УДК 681.32.03
**О.В. Красько, О.В Корецький**
Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікацій

# РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ

*© Красько О.В. Корецький О.В., 2011*

**Роботу присвячено аналізу методів розрахунку параметрів якості оптичних мереж та дослідженню проблем, що виникають під час переходу до фотонних мереж.**
**Ключові слова: оптична мережа, фотонна мережа, DWDM, SDM, MPLS.**

**The work devoted to research of methods for calculating the quality parameters of optical networks and research issues that arise during the transition to photonic networks.**
**Key words: optical networks, photonic networks, DWDM, SDM, MPLS.**

## Вступ

Питання підвищення ефективності використання оптичного волокна і зменшення проблем, пов'язаних з його перевантаженням, вже давно хвилюють зв'язківців, особливо там, де інформаційні потоки надзвичайно великі. Однак останні технологічні досягнення в галузі щільного спектрального мультиплексування (DWDM) дали змогу впритул наблизитися до їх вирішення.

Сучасний прогрес у розвитку повністю оптичних транспортних систем з використанням технології DWDM насправді неймовірний. Пропускна здатність одного оптичного волокна (ОВ) тепер становить вже кілька сотень гігабіт на секунду. І якби в кожному мережевому вузлі були присутні електронні пристрої оброблення даних, обладнання мережі було б надзвичайно дорогим. Використовуваний механізм обходу мережного вузла вводу / виводу на оптичному рівні дає змогу істотно зменшити застосування електронного обладнання і розширити пропускну здатність транспортної мережі. І якщо так організувати весь тракт передачі, то відбудеться справжній переворот в розвитку оптичних мережевих технологій.

Оптико-електронне перетворення є вузьким місцем усього процесу і перешкоджає розширенню пропускної здатності конкретного вузла і всієї мережі. Щоб уникнути цієї проблеми, повністю оптичні мережі використовуватимуть прямі оптичні з'єднання без електронної маршрутизації.

Наступним кроком розвитку оптичних мереж буде застосування фотонних транспортних мереж. До останнього часу застосування WDM-обладнання обмежувалося високошвидкісними з’єднаннями “точка – точка”, а в міських мережах та мережах доступу поширення воно не набуло. На це є кілька причин: висока гетерогенність міських мереж (безліч топологій і протоколів), і наявність альтернативних рішень, часто дозволяють операторам не поспішати з переходом на невідому їм технологію, і ціновий фактор, який нерідко змушує зробити вибір на користь фізичного нарощування мережевої інфраструктури, і, нарешті, недостатня гнучкість і практично повна відсутність інтелектуальності, а без них неможливо ні адаптувати мережу до швидкого зростання обсягів трафіку, ні оперативно надавати користувачам різноманітні послуги. Ще однією важливою проблемою оптичних та фотонних мереж є оцінювання якості роботи мережі за фізичним рівнем.

## Метод оцінювання якості передавання оптичних мереж

Для оцінювання якості передавання був вибраний якісний параметр – коефіцієнт помилок $К_{пом}$ (BER – Bit Error Rate) або імовірності помилки $Р_{пом}$, що виникають під час передавання деякої кількості повідомлень (біт інформації). Імовірність помилок можна інтерпретувати, як функцію від відношення сигнал/шум (1), тобто $P_{пом} = \left(c/ш\right)$ Для двійкових цифрових каналів такою функцією є функція Крампа, що протабульована та широко використовується в інженерних розрахунках. Отже, розрахунок $Р_{пом}$



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

еквівалентний розрахунку с/ш, а це своєю чергою реалізується за допомогою аналізу загальних шумів каналу системи, до складу яких входять перехресні завади, шуми апаратури, волокна тощо.

Отже, для розрахунку якісного показника роботи системи передавання інформації, а саме коефіцієнта помилок на виході наявна формула

$$K_{пом} = \frac{1}{2} \cdot erfc\left(\frac{Q}{\sqrt{2}}\right) \approx \frac{1}{Q\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{Q^2}{2}} \tag{1}$$

де Q – "Q-фактор" системи.

Своєю чергою наявний аналітичний запис для знаходження величини Q-фактора

$$Q = f\left(\frac{C}{Ш}\right) = \frac{2\frac{P_{со}}{P_{шо}}(\Delta\nu_{ок})^{-0.5}}{1+\left(1+4\frac{P_{со}}{P_{шо}}\right)^{-0.5}} \tag{2}$$

Отже, для визначення коефіцієнта помилок $К_{пом}$ оптичної системи передавання даних необхідно визначити відношення сигнал/шум на виході системи (див. рис. 1).

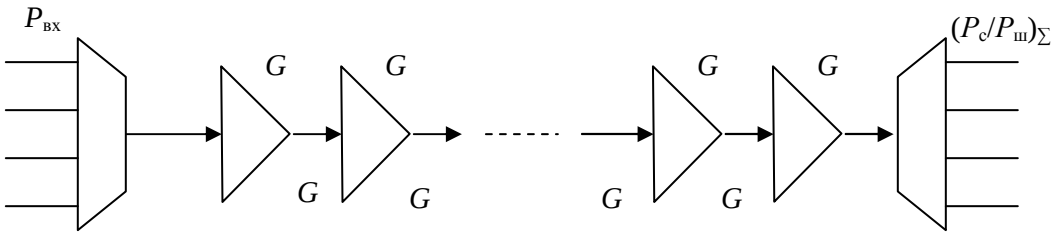


*Рис. 1. Спрощена схема DWDM тракту*

Сумарний сигнал/шум ($\left(с/ш\right)_\Sigma$) системи можна виразити так:

$$\frac{1}{\left(с/ш\right)_\Sigma} = \frac{1}{\left(с/ш\right)_1} + \frac{1}{\left(с/ш\right)_2} + \cdots + \frac{1}{\left(с/ш\right)_n} \tag{3}$$

Отже, збільшення відношення с/ш для першого каналу під час проходження k компоненти системи зі спектральним розділенням каналів можна подати рівнянням:

$$a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + \ldots + a_k \cdot x_k = 1/\left(с/ш\right)_\Sigma \tag{4}$$

де $a_k$ – власні шуми *k*-го компонента системи; $x_k$ – обернена величина потужності сигналу на вході в *k*-й компонент системи.

Для описування xWDM системи з *i* каналами необхідно записати *i* рівнянь системи. Оскільки коефіцієнт $a_k$ характеризує власні завади *k*-го компонента, то $a_k$ є функцією параметрів *k*-го компонента і може бути виражена $a_k = f(\vec{\beta}_k)$ де $\vec{\beta}_k$ – вектор параметрів *k*-го компонента. Потужність на виході *k+1* компонента залежатиме від потужності на виході *k*-го компонента, отже, $x_{k+1} = f(x_k)$, описана математично xWDM система матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
a_{1,1} \cdot x_{1,1} + a_{2,1} \cdot x_{2,1} + a_{3,1} \cdot x_{3,1} + \ldots + a_{k,1} \cdot x_{k,1} &= 1/\left(с/ш\right)_{\Sigma_1} \\
a_{1,2} \cdot x_{1,2} + a_{2,2} \cdot x_{2,2} + a_{3,2} \cdot x_{3,2} + \ldots + a_{k,2} \cdot x_{k,2} &= 1/\left(с/ш\right)_{\Sigma_2} \\
\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad &= \ldots \\
a_{1,i} \cdot x_{1,i} + a_{2,i} \cdot x_{2,i} + a_{3,i} \cdot x_{3,i} + \ldots + a_{k,i} \cdot x_{k,i} &= 1/\left(с/ш\right)_{\Sigma_i}
\end{aligned} \tag{5}$$



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Отже, для визначення рівнянь (5) необхідно визначити елементи $a_{k,i}$ *x* WDM системи, а також задати вхідну потужність в оптичне волокно у кожен канал.

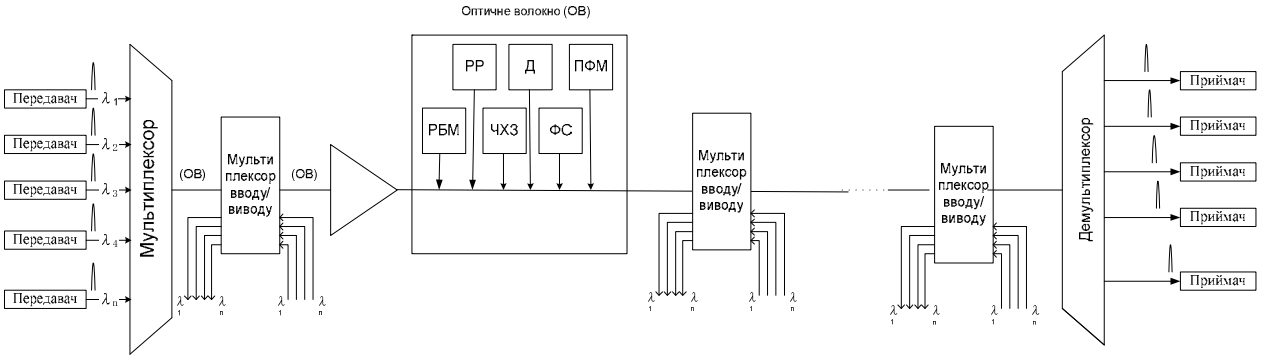


*Рис. 2. Елементна структура еквівалентного оптичного тракту транспортної DWDM мережі (РР – вимушене комбінаційне розсіювання Рамана; Д – дисперсія; ПФС – перехресна фазова модуляція; РБМ – вимушене зворотне розсіювання Бріллюена-Мандельштама; ЧХЗ – чотирихвильове змішування; ФС – фазова самомодуляція)*

Кількість доданків $a_{k,i}$ в рівнянні (5) визначає кількість елементів DWDM системи і кількість каналів DWDM системи. На рис. 2 наведена еквівалентна схема DWDM системи з топологією точка-точка, з якої видно, що основними компонентами є передавач, мультиплексор, підсилювач, мультиплексор вводу/виводу, демультиплексор, приймач, ОВ а також атенюатори, фільтри, пристрої компенсації дисперсії. Шумові параметри ОВ описуються декілька.

**Перехід до фотонних мереж**

Сьогодні створено нову технологію оброблення оптичних сигналів, яка отримала назву лямбда-комутації (використовуються також терміни “фотонна комутація” і “комутація по довжинах хвиль”), яка працює на принципі комутації IP-пакетів по мітках, реалізований в протоколі MPLS (MultiProtocol Label Switching). Як відомо, MPLS дозволяє сформувати віртуальні шляхи передавання пакетів у мережі маршрутизаторів, комутуючих на основі міток (Label Switching Router, LSR). Кожен пакет забезпечується міткою, яка містить відомості про необхідний клас обслуговування (CoS) та адресу вузла призначення. Зазначена мітка зчитується тільки у разі перетину пакетом кордонів домену MPLS-комутації, в результаті чого відпадає необхідність у маршрутизації окремих пакетів у кожному з проміжних вузлів.

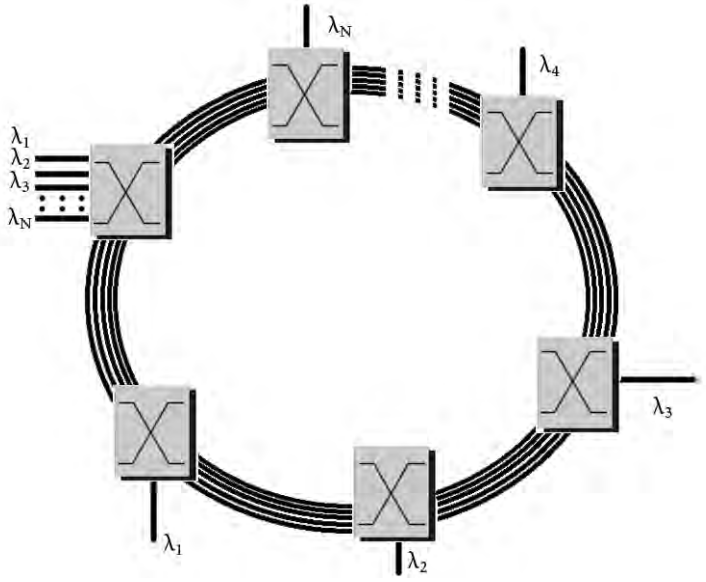


*Рис. 3. Схема мережі з лямбда-комутацією з кільцевою топологією*



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Ця сама ідея, перенесена на фізичний рівень оптичної мережі, набула форми протоколу Generalized MultiProtocol Label Switching (GMPLS), іноді називається MultiProtocol lambda Switching (MPlS). Комутація тут здійснюється вже не на основі міток, що містяться в заголовках пакетів, а відповідно до довжин хвиль, на яких передається трафік того чи іншого типу.

Застосування лямбда-комутації створює операторові такі можливості:

- забезпечити високу масштабованість мережевої інфраструктури;
- мінімізувати кількість накладених сервісів;
- підвищити ефективність використання наявної смуги пропускання;
- отримувати додатковий прибуток за рахунок надання сервісів, що використовують окремі довжини хвиль.

Ці послуги можуть приймати найрізноманітніші форми – від обміну частинами смуги пропускання між операторами дальнього зв'язку до продажу окремих довжин хвиль великим корпоративним замовникам (наприклад, з метою з'єднати територіально рознесені офіси). Ключ до розгортання подібних послуг полягає, по-перше, в прозорості транспортної інфраструктури по відношенню до типу, формату і методу кодування трафіку, до протоколів і швидкостей передачі, а по-друге, в кардинальному спрощенні самої мережевої моделі.

Сучасні оптичні мережі, як правило, мають чотирирівневий стек протоколів: за фізичну пропускну здатність відповідає DWDM, транспортні функції покладені на SONET / SDH, управління трафіком реалізовано на ATM-рівні, а додатки використовують протокол IP. Загальним недоліком подібних багаторівневих архітектур є так званий ефект найменшого спільного знаменника: один з рівнів нерідко обмежує можливості системи загалом, наприклад, знижує масштабованість мережі.

Логічно припустити, що ще тривалий час в СПД домінуватиме трафік IP, так що агрегація повільних потоків даних з високошвидкісними вимагатиме застосування швидкодіючих маршрутизаторів. Якщо ж розглядати потоки IP-пакетів, під час передавання яких можна обійтися без технології DWDM, то для їхнього оброблення буде використовуватися статистичне мультиплексування. Це означає, що стрімке зростання продуктивності обладнання оптичних мереж дасть змогу видалити з мережевої моделі рівні SONET / SDH і ATM; відповідні функції з часом будуть виконувати маршрутизатори, оптичні комутатори і пристрої DWDM. Мережева інфраструктура, що виникає в результаті, стає ефективнішою з економічного погляду і здатної транспортувати гігантські обсяги різнорідного трафіку.

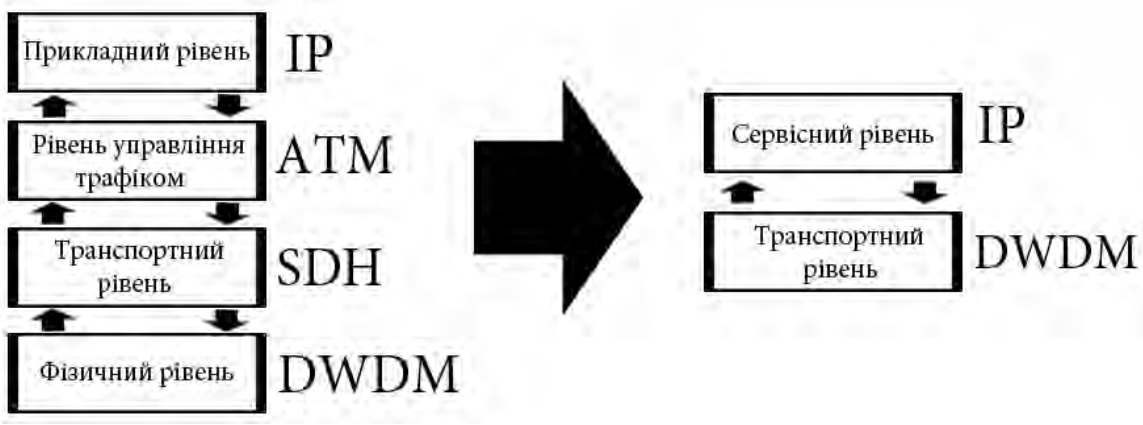


*Рис. 4. Перехід від оптичних мереж до фотонних*

Замість чотирьох вона включатиме всього два рівні – транспортний (фотонний) і сервісний. Спочатку в перший потраплять оптичні комутатори та системи спектрального мультиплексування, а в другій – маршрутизатори, ATM-комутатори і мультиплексори вводу / виводу. Але поступово деякі з цих пристроїв припинять своє існування в якості самостійних компонентів оптичної мережі.



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Взаємодія між різними елементами мережі в новій архітектурі здійснюється через загальну стандартизовану платформу управління (control plane). Саме вона дає змогу інтегрувати оптичне обладнання нового покоління і успадковані пристрої в єдине гетерогенне середовище.

Поява технології лямбда-комутації вимагає створення нового протоколу управління з'єднаннями між сусідніми вузлами оптичної мережі (Link Management Protocol, LMP). І звичайно ж, у реалізації лямбда-комутації в конкретних мережах вирішальне значення відводиться фізичним носіям нової технології.

Серед усього різноманіття компонентів оптичних транспортних мереж у разі переходу на дворівневу модель головне значення починають мати мультиплексори вводу / виводу і оптичні комутатори. Функції цих пристроїв полягають у встановленні з'єднань на рівні оптичних каналів між вхідними і вихідними портами, узгодженні рівнів сигналів і в управлінні довжинами хвиль і контролі за з'єднаннями.

Для споживача відмінність між мультиплексорами і комутаторами найчастіше зводиться до числа підтримуваних вхідних оптичних портів. Однак при зовнішній схожості функцій в технологічному плані поява оптичних комутаторів (optical cross-connect, OXC; іноді ці пристрої називають також лямбда-маршрутизаторами і маршрутизаторами довжин хвиль) ознаменувало собою принципово новий погляд на оброблення трафіку в оптичній мережі. Позбавлення необхідності перетворення оптичних сигналів в електричні і назад на мережевих вузлах відкриває шлях не тільки до радикального підвищення пропускної здатності, а й до розгортання нових типів послуг.

Оптичний комутатор здійснює динамічну зміну конфігурації мережі (на рівні окремих оптичних каналів) з метою відновлення транспортування трафіку після відмов або у відповідь на зміну потреб в пропускній здатності. Крім управління з'єднаннями і пропускною здатністю він відповідає за ввід / вивід каналів, ефективність використання спектрального ресурсу, підвищення надійності інфраструктури магістральної мережі, особливо за наявності незахищених портів маршрутизаторів, а також за маршрутизацію трафіку.

Потрібно підкреслити, що виконання настільки різнорідних функцій у мультисервісному середовищі, наприклад об'єднує низькошвидкісні міські мережі або мережі доступу з високопродуктивними магістралями, неможливо без допоміжного компонента, що забезпечує узгодження потоків різної інтенсивності. Таким компонентом є оптичні шлюзи, які, згідно з прогнозами аналітиків, з часом неминуче витіснять сьогоднішні цифрові комутаційні системи (Digital Cross-connect System, DCS) і будуть здійснювати перетворення швидкостей під час передавання трафіку між мережами різних типів, узгодження форматів переданих даних і керування широкосмуговими послугами на рівні електричних сигналів.

Технології лямбда-комутації ще тривалий час доведеться співіснувати з мережами SONET / SDH. У зв'язку з цим важливою є підтримка відповідних протоколів і швидкостей передачі (2,5 і 10 Гбіт / с). Інший фактор – кількість вхідних та вихідних портів комутатора: з часом вони почнуть обчислюватися багатьма тисячами, проте в найближчій перспективі розмір матриці навряд чи перевищить 512x512 (в "однохвильовому" еквіваленті).

Серед бажаних властивостей відзначимо ще здатність працювати в неблокуючому режимі за максимальної кількості встановлених з'єднань, а також підтримку багатоадресного пересилання з одного вхідного порту на кілька вихідних. В ідеалі комутатор повинен обробляти будь-яку кількість багатоадресних передач – без блокування вже встановлених з'єднань.

Нарешті, не менше значення має і кількість підтримуваних довжин хвиль. Спочатку кожен порт зможе працювати тільки з одним оптичним каналом, але з часом оптичні комутатори будуть наділені функціями спектрального мультиплексування на окремих портах. Втім на практиці цю можливість вдасться реалізувати тільки після появи стандартних "багатохвильових" інтерфейсів, адже перспектива на довгі роки опинитися заручником постачальника неуніверсального рішення навряд чи викличе великий ентузіазм у покупців.



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Наявні проблеми фотонних мереж вимагають розроблення нових підходів та методів розрахунку ефективності функціонування. Проведений аналіз показав, що відомі методи розрахунку ефективності оптичних мереж не завжди можна використовувати для фотонних мереж або їх використовують із істотним обмеженням. Тому нині існує потреба у детальнішому дослідженні фотонних мереж.

**Висновки**

У роботі був запропонований метод розрахунку параметрів якості оптичних мереж та показано проблеми, що виникають у разі переходу до фотонних мереж.

*1. Хмелев К. Основы фотонного транспорта. – К: Техніка, 2008. – 680 с. 2. Однорог П.М. Омецінська О.Б. Михайленко Є.В. / Під ред. Катка В.Б. WDM. – К., 2005. 3. A. A. M. Saleh and Simmons J.M., "Architectural principles of optical regional and metropolitan access networks," J. Lightwave Technol., vol. 17, pp. 2431–2448, Dec. 1999. 4. Слепов Н.Н. Синхронные цифровые сети SDH. – М.: Эко-Трендз-Трендз, 1998. 6. Сергеева Т.М. Баркова И.В. Оптимизация проектирования сетей SDH с резервированием // Вестник Связи 11. 2003.*



Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua