної системи, позначено коло задач, які необхідно вирішити при проектуванні структури телекомунікаційної системи. Проведено аналіз існуючих методів структурного та параметричного синтезу оптичних транспортних мереж.

В роботі показано, що для математичного моделювання та розв'язку задач аналізу та синтезу накладених мереж найбільш вдалими є використання моделей у вигляді багатошарових мереж та багатошарових графів. Наведено короткий опис цих підходів.

Наведено огляд математичних моделей інформаційних потоків. Стверджується, що модель найпростішого потоку, яка застосовується зараз при проектуванні телекомунікаційних систем, призводить до невірних результатів розрахунків. Більш адекватною моделлю вважається модель самоподібних процесів, яка враховує наявність у потоків, що передаються, таких властивостей, як: висока пачечність, наявність довгочасових залежностей, розподілу з важкими хвостами, повільно спадаюча дисперсія при збільшенні масштабу часу спостереження та усереднення. Наведено основні математичні вирази, що описують модель самоподібних процесів. Наведено вже відомі результати по застосуванню математичних моделей самоподібних процесів при розв'язанні задач аналізу та синтезу телекомунікаційних систем.

Наприкінці розділу зроблено загальну постановку задачі дисертаційного дослідження.

**Другий розділ** присвячено задачі структурного синтезу оптичної телекомунікаційної мережі WDM.

Показано, що задача синтезу оптичних мереж, побудованих за технологією WDM, має особливість, яка відрізняє її від мереж з комутацією пакетів, що призводить до неможливості використання раніш відомих методів синтезу, які використовувалися для мереж з комутацією пакетів. Відмічена особливість

пов'язана з необхідністю збереження значення довжини хвилі, яка використовується для передачі інформаційного потоку, вздовж всього шляху передачі у оптичній мережі. Наведено шляхи підвищення ефективності використання каналного ресурсу та збільшення пропускної здатності мережі.

Наведено загальну предметну постановку задачі структурного та параметричного синтезу оптичної транспортної мережі WDM. Ця постановка задачі використовується далі в дисертаційній роботі при розв'язанні декількох окремих задач структурного та параметричного синтезу з додатковими вимогами до структури оптичної мережі.

В роботі звертається увага на те, що серед топологій, які використовуються при побудові оптичних транспортних мереж, широко використовується топологія «кільце», «зміщена» або гетерогенна, яка має різну топологію на різних ділянках цієї мережі.

Вирішено задачу структурного синтезу гетерогенної оптичної транспортної мережі, яка має топологію «кільце» на магістральній ділянці та змішану на нижньому рівні. Критерієм оптимальності є мінімум вартості з врахуванням обмежень, які накладаються технологією WDM.

Математична модель задачі, що розв'язується, враховує географічне положення вузлів оптичної мережі, питомі витрати на будівництво ліній зв'язку на магістральній ділянці та на нижньому рівні, множину потоків між вузлами мережі, передачу яких необхідно забезпечити при структурному синтезі мережі, та множину значень довжин хвиль, яку припустимо використовувати у мережі.

Метод розв'язання цієї задачі базується на її декомпозиції на дві підзадачі: задачу синтезу топології магістрального сегмента мережі та задачу одночасного синтезу топології мережі нижнього рівня, вибору маршрутів передачі потоків у всій мережі та вибору довжин хвиль.

Більшість існуючих методів синтезу топології «кільце» стикаються з необхідністю розв'язання задачі комівояжера, яка є NP – повною та вимагає великих затрат часу для розв'язання. Для запобігання цього у роботі пропонується використовувати модифікований метод еластичної мережі, яка успішно застосовується для рішення задачі комівояжера, і застосування якого дозволяє одночасно здійснити вибір вузлів оптичної мережі, що входять до магістрального сегмента та знайти його топологію.

Пропонується наступний алгоритм:

- запускаємо в роботу алгоритм еластичної мережі;
- після деякої кількості ітерацій алгоритм зупиняємо, при цьому «кільце» лише описує загальний вид шляху і послідовність обходу майбутніх вузлів магістрального сегмента;
- запускаємо процедуру вибору вузлів магістрального сегмента;
- продовжуємо роботу алгоритму еластичної мережі зі скороченим набором вузлів.



У модифікованому методі еластичної мережі використовується коефіцієнт  $m_i$ , що враховує ранг вузла. У цьому випадку формула перерахування положення точок еластичної нитки має такий вигляд:

$$\Delta \bar{\mathfrak{G}}_a = -\sigma' \sum_i m_i \cdot \gamma_{ia} (\bar{z}_i - \bar{\mathfrak{G}}_a) + \tau T (\bar{\mathfrak{G}}_{a+1} - 2\bar{\mathfrak{G}}_a + \bar{\mathfrak{G}}_{a-1}), \quad (1)$$

$$\gamma_{ia} = \frac{e^{-|\bar{z}_i - \bar{\mathfrak{G}}_a|^2 / 2r^2}}{\sum_j e^{-|\bar{z}_i - \bar{\mathfrak{G}}_j|^2 / 2r^2}}, \quad (2)$$

де  $\bar{z}_i$  - вузли мережі;  $\bar{\mathfrak{G}}_a$  - точки еластичної нитки;  $\gamma_{ia}$  - вага, що характеризує відповідність  $\bar{z}_i$  і  $\bar{\mathfrak{G}}_a$ ;  $\sigma' = \sigma/m_0$ ;  $m_0 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i$  - середнє значення рангу вузла;  $\sigma$  і  $\tau$  - константи.

В роботі запропоновано алгоритм визначення коефіцієнта  $m_i$ , який базується на врахуванні кількості інформаційних потоків вузлів мережі, які потенційно будуть використовувати цей вузол для передачі їх через магістральний сегмент.

Підзадача одночасного синтезу топології мережі нижнього рівня, вибору маршрутів передачі потоків у всій мережі та вибору довжин хвиль в роботі розв'язується як задача розподілу потоків на надлишковому графі при відомій топології магістрального сегмента. Критерієм оптимальності є мінімум вартості з врахуванням скінченної множини припустимих довжин хвиль:

$$D = \sum_{e=(v_i, v_j) \in E^A} d_{ij}^A x_{ij}^A + \sum_{v_i, v_j \in V^Z} d_{ij}^Z x_{ij}^Z \rightarrow \mathbf{min}; \quad (3)$$

із заборonoю використання більш, ніж однієї довжини хвилі для кожного потоку у мережі:

$$x^q \geq x_{qk}, \quad \mu_k \in M, \lambda_q \in \Lambda; \quad (4)$$

$$\sum_{\lambda_q \in \Lambda} x_{qk} = 1, \quad \mu_k \in M; \quad (5)$$

з заборonoю використання однієї й тієї ж довжини хвилі у каналі зв'язку для передачі різних потоків:

$$\sum_{\mu_k \in M} x_{qks} \leq x^q, \quad e_s \in E, \lambda_q \in \Lambda; \quad (6)$$

з вимогою, що кожний потік використовує лише один маршрут:

$$\sum_{\pi_p \in \Pi_k} x_{kp} = 1, \quad \mu_k \in M; \quad (7)$$

з обмеженням, яке враховує, що потоки можуть протікати лише по існуючим ребрам графа:

$$\sum_{\lambda_q \in \Lambda} x_{qks} \leq x_{ij}^A, \quad e_s = (v_i, v_j) \in E^A, \lambda_q \in \Lambda; \quad (8)$$

та умова зв'язності мережі:

$$\sum_{e_s' \in \xi(v_t), e_s' \neq e_s} x_{qks'} \geq x_{qks}, \quad \lambda_q \in \Lambda, \mu_k \in M, e_s \in \xi(v_t), v_t \in V \setminus \{a_{ki}, a_{kj}\}. \quad (9)$$

При цьому використовувалися наступні позначення:  $d_{ij}^A$ ,  $d_{ij}^Z$  - вартість будівництва лінії зв'язку на нижньому рівні та магістральній ділянці;  $x_{ij}^A$ ,  $x_{ij}^Z$  - індикатор входження лінії зв'язку до результуючої структури мережі;  $x^q$  - індикатор використання q-ї довжини хвилі;  $x_{qk}$  - індикатор використання q-ї довжини хвилі для k-го потоку;  $x_{qks}$  - індикатор використання q-ї довжини хвилі для k-го потоку у s-му ребрі графу;  $x_{qks}$  - індикатор використання r-го шляху для k-го потоку.

Цільова функція враховує вартість тільки тих ребер графа в яких існує потік, відмінний від нульового.

Таким чином, розв'язання цієї оптимізаційної задачі дозволяє здійснити розподіл потоків у мережі з мінімальною кількістю задіяних ребер. Ця задача сформульована та розв'язана як задача цілочисельного програмування з використанням спеціалізованого пакета розв'язання оптимізаційних задач CPLEX v.12.

В роботі вирішено задачу структурного синтезу оптичної транспортної мережі з використанням у частині вузлів мережі оптичних конвертерів. Критерієм оптимальності є мінімум вартості з врахуванням обмежень, які накладаються технологією WDM.

Математична модель задачі, що розв'язується, враховує множину вузлів оптичної мережі; множину вузлів, де припустимо встановлення оптичних конвертерів; множину ліній зв'язку, яку можна використовувати; вартість будівництва ліній зв'язку між вузлами та вартість встановлення оптичного конвертора; множину потоків між вузлами мережі, передачу яких необхідно забезпечити при структурному синтезі мережі; та множину значень довжин хвиль, яку припустимо використовувати у мережі. Під час розв'язання задачі необхідно знайти результуючу топологію оптичної мережі WDM, світлові шляхи, місця встановлення оптичних конвертерів та прив'язку довжин хвиль, що використовуються, до світлових шляхів.

В роботі стверджується, що мультисервісну телекомунікаційну мережу слід розглядати як накладену мережу. Моделювання накладених мереж за допомогою багат шарового графа дозволяє описувати цю мережу як єдиний цілісний об'єкт, що дозволяє більш повно врахувати зв'язки між рівнями і взаємний вплив процесів, які протікають на різних її рівнях, та є особливо важливим в процесі проектування телекомунікаційних мереж.

Згідно з загальною методикою синтезу накладених мереж з використанням багат шарового графа нам необхідно спочатку виділити рівні накладених мереж. Під час розв'язання поставленої в дисертаційній роботі задачі структурного синтезу транспортної мережі WDM з оптичними конверторами у її структурі були виділені такі рівні, як: рівень інформаційних потоків, рівень оптичної мережі, рі-

вень світлових шляхів.

На наступному етапі кожний з рівнів описується графом (графи  $\Gamma^F, \Gamma^{ON}$  та сукупність графів  $\Gamma^\lambda, \lambda = 1..N^\lambda$ , де  $N^\lambda$  - кількість доступних довжин хвиль). Граф  $\Gamma^F$  містить вершини, які відповідають вузлам, що є відправником або отримувачем трафіка, а ребра зв'язують вершини графа, що відповідають вузлам мережі, між якими існує інформаційний обмін. Граф  $\Gamma^{ON}$  та множина графів  $\{\Gamma^\lambda\}$  мають топологію, яка відповідає вихідній надлишковій топології оптичної мережі, що проектується.

Наступним етапом є синтез графа  $\Gamma'$ , що з'єднує шари багат шарового графа. Граф  $\Gamma'$  містить ребра, що зв'язують вершини графів  $\Gamma^F$  та  $\Gamma^{ON}$ , які відповідають вузлам мережі відправника чи отримувача, а також вершини  $\Gamma^{ON}$  з вершинами графів  $\{\Gamma^\lambda\}$ , які відповідають одним і тим же вузлам оптичної мережі (рис. 1,а). У вузлах мережі, які відповідають вузлам, де можливо встановлення оптичних конверторів, до графа, що зв'язує шари багат шарового графа, вводиться додаткова вершина  $v^c$ , яка зв'язується дугами з відповідною вершиною графа  $\Gamma^{ON}$  та з вершинами кожного графа  $\Gamma^\lambda$  (рис. 1,б).

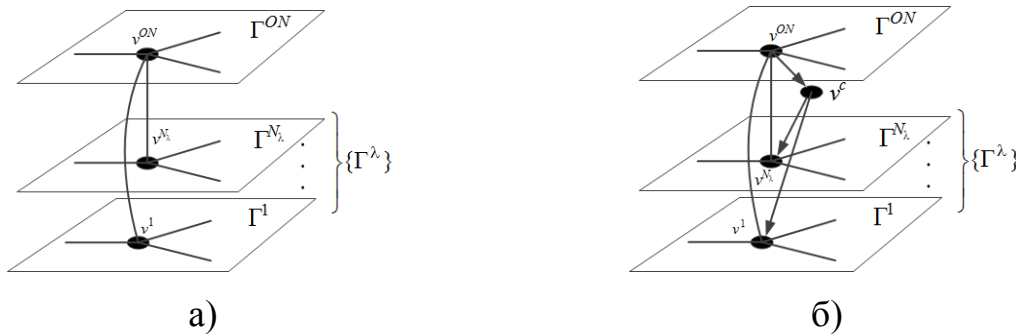


Рис.1. Граф, що зв'язує шари для вузла без оптичного конвертор (а) та з оптичним конвертором (б)

Вихідний багат шаровий граф, що використовується при розв'язанні задачі, є об'єднанням цих графів:

$$MLG = \Gamma^F \cup \Gamma^{ON} \cup \Gamma' \cup \left( \bigcup_{\lambda} \Gamma^\lambda \right). \quad (10)$$

Далі ребрам, які відповідають лініям зв'язку оптичної мережі (графа  $\Gamma^{ON}$ ) та встановленому оптичному конвертору (дуга, що зв'язує  $v^c$  та відповідні вершини  $\Gamma^{ON}$ ), приписується вартість їх використання. Ребрам графів  $\{\Gamma^\lambda\}$  приписується пропускна здатність  $s(e^\lambda) = 1$ .

Наступним етапом є синтез багатпродуктової потокової моделі для багат шарового графа. Система рівнянь, що описує цю потокову модель, враховує величини потоків, що протікають по ребрам графів шарів та ребрам, які зв'язують ці

шари. Ребрами графа  $\Gamma^F$  протікає потік  $k$ -го продукту одиничної величини. Потоки, що протікають ребрами графів  $\{\Gamma^\lambda\}$ , обмежуються їх пропускною здатністю:

$$\sum_k x_{ijk}^\lambda \leq c(e_{ij}^\lambda), \quad \forall e_{ij}^\lambda \in \Gamma^\lambda, \quad (11)$$

де  $x_{ijk}^\lambda$  - потік  $k$ -го продукту, що протікає по ребру  $e_{ij}^\lambda$  графа  $\Gamma^\lambda$ .

Система обмежень, яка використовується при розв'язанні цієї задачі, включає обмеження: що трафік, який передається каналом зв'язку, може використовувати тільки одну довжину хвилі:

$$\sum_\lambda x_{ijk}^\lambda = x_{ijk}^{ON}, \quad \forall e_{ij}^{ON} \in \Gamma^{ON}, \quad \forall k, \quad (12)$$

де  $x_{ijk}^{ON}$  - потік  $k$ -го продукту, що протікає по ребру  $e_{ij}^{ON}$  графа  $\Gamma^{ON}$ , а також обмеження, яке враховує умову збереження потоку у вершинах графа; обмеження, які враховують використання оптичних конверторів у вузлах мережі; та обмеження, що накладаються технологією WDM, а саме: незмінність довжини хвилі між вузлами відправник-отримувач або до вузла, де встановлено оптичний конвертор.

Таким чином, в дисертаційній роботі задача структурного синтезу оптичної телекомунікаційної мережі WDM сформульована як задача пошуку багат шарового підграфа мінімальної ваги та розподілу потоків вздовж ребер цього графа з врахуванням обмежень, які накладаються потоковою моделлю. Ця задача, у свою чергу, в дисертаційній роботі зведена та розв'язана як задача цілочисельного програмування.

На останньому етапі отриманий розв'язок оптимізаційної задачі у вигляді багат шарового графу інтерпретується до структури оптичної телекомунікаційної мережі, що синтезується.

**Третій розділ** присвячено задачам синтезу накладених мереж з комутацією пакетів, накладених поверх мережі WDM. Використання накладеної мережі з комутацією пакетів дозволяє більш ефективно використовувати пропускну здатність транспортної мережі завдяки перегрупуванню пакетів у потоках, що передаються по світловим шляхам.

Першою задачею, яка розв'язана у цьому розділі дисертації є задача структурного та параметричного синтезу транспортної мережі IP/MPLS, накладеної поверх оптичної телекомунікаційної мережі WDM.

Математична модель цієї задачі враховує множину вузлів мережі та можливих місць встановлення обладнання LSR, множину каналів зв'язку між LSR та оптичних ліній зв'язку, використання яких дозволено, вартість встановлення обладнання LSR і оптичних кросконекторів WDM та вартість будівництва оптичних ліній зв'язку, пропускні здатності інтерфейсів LSR та вартість їх встановлення.

Необхідно знайти множину вузлів, що входить до складу мережі та топології мереж MPLS і WDM, пропускні здатності інтерфейсів LSR, маршрути передачі потоків у мережі MPLS, світлові шляхи та прив'язку до них довжин хвиль.

Критерієм оптимальності є мінімум вартості мережі, що синтезуються.

При розв'язанні задачі використовувалася математична модель мережі, що синтезується, у вигляді багатошарового графу. При цьому у мережі, що синтезується, були виділені наступні рівні: рівень потоків, рівень мережі IP/MPLS, рівень оптичної мережі WDM, рівень світлових шляхів.

Кожний з рівнів описувався графом відповідного шару багатошарового графа. Граф шару інформаційних потоків  $\Gamma^F$  містить вершини, які відповідають вузлам відправник-отримувач мережі, а також ребра, що зв'язують вершини взаємодіючих вузлів. Граф  $\Gamma^M$  шару мережі IP/MPLS містить вершини, які відповідають вузлам IP/MPLS мережі. Для кожного потенційного зв'язку мережі MPLS, що проектується, до складу графа вводиться сукупність дуг  $\{\vec{e}_{st,m}^M\}$ , яка відповідає можливим типам інтерфейсного обладнання, яке може використовуватися у відповідному напрямку зв'язку. Граф шару оптичної мережі  $\Gamma^{ON}$  та множина графів шару світлових шляхів  $\{\Gamma^\lambda\}$  мають топологію, яка відповідає вихідній надлишкової топології оптичної мережі, що проектується.

Граф  $\Gamma'$ , який з'єднує шари багатошарового графа, містить ребра, які з'єднують вершини графа  $\Gamma^F$  і  $\Gamma^M$  та описують місця встановлення прикордонних маршрутизаторів; ребра, які з'єднують графи  $\Gamma^M$  і  $\Gamma^{ON}$  та відповідають місцям встановлення вузлів мережі MPLS, а також ребра, що з'єднують вершини  $\Gamma^{ON}$  з вершинами графів  $\{\Gamma^\lambda\}$ , які відповідають одним і тим же вузлам оптичної мережі (рис. 1,а).

Вихідний багатошаровий граф  $MLG$ , що використовується при розв'язанні задачі, є об'єднанням цих графів.

Ребрам та вершинам графа  $MLG$  приписуються вартість їх використання та пропускні здатності. Вершинам графа  $\Gamma^M$  приписується вартість встановлення обладнання LSR, а дугам, що з'єднують ці вершини - пропускні здатності  $c(\vec{e}_{st,m}^M)$  відповідних інтерфейсів та вартість їх встановлення. Вершинам графа  $\Gamma^{ON}$  приписується вартість встановлення обладнання оптичних кросконекторів, а ребрам, що з'єднують – вартість будівництва оптичних ліній зв'язку. Ребрам графів  $\{\Gamma^\lambda\}$  приписується пропускна здатність  $c(e^\lambda)=1$ . По ребрам графа  $\Gamma^F$  пропускаємо потік  $f(e_i^F) = (f_i, f_i^+)$  з характеристиками, які відповідають потокам між вузлами відправник - одержувач мережі, що синтезується, де  $f_i$  - середнє значення (біт/с), а  $f_i^+$  - додаткове значення (вимоги до запасу пропускної здатності каналу зв'язку).

Розв'язок поставленої задачі синтезу полягає у знаходженні багат шарового підграфа мінімальної вартості графа MLG, який задовольняв би обмеженням до пропускної здатності ребер, структури багат шарового графа та збереження потоків у вершинах і вздовж шляхів.

Для цього у роботі було синтезовано потокову модель для багат шарового графа, де для потоків у дугах графа  $\Gamma^M$  висунуто обмеження:

$$\sum_{e_i^F \in E^F} \sum_{\pi_k^i \in \Pi^i: (s,t) \in \pi_k^i} f_i \cdot x_k^i + c_{st}^+ \leq \sum_m c(\bar{e}_{st,m}^M) \cdot x_{st,m}^M, \quad \forall (s,t), \{\bar{e}_{st,m}^M\} \subset E^M, \quad (13)$$

$$\sum_{\pi_k^i \in \Pi^i: (s,t) \in \pi_k^i} f_i^+ \cdot x_k^i, \quad \forall e_i^F \in E^F, \quad \forall (s,t), \{\bar{e}_{st,m}^M\} \subset E^M, \quad (14)$$

де  $\Pi^i = \{\pi_k^i\}$  - множина шляхів передачі  $i$ -го потоку;  $x_k^i$  - індикатор використання  $k$ -го шляху для передачі  $i$ -го потоку;  $x_{st,m}^M$  - індикатор використання для передачі потоків дуги  $\bar{e}_{st,m}^M$ ;  $c_{st}^+$  - величина запасу пропускної здатності інтерфейсу між вузлами  $(s,t)$ .

Обмеження для потокової моделі на нижніх рівнях графа MLG аналогічні попередній задачі, що розв'язувалася у другому розділі, за умови відсутності у мережі оптичних конверторів.

Математична модель, яка отримана у дисертаційній роботі, в результаті проведених операцій дозволила розв'язувати цю задачу як задачу цілочисельного програмування з інтерпретацією отриманого розв'язку в структуру мережі, що синтезується.

При побудові транспортних мереж з комутацією пакетів, накладених поверх оптичних мереж, виникає задача визначення маршрутів та розподілу потоків вздовж них на рівні пакетної мережі. Саме розв'язку цієї задачі присвячена друга частина третього розділу.

В роботі звертається увага, що транспортну мережу у загальному випадку можна віднести до великих та збалансованих мереж. У цьому випадку для розв'язання задачі визначення маршрутів та розподілу потоку можна використовувати метод розподілу потоку для нерозгалужених потоків, який на практиці легко реалізувати в мережах IP/MPLS.

Крім того, в дисертаційній роботі стверджується, що сучасному трафіку у транспортних мережах притаманні властивості, які виходять за межі класичних моделей теорії телетрафіка, насамперед моделі пуассонівського потоку, що призводить до помилок при визначенні параметрів елементів телекомунікаційних систем. В розділі здійснено вибір моделі потоку у мережі та методу визначення параметрів потоків при їх агрегуванні. У якості моделі потоку вибрано моделі фрактального броунівського руху.

Запропонований метод розв'язку задачі базується на модифікації раніш відомого методу відхилення потоку та враховує особливості побудови мереж IP/MPLS, накладених поверх оптичних транспортних мереж з мультиплексуванням за довжиною хвилі. Цей метод містить наступні кроки.

1. Здійснюється розподіл потоків вздовж найкоротших шляхів в метриці кількості переприйомів. Прийmemo  $n = 0$ .

2. Для існуючого розподілу потоків для кожного каналу зв'язку  $(i,j)$  розраховується метрика

$$\alpha_{st}^n = \left. \frac{\partial T}{\partial f_{ij}} \right|_{f_{ij}=f_{ij}^n}, \quad (15)$$

$$\frac{\partial T}{\partial f_{ij}} = \frac{1}{\Lambda} \left( (c_{ij} f_{ij})^{(2H_{ij}-1)/(2-2H_{ij})} \frac{2H_{ij}-1}{2-2H_{ij}} + \frac{H_{ij}}{1-H_{ij}} \cdot \frac{f_{ij}(c_{ij}-f_{ij})^{-1}+1}{(c-f)^{H_{ij}/(1-H_{ij})}} + \frac{1}{c_{ij}} \right), \quad (16)$$

де  $T$  - середній час затримки пакету у мережі,  $c$ ;  $\Lambda$  - сумарний трафік, що надходить до мережі, пак/с;  $c_{ij}$  - пропускна здатність каналу зв'язку, біт/с;  $f_{ij}$  та  $H_{ij}$  - параметри потоку у каналі зв'язку  $(i,j)$  (інтенсивність потоку, біт/с та параметр Херсту).

3. Знаходимо матрицю найкоротших шляхів  $\Pi = [\pi_{st}^n]$  у метриці  $\alpha_{st}^n$

4. Для кожного інформаційного потоку здійснимо його відхилення по знайденому найкоротшому шляху та перевіряємо, чи вдалося зменшити середній час затримки. Якщо ні, то повертаємося до попереднього розподілу.

5. Якщо нам не вдалося змінити розподіл потоків у мережі, то кінець алгоритму, інакше прийmemo  $n = n + 1$  та повертаємося на крок 2.

Даний алгоритм збігається за скінченне число кроків, тому що є лише кінцеве число нерозгалужених потоків.

**У четвертому розділі** наведено методику проведення іспиту запропонованих у дисертації методів проектування мультисервісних телекомунікаційних систем та здійснено аналіз результатів іспиту.

Наведено опис структури пакета програм, який застосовується у роботі для проведення дослідження запропонованих методів та алгоритмів. Основними структурними елементами пакета є: база даних проектів, що є інформаційним наповненням пакета, бібліотека алгоритмів, яка складається з інструментальних засобів розв'язання складових задач проектування та синтезу структури системи у цілому, менеджер взаємодії; утиліта візуалізації результатів проектування.

Методика дослідження ефективності запропонованих у роботі методів базувалася на розв'язанні задач структурного та параметричного синтезу з використанням методів, які розроблені в роботі та раніш відомими при однакових вихід-

них даних. Для цього було синтезовано вихідні дані випадковим методом для різного розміру мережі (різної кількості вузлів).

В роботі було проведено дослідження методу синтезу гетерогенної оптичної транспортної мережі. При цьому було досліджено вплив внутрішніх параметрів методики еластичної мережі, таких як значення вагових коефіцієнтів  $\sigma$  і  $\tau$ , початкове значення параметра  $T$  та швидкість його зміни  $d_T$ , а також розмір території, в межах якої застосовується ця методика. За результатами аналізу проведеного дослідження методики вироблено практичні рекомендації по її застосуванню.

З використанням отриманих значень внутрішніх параметрів методики еластичної мережі було проведено порівняльне дослідження запропонованого методу структурного синтезу гетерогенної оптичної мережі з відомими методами синтезу, які базуються на послідовному розв'язанні задач визначення місць концентрації навантаження з встановленням вузла магістрального сегмента у центрі цієї зони та окремим розв'язанням задач синтезу топології, визначення маршрутів та призначення довжин хвиль. За результатами цього порівняльного аналізу було встановлено, що запропонований у роботі метод дозволяє зменшити час розв'язання задачі за рахунок використання методики еластичної мережі замість точного розв'язання задачі комівояжера, а також отримати структуру мережі меншої вартості за рахунок спільного розв'язання задач синтезу топології та визначення місць встановлення вузлів магістрального сегмента та спільного розв'язання задач синтезу топології нижнього рівня, визначення маршрутів для світлових шляхів та призначення довжин хвиль. Відносний вииграш складав від 5,5% до 9%.

Проведений порівняльний аналіз запропонованого методу структурного синтезу оптичної транспортної мережі з використанням у частині вузлів мережі оптичних конвертерів з раніш відомими методами показав, що спільне розв'язання задач синтезу топології, визначення маршрутів для світлових шляхів, призначення довжин хвиль та визначення місць встановлення оптичних конверторів дозволяє отримати структуру мережі на 6-10% меншої вартості, ніж при послідовному розв'язанні цих задач.

В дисертаційній роботі було проведено дослідження запропонованого методу структурного та параметричного синтезу IP/MPLS мережі, накладеної поверх мережі WDM, шляхом його порівняльного аналізу з раніш відомим методом, який базується на послідовному розв'язанні задач синтезу топології кожної із мереж. За результатами аналізу встановлено, що запропонований в роботі метод дозволяє отримати структуру мережі на 7 - 11% меншої вартості.

В роботі досліджено метод розподілу потоків у IP/MPLS мережі, накладеної поверх мережі WDM з використанням засобів імітаційного моделювання. Методика дослідження складалась у наступному. Для однакових наборів вихідних даних здійснювався розподіл потоків у мережі з використанням методу, що базується на пуассонівській моделі потоку та запропонованого в роботі методу, який враховує наявність у потоків ефекту самоподоби. Порівняльний аналіз результатів експери-



менту показав, що розподіл потоків, отриманий за допомогою запропонованого в роботі методу, дозволив знизити середній час затримки пакетів у мережі від 8 до 16%, а також отримані за результати імітаційного моделювання значення середнього часу затримки пакетів у мережі були близькими до теоретично очікуваних з використанням моделей самоподібного трафіка.

## Висновки

В дисертаційній роботі розв'язано актуальну науково-прикладну задачу розробки нових і вдосконалення існуючих методів структурного та параметричного синтезу оптичних транспортних телекомунікаційних мереж WDM з використанням моделей у вигляді багат шарових графів та представлення потоків у мережі як самоподібних процесів з метою використання їх при проектуванні. При цьому отримано наступні наукові та прикладні результати.

1. Проведено аналіз принципів побудови сучасних телекомунікаційних транспортних мереж та встановлено, що найбільш перспективними є оптичні мережі з мультиплексуванням за довжиною хвилі, до яких відносяться мережі WDM. Аналіз принципів побудови цього класу мереж виявив непридатність раніш відомих методів синтезу, які використовуються для мереж з комутацією пакетів. В роботі також встановлено, що до основних методів підвищення пропускної здатності WDM мереж відноситься використання оптичних конверторів та перегрупування потоків у мережах з комутацією пакетів, які накладені поверх оптичної мережі. В роботі сформульовано та розв'язано декілька задач структурного та параметричного синтезу WDM мереж, які використовують ці підходи. Розв'язання задачі сформульовано у вигляді методу, який реалізується, при наявності початкових даних на ПЕОМ.

2. Наведено постановку і розв'язано задачу синтезу гетерогенної оптичної транспортної мережі WDM з кільцевою топологією магістрального сегмента. При розв'язанні задачі було використано методику еластичної мережі, що дозволило одночасно здійснити вибір місць розташування магістральних вузлів та синтез топології магістрального сегмента. При синтезі мережі нижнього рівня одночасно здійснювався синтез топології, визначення маршрутів світлових шляхів та призначення довжин хвиль. Результати дослідження цього методу свідчать, що застосування такого підходу зменшило час розв'язання задачі та дозволило отримати структуру мережі у середньому на 7% меншої вартості.

3. Наведено постановку та розроблено метод розв'язання задачі структурного та параметричного синтезу оптичних транспортних мереж WDM з оптичними конверторами. Метод синтезу базується на використанні для опису структури мережі багат шарового графу. Це дозволило одночасно здійснити синтез топології мережі, вибір маршрутів для світлових шляхів, призначення довжин хвиль та визначення місць встановлення оптичних конверторів. За результатами порівняль-

ного аналізу з раніш відомими методами, це дозволило зменшити вартість результуючої структури мережі у середньому на 8%.

4. Наведено постановку та розв'язано задачу структурного та параметричного синтезу IP/MPLS мережі, накладеної поверх мережі WDM. Запропонований метод базується на використанні багат шарового графа, що дозволило одночасно визначити топології мережі та маршрути передачі потоків на кожному її рівні, визначити місця встановлення вузлів LSR та призначити довжини хвиль. Аналіз результатів порівняльного дослідження свідчить, що запропонований метод дозволяє отримати структуру мережі на 7-11% меншої вартості.

5. Результати дослідження методів, які базуються на використанні багат шарового графу свідчать, що застосування багат шарового графа дозволяє описати телекомунікаційну систему, яка містить накладені мережі, як єдиний цілісний об'єкт та отримати, у результаті синтезу, більш ефективні структури системи за технічним та економічними параметрами.

6. Вдосконалено метод розподілу для нерозгалужених потоків у IP/MPLS мережі, накладеної поверх мережі WDM, за рахунок використання моделей потоків як самоподібних процесів. Це, як свідчать результати імітаційного моделювання, дозволило зменшити середній час затримки пакетів у мережі на 8-16% в порівнянні з методами, що базуються на пуассонівських процесах.

7. Розроблені та модернізовані методики та програмна реалізація рекомендується для використання в проектних організаціях, на етапах проектування телекомунікаційних систем, які знову споруджуються чи реконструюються, з числом вузлів до декількох десятків, за наявності в інформаційних потоках, що передаються, ефекту самоподоби. Отримані результати впроваджені у навчальний процес кафедри телекомунікаційних систем у дисциплінах з проектування телекомунікаційних систем, що підтверджується відповідним актом впровадження.

### **Список опублікованих праць за темою дисертації**

1. Агеев Д.В. Определение объема сетевого ресурса, необходимого при предоставлении услуг телефонии и передачи данных / Д.В. Агеев, А.А. Переверзев, Хайдара Абдалла // Радиотехника: Всеукр. межвед. науч.-техн. сб. - 2009. - № 159. - С. 30 – 34.

2. Агеев Д.В. Проектирование сети MPLS с использованием многослойных графов / Д.В. Агеев, Хайдара Абдалла // Вісник Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій. - 2011. - Т. 9, № 1. - С. 77 - 85.

3. Агеев Д.В. Параметрический синтез мультисервисных телекоммуникационных систем с применением математической модели многослойного графа / Д.В. Агеев, Хайдара Абдалла // Цифрові технології. - 2011. - № 10. - С. 18 – 26.

4. Агеев Д.В. Структурный синтез гетерогенной оптической телекоммуникационной сети xWDM / Д.В. Агеев, Хайдара Абдалла // Проблемы телекоммуникаций. - 2012. - № 1(6). - С. 67 – 75.

5. Агеев Д.В. Моделирование телекоммуникационной системы предоставления услуг Video-on-Demand с использованием многослойного графа / Д.В. Агеев, А.А. Игнатенко, Хайдара Абдалла // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. - 2012. - № 2/11(56). - С. 21 – 24.

6. Агеев Д.В. Особенности проектирования телефонной сети общего пользования на различных этапах развертывания NGN / Д.В. Агеев, С.А. Кадурич, Хайдара Абдалла // 13-й міжнар. молодіжний форум «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.» Зб. матеріалів. - Харків: ХНУРЕ, 2009. - С. 140.

7. Агеев Д.В. Распределение информационных потоков в мультисервисных телекоммуникационных системах согласно критерию максимума прибыли оператора связи / Д.В. Агеев, Хайдара Абдалла // Наук.-техн. конф. «Світ інформації та телекомунікацій - 2010»: Зб. тез. – К.: ДУІКТ, 2010. - С. 72.

8. Агеев Д.В. Применение многослойных графов при проектировании мультисервисных телекоммуникационных систем на примере сети MPLS / Д.В. Агеев, Хайдара Абдалла // Інфокомунікації – сучасність та майбутнє: матеріали першої міжнар. наук.-пр. конф. молодих вчених м. Одеса 6-7 жовт. 2011 р. – Ч.1. Одеса:ОНАЗ, 2011. - С. 162 – 164.

9. Игнатенко А.А. Построение мультисервисных телекоммуникационных систем с применением методов целочисленного программирования и учетом требований спецификаций MUSE / А.А. Игнатенко, Д.В. Агеев, Хайдара Абдалла // 4-й Международный радиоэлектронный форум «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития» МРФ-2011: Сб. науч. трудов. Т.2. - Харьков: ХНУРЭ, 2011. - С. 143 – 144.

10. Агеев Д.В. Проектирование наложенных транспортных сетей с применением модели многослойного графа // 16-й международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в ХХІ веке»: Сб. материалов форума. Т.4. - Харьков: ХНУРЭ, 2012. - С. 110 – 111.

11. Haidara Abdalla. Application of Multi-layer Graphs In the Design of MPLS Networks: Networking and Internet Architecture / Haidara Abdalla, D.V. Ageyev // Proceedings of the XIth International Conference on Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications, and Computer Science, TCSET'2012. - Lviv-Slavske, Ukraine: Lviv Polytechnic National University, 2012. - P. 336 – 337.

### **Анотація**

Хайдара Абдалла Абдулрахман. Методи синтезу оптичної транспортної мережі WDM з використанням моделі багатошарових графів. – Рукопис. Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.12.02

– телекомунікаційні системи та мережі. Харківський національний університет радіоелектроніки. Харків, 2012.

Дисертація присвячена вдосконаленню методів структурного та параметричного синтезу оптичних телекомунікаційних мереж з використанням математичних моделей у вигляді багаточарових графів та представлення інформаційних потоків у мережі як самоподібних процесів з метою використання їх при проектуванні. У роботі запропоновано метод структурного синтезу гетерогенної оптичної мережі з кільцевою топологією магістрального сегмента; метод синтезу оптичної транспортної мережі WDM з оптичними конверторами; метод структурного та параметричного синтезу транспортної мережі IP/MPLS, накладеної поверх оптичної мережі; метод визначення маршрутів та розподілу у транспортній мережі IP/MPLS, накладеній поверх оптичної мережі з врахуванням наявності в інформаційних потоках ефекту самоподоби. Досліджено ефективність запропонованих методів і розроблено практичні рекомендації по їх застосуванню. Порівняльний аналіз запропонованих методів з раніш відомими показав, що розроблені в роботі методи дозволяють отримати більш ефективну структуру оптичної транспортної мережі за технічними та економічними показниками.

**Ключові слова:** оптична мережа, телекомунікації, світловий шлях, оптичний конвертор, потік, самоподоба, пропускна здатність, метод оптимізації, багаточаровий граф.

#### Аннотація

Хайдара Абдалла Абдулрахман. Методы синтеза оптической транспортной сети WDM с использованием модели многослойных графов. – Рукопись. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.12.02 – Телекоммуникационные системы и сети. Харьковский национальный университет радиоэлектроники. Харьков, 2012.

На современном этапе развития общества информационные технологии бурно развиваются. Немаловажную роль при этом играют телекоммуникационные системы, важной составляющей которых являются транспортные сети. Наиболее перспективной технологией, используемой при построении транспортных сетей, является применение оптических сетей с мультиплексированием по длине волны, к которым относятся сети WDM. Методы синтеза, используемые при проектировании сетей с коммутацией пакетов, не подходят для синтеза сетей WDM. Это требует модернизации существующих и разработки новых методов синтеза.

Используемые сейчас методы параметрического синтеза базируются на классических моделях теории телетрафика, которые не в полной мере соответствуют характеристикам потоков, передаваемых в современных сетях. Это приводит к большим погрешностям при проектировании. Как показали совре-

менные исследования, более адекватными являются модели самоподобных процессов.

В диссертационной работе проведен анализ принципов построения оптических транспортных сетей WDM и определены основные подходы увеличения эффективности их использования. В работе приведены постановки и разработаны методы решения задач, которые используют эти подходы.

Разработан метод структурного и параметрического синтеза гетерогенных оптических сетей с кольцевой топологией магистрального сегмента. Метод синтеза базируется на применении методики эластичной сети, что позволяет совместно решать задачу выбора мест установки магистральных узлов и синтеза топологии магистрального сегмента. При синтезе структуры сегмента сети нижнего уровня совместно решается задача синтеза топологии сети, выбора маршрутов для световых путей и назначения длин. Это позволяет, как показали результаты сравнительного анализа, уменьшить время решения задачи и стоимость результирующей структуры сети. В работе также было проведено исследование влияния внутренних параметров методики эластичной сети на результаты синтеза. Проведен анализ результатов данного исследования и выработаны практические рекомендации по применению.

Поставлена и решена задача структурного и параметрического синтеза оптической транспортной сети с оптическими конверторами. При решении данной задачи использовался многослойный граф, который позволяет представить структуру синтезируемой телекоммуникационной системы как единый целостный объект, что позволяет совместно решать задачу синтеза топологии, выбора мест установки оптических конверторов, выбора маршрутов для световых путей и назначения длин волн. Это позволяет получить экономически более эффективную структуру системы.

В работе поставлена и решена задача структурного и параметрического синтеза транспортной сети IP/MPLS, наложенной поверх сети WDM. Для описания наложенных сетей использовался многослойный граф, который позволил описать синтезируемую систему как единый целостный объект и совместно решить задачи синтеза топологии сети на каждом ее уровне, выбора мест установки узлов LSR, маршрутов передачи потоков, пропускных способностей интерфейсов LSR и назначения длин волн световым путям. Это позволило получить структуру сети с меньшей стоимостью.

Модифицирован метод распределения потоков в сети IP/MPLS, наложенной поверх сети WDM, для случая неразветвленных потоков за счет использования моделей потоков, как самоподобных процессов. Это позволило уменьшить среднее время задержки пакета в сети по сравнению с методом, базирующимся на применении пуассоновских моделей потоков.

Ключевые слова: оптическая сеть, телекоммуникации, световой путь, оптический конвертор, поток, самоподобие, пропускная способность, метод оптимизации, многослойный граф.

### **Abstract**

Haidara Abdallh Abdulrahman. WDM optical transport network synthesis methods with multilayer graph usage – Manuscript. Thesis for candidate's degree by speciality 05.12.02 – Telecommunication systems and network - Kharkov National University of Radioelectronics. Kharkov, 2012.

This thesis is devoted to improving optical telecommunication networks structural and parametric synthesis methods using mathematical models in the form of multilayer graphs and presentation of information flow in the network as self-similar processes for their usage in the design. In this thesis proposed a number methods, as: heterogeneous optical network with a ring topology backbone segment structural synthesis method; optical WDM transport network with optical converters synthesis method; IP/MPLS transport overlay network over optical networks structural and parametric synthesis method; routes determining and traffic distribution method for IP/MPLS transport overlay network over optical networks, which taking into account the presence of self-similarity effect for information flow. The efficiency of the proposed methods has been investigated and practical recommendations for their application were proposed.

Comparative analysis of the proposed methods with previously known showed that developed in the dissertation methods allow obtain a more effective optical transport network structure by technical and economic parameters.

Key words: optical network, telecommunication, light path, optical convector, flow, self-similarity, throughput, optimization method, multilayer graph.

Підп. до друку 21.09.12.  
Умов. друк. арк. 0,9  
Зам. №

Формат 60x84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>  
Тираж 100 прим.  
Ціна договірна.

Спосіб друку – ризографія

---

ХНУРЕ, 61166, Харків, просп. Леніна, 14

---

Віддруковано в навчально-науковому  
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ.  
Харків, просп. Леніна, 14