

Т.В. Андрухів, В.І. Романчук, А.В. Поліщук,
Національний університет “Львівський політехніка”,

МОДЕЛЮВАННЯ ПОВНІСТЮ ОПТИЧНИХ МЕРЕЖ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ УЩІЛЬНЕННЯМ КАНАЛІВ

© Андрухів Т.В., Романчук В.І., Поліщук А.В., 2008

Досліджено завади у повністю оптичних транспортних DWDM мережах і методи підвищення їхньої пропускної здатності, завади у компонентах та їхній вплив на передавання в системах зі спектральним ущільненням каналів.

A work is devoted to research of hindrances in fully optical transport DWDM networks and to the methods of their carrying capacity increasing, to research of hindrances in components and their influence on the transmission systems with a wave length division multiplexing of channels.

Вступ

У сучасних телекомунікаційних системах основні функціональні властивості фізичного рівня моделі ISO/OSI транспортних DWDM мереж, такі, як: підсилення, крос-з'єднання, комутація, контроль і діагностика забезпечуються за допомогою оптоелектронних перетворень в кожному вузлі мережі. Розвиток мереж приводить до введення нових вузлів і компонентів мережі та виникнення явищ, які не завжди можливо передбачити та врахувати під час проектування, тому важливо розвинути методи моделювання для удосконалення проектування та підвищення якості результуючих технічних рішень, що забезпечують конфігурування структури мережі та її адаптацію до змін навантаження. Різні вимоги клієнтів до смуги пропускання роблять застосування оптоелектронного перетворення небажаним та нерентабельним. У повністю оптичних мережах використовуються оптичні компоненти, що дають змогу зменшити вартість і забезпечити високу гнучкість при об'єднанні різних типів даних. Інша характеристика транспортних мереж – це наявність тисяч кілометрів вже прокладеного оптичного волокна, яке може містити як старі, так і нові оптичні сегменти. Робота зі старими волокнами призводить до збільшення дисперсії, нелінійних явищ, перехресних завад та збільшення затухання у волокні, що зумовлює застосування додаткових оптичних компонентів.

Нині існує низка програмних пакетів для моделювання DWDM мереж, всі вони забезпечують можливість дослідження роботи фізичного рівня транспортних DWDM мереж для топології “точка–точка” та використовують відомі частотно-часові методи. Однак час обчислень, який необхідний для моделювання оптичних мереж, робить ці методи непрактичними у багатьох випадках. DWDM тракти на вітчизняних мережах реалізуються часто на основі вже прокладених оптичних волокон встановленням апаратних слотів, розрахованих на лінійку каналних частот багатоканальних систем передавання замість або разом із слотами систем старших поколінь ієрархії DWDM, що, по-перше, зумовлює концентрацію порівняно високих потужностей оптичного випромінювання у вузьких смугах спектрального діапазону тракту, а по-друге, поряд із високими потужностями утворюється складна спектральна картина, яка підкреслює необхідність урахування розсіювань енергії у спектрах систем передавання та міжканальні впливи.

Отже, однією з основних проблем повністю оптичних транспортних мереж є накопичення завад, відповідно дослідження впливу завад є актуальним як у теоретичному, так і у практичному аспектах. Враховуючи актуальність цієї тематики, доцільним є комплексне дослідження елементної структури мережі, тобто множини елементів транспортної системи, сконфігурованих для утворення наскрізного оптичного каналу передавання інформації в транспортних мережах зі спектральним ущільненням.

Модель транспортної DWDM мережі

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

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

де Q – “Q-фактор” системи.

Своєю чергою, існує аналітичний запис для знаходження величини Q-фактора:

$$Q = f\left(\frac{C}{Ш}\right) = \frac{2 \frac{P_{co}}{P_{шo}} (\Delta v_{ок})^{-0.5}}{1 + \left(1 + 4 \frac{P_{co}}{P_{шo}}\right)^{-0.5}} \quad (2)$$

Отже, для визначення коефіцієнта помилок $K_{\text{пом}}$ оптичної системи передавання даних необхідно знайти відношення сигнал/шум на виході системи (рис. 1).

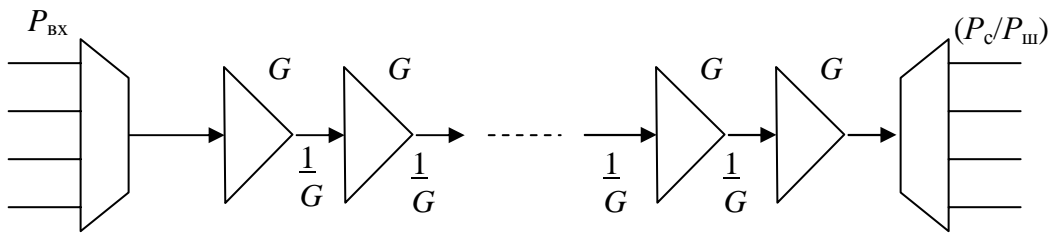


Рис. 1. Спрощена схема DWDM тракту

Сумарний сигнал/шум $\left(\frac{c}{w}\right)_\Sigma$ системи можна виразити так:

$$\frac{1}{\left(\frac{c}{w}\right)_\Sigma} = \frac{1}{\left(\frac{c}{w}\right)_1} + \frac{1}{\left(\frac{c}{w}\right)_2} + \dots + \frac{1}{\left(\frac{c}{w}\right)_n} \quad (3)$$

Отже, збільшення відношення c/w для першого каналу при проходженні к компоненти системи зі спектральним розділенням каналів можна відобразити рівнянням:

$$a_k \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 + \dots + a_k \cdot x_k = \frac{1}{\left(\frac{c}{w}\right)_\Sigma} \quad (4)$$

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

Для опису 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 буде залежати від потужності на виході k -го компонента, отже, $x_{k+1} = f(x_k)$. Описана математично x WDM система буде мати вигляд:

$$\begin{aligned}
 a_{1,1} \cdot x_{1,1} + a_{2,1} \cdot x_{2,1} + a_{3,1} \cdot x_{3,1} + \dots + a_{k,1} \cdot x_{k,1} &= \frac{1}{(c/w)_{\Sigma_1}} \\
 a_{1,2} \cdot x_{1,2} + a_{2,2} \cdot x_{2,2} + a_{3,2} \cdot x_{3,2} + \dots + a_{k,2} \cdot x_{k,2} &= \frac{1}{(c/w)_{\Sigma_2}} \\
 \dots \dots \dots \dots \dots \dots &= \dots \\
 a_{1,i} \cdot x_{1,i} + a_{2,i} \cdot x_{2,i} + a_{3,i} \cdot x_{3,i} + \dots + a_{k,i} \cdot x_{k,i} &= \frac{1}{(c/w)_{\Sigma_i}}
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

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.

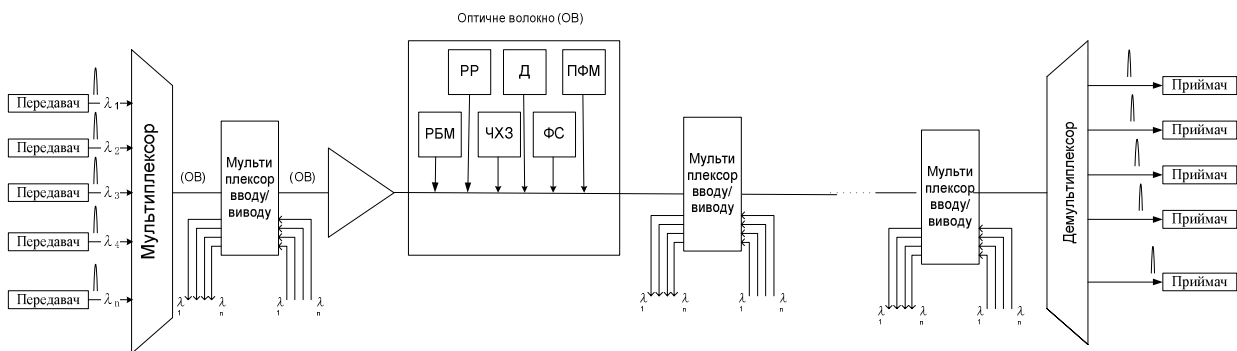


Рис. 2. Елементна структура еквівалентного оптичного тракту транспортної DWDM мережі (РР – вимушене комбінаційне розсіювання Рамана, Д – дисперсія, ПФС – перехресна фазова модуляція, РБМ – вимушене зворотне розсіювання Бріллюена–Мандельштама, ЧХЗ – чотиривхвильове змішування, ФС – фазова самомодуляція)

Кількість доданків $a_{k,i}$ у (5) визначає кількість елементів DWDM системи і кількість каналів DWDM системи. На рис. 2 подана еквівалентна схема DWDM системи з топологією точка-точка, з якої видно, що основними компонентами є: передавач, мультиплексор, підсилювач, мультиплексор вводу/виводу, демультіплексор, приймач, ОВ, а також атенуатори, фільтри, пристрої компенсації дисперсії. Описуються декілька шумових параметрів ОВ.

Архітектура модельованої DWDM мережі

На рис. 3 подано архітектуру модельованої DWDM мережі, котра складається з чотирьох кілець з різними способами об'єднання. У цій роботі розглядаються кільцеві топології транспортних DWDM мережі завдяки надійності, низькій вартості та поширеності. Для топології (див. рис. 3) необхідні двоволоконні кільця з однонапрямленим навантаженням. Одне волокно використовується для службового телефонного навантаження, а інше – для захисту (схема захисту 1+1). Мережа складається з трьох розподільних (або кілець доступу) кілець, сполучених з центральним кільцем через один вузол. Кожне кільце доступу, залежно від попиту, може зв'язати N користувачів (вузлів доступу), які можуть представляти, наприклад, малий бізнес, мережі комплексних будівель або постачальників Інтернет-послуг, інші мережі доступу. Важливою характеристикою цих кілець доступу є те, що вони пасивні – це означає, що вони не мають ніяких підсилювачів чи оптичних перемикачів, щоб забезпечити низьку потребу в обслуговуванні і високу економічність. Кільця доступу зв'язуються з головним кільцем, використовуючи мультиплектори вводу/виводу, котрі забезпечують здатність крос-комутації. Концентрація трафіку відбувається у

кожному вузлі. Забезпечується підтримка різних типів трафіку, таких, як Інтернет-протокол, асинхронний метод передавання, або ретрансляція кадрів над SONET/SDH і Ethernet.

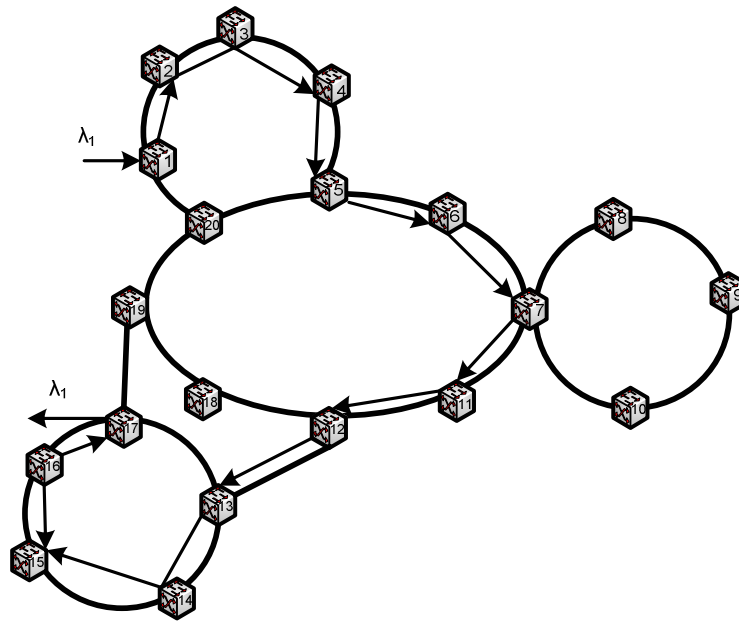


Рис. 3. Топологія дослідженої DWDM мережі

Для головного кільця, передбачається, що клієнтські послуги призначені для усієї оптичної довжини хвилі, навіть якщо попит не досягає STM-256 або STM-64. Доступ до вузлів забезпечують мультиплексори вводу/виводу. Мережа побудована на 40 каналах, і вони розділені на дві групи (С- і L-групи). Кожна група, крім того, розділена на дві/шість інших підгруп з індивідуальними довжинами хвиль, розміщених на відстані одна від одної 200 ГГц окремо і між групами є захисний інтервал. На цей захисний інтервал накладені обмеження технологій оптичних смугових фільтрів. Ідея об'єднання дуже важлива, оскільки вона уможливило ієрархічне мультиплексування каналів в кожному вузлі. Демультиплексування на кожному вузлі у багатьох випадках не є необхідним для кожної довжини хвилі і тому транзитний вузол є дуже ефективним економічним рішенням, що також приводить до зменшення затухання, яке вноситься в сигнал через тракт.

Оптичний мультиплексор забезпечує необхідну здатність мережі до комутації каналів. Елементи мультиплексорів подані, використовуюючи моделі “чорних скриньок” з певною формою шуму, перехресними завадами і характеристиками фільтра.

Ця робота пов'язана з топологічним питанням мережі: як ми можемо підтримувати велику мережу, ґрунтуючись на архітектурі кілець, і наскільки можна підвищити якість послуг на фізичному рівні. Протягом цього вивчення було встановлено три важливі мережеві параметри:

- 1) потужність в приймачі (залежить від каналу, початкової потужності і втрат);
- 2) OSNR в приймачі;
- 3) абсолютно некомпенсована довжина волокна в якнайгіршому тракті.

Взаємодія згаданих вище трьох параметрів може впливати на розмір мережі та якість послуг, яка може бути підтримана. Абсолютні втрати, які можуть підтримуватися на кожному кільці доступу, залежать від чутливості приймача, індивідуальних втрат у вузлі і втрати у волокні. Затухання вузла пропорційне до кількості каналів. Доступ до великої кількості хвиль дає змогу під'єднати велику кількість клієнтів. При об'єднанні великої кількості територіально розділених клієнтів стає критичною дисперсія волокна. Компенсація дисперсії використовується тільки у головному вузлі. Модулі компенсації дисперсії, кожен може з яких компенсувати 340 пс/нм км, нездатні компенсувати дисперсію поканально, це призводить до нахилу дисперсійної кривої в

межах плану каналів. В результаті, залежно від довжини кожного волоконного діапазону головного кільця, декілька каналів є надкомпенсовані, тоді як інші недокомпенсовані, викликаючи зміни Q-фактора системи. Q-штраф завдяки нелінійності, отриманій для нашої 40-канальної системи, враховує окремий компонент рівняння і становить приблизно 0.1 Дб. Відношення с/ш також залежить від кількості підсилювачів, які пройшов сигнал, і обмежує розміри головного кільця. Параметри модельованої мережі: оптичне волокно – LEAF (NZDSF), ширина смуги випромінювання лазера – 12.5 ГГц, потужність випромінювання на канал – 0 Дб, кількість каналів – 40, довжина прольоту – 60 км, затухання волокна – 0.28 Дб/км, швидкість передавання – 1 Гб, частота першого каналу – 196.1 ТГц, індекс модуляції – 0.045, шумовий параметр випромінювача (RIN) – -155 Дб, чутливість оптичного модуля – 0.95 А/Вт., тип підсилювача – EDFA, коефіцієнт підсилення підсилювача – 22 Дб, поляризаційно-модова дисперсія – 0.08 пс/нм·км, номінальна центральна частота першого каналу – 195.9375 ТГц (1530.04 нм.), міжканальний інтервал 12.5 ГГц.

Оптимізація транспортної DWDM мережі

Результати моделювання показали, що для маршруту H_{1-8}^1 гранична кількість каналів при заданих параметрах мережі дорівнює 24. Збільшення кількості каналів у системі зі спектральним ущільненням призводить до збільшення завад, що вносяться мультиплексором вводу/виводу, РР, ФСМ, ЧХЗ та перехресних завад. Вплив завад є значним, але не вирішальним в обмеженні кількості каналів і, як видно з рис. 4, а, найістотніше обмежують кількість каналів мультиплексори вводу/виводу. Залежність відношення $P_c/P_{ш}$ від швидкості передавання між вузлами 1-8 з маршрутом H_{1-8}^1 зображена на рис. 4, б. Гранична швидкість передавання для цієї топології 5,2 Гбіт/с. Основні обмежуючі фактори збільшення швидкості передавання – це дисперсія та перехресні завади (див. рис. 5, а). При збільшенні швидкості до 5 Гбіт/с на канал починають проявлятися перехресні завади, вплив яких при подальшому збільшенні швидкості передавання різко зростає. При швидкості передавання 4,8 Гбіт/с починає проявлятися негативний вплив дисперсії і при досягненні швидкості передавання в каналі 5,23 Гбіт/с коефіцієнт помилок в каналі становить 10^{-12} (див. рис. 5, б). Отже, основним обмежуючим фактором підвищення швидкості передавання у транспортній DWDM мережі є дисперсія ОВ.

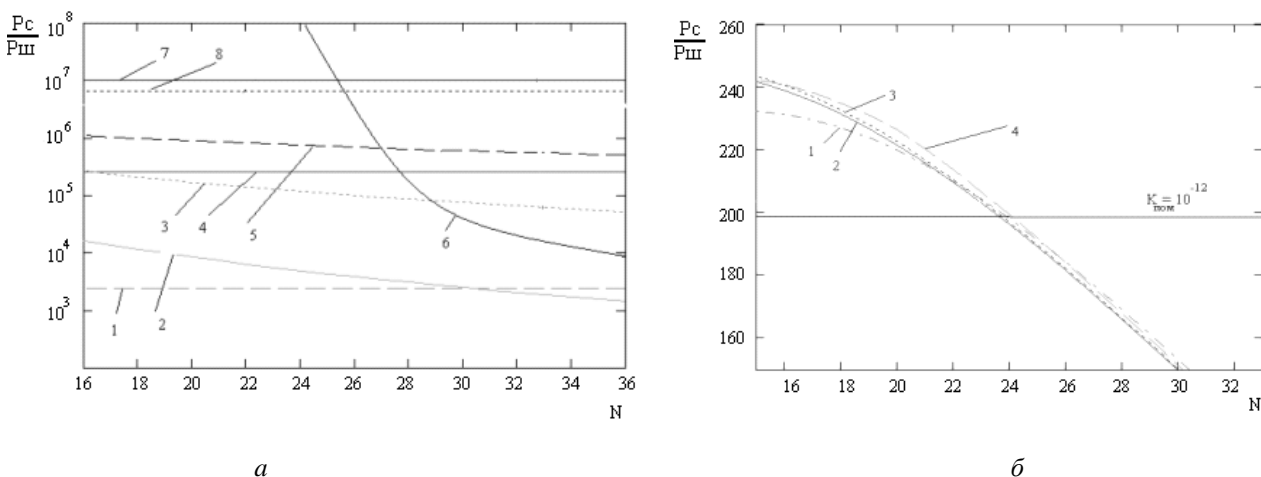


Рис. 4. Залежність відношення $P_c/P_{ш}$ від кількості частотних каналів:
 а – для кожного типу компонентів і нелінійних явищ в мережі:
 1) ФСМ; 2) мультиплексор вводу/виводу; 3) ЧХЗ; 4) передавач;
 5) ВКР; 6) ПФМ; 7) дисперсія; 8) приймач; б – для чотирьох каналів:
 1) 1-й канал (193,1 ТГц); 2) 10-й канал (193,225 ТГц);
 3) 20-й канал (193,350 ТГц); 4) 30-й канал (193,475 ТГц)

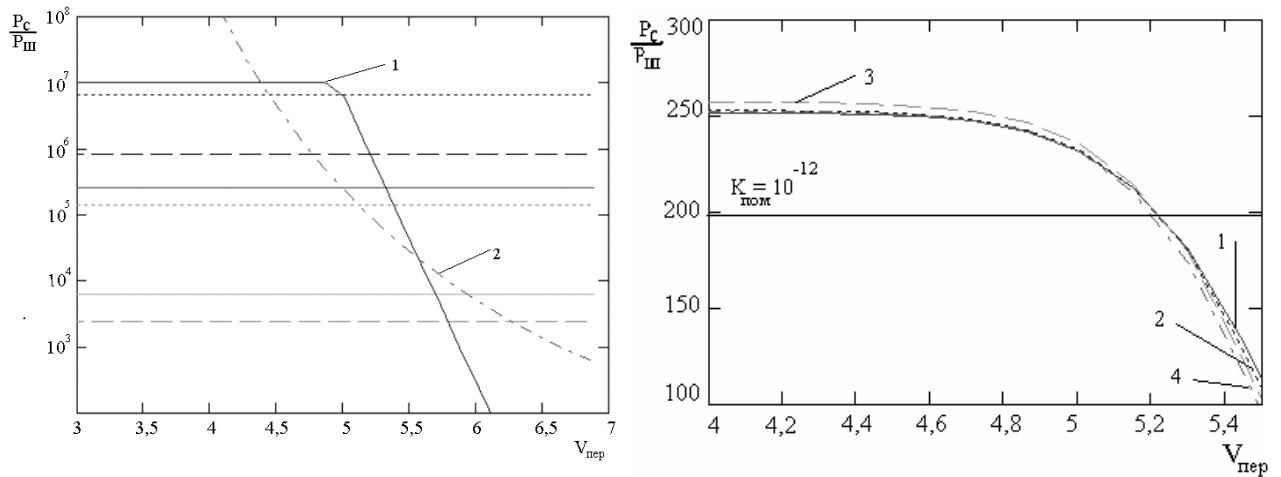


Рис. 5. Залежність відношення $P_c/P_{ш}$ від швидкості передавання в каналі:
 а – для кожного типу компонентів і нелінійних явищ в мережі:
 1) дисперсія, 2) перехресні завади; б – для чотирьох каналів:
 1) 1-й канал (193,1 ТГц), 2) 10-й канал (193,225 ТГц),
 3) 20-й канал (193,350 ТГц), 4) 30-й канал (193,475 ТГц)

Дослідження транспортної DWDM мережі показали, що максимальна кількість каналів, яку може забезпечити досліджувана мережа з відповідними параметрами (за найдовшим шляхом), дорівнює 24 каналам, максимальна швидкість, яку забезпечить ця транспортна мережа, дорівнює 5,23 Гбіт/с для кожного каналу. На рис. 5 зображено результати моделювання впливу кожного компонента та нелінійного явища мережі, структура якої подається на рис. 2, критичне значення відношення $P_c/P_{ш}$ в тракці зумовлює дисперсія,

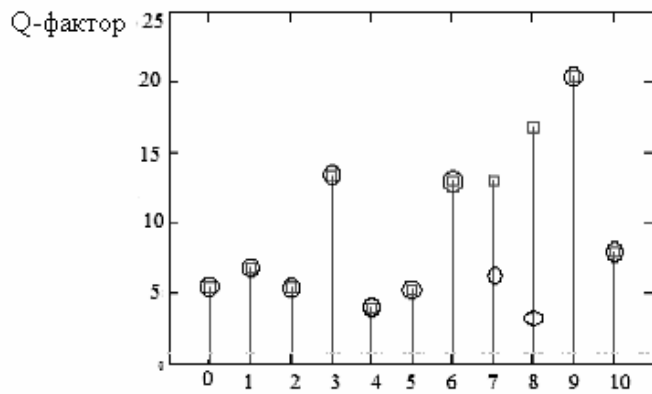


Рис. 6. Вплив компонентів DWDM мережі і нелінійних явищ на відношення $P_c/P_{ш}$ до (позначено \circ) і після (позначено \square) покращання параметрів компонентів при 20 каналах і швидкостях передавання, що дорівнюють 5,23 Гбіт/с
 (0 – оптичний передавач, 1 – фотодетектор; 2 – підсилювач EDFA;
 3 – ЧХЗ; 4 – ОМВВ; 5 – РМБ; 6 – РР; 7 – завади;
 8 – дисперсія; 9 – ФС; 10 – ПФС)

значний вплив на відношення $P_c/P_{ш}$ чинять мультиплексори вводу/виводу та оптичні підсилювачі. Оскільки основним обмежуючим фактором транспортної мережі є дисперсія, і вибраний робочий діапазон 1530 – 1540 нм транспортної DWDM мережі є короткохвильовим діапазоном частот згідно з G.694, то можливість змістити робочі канали до довжини хвилі нульової дисперсії відсутня.

Зменшення відношення $P_c/P_{ш}$ спостерігалось в каналах з меншою довжиною хвилі, таке зменшення пояснювалося впливом РР, перехресними завадами та ЧХЗ, проте при збільшенні швидкості до 5 Гбіт/с, найсильніше починає проявлятися зменшення Q – фактора внаслідок дисперсії, що найбільше проявилось в короткохвильових каналах (див рис. 5), при збільшенні швидкості передавання до 5,33 Гбіт/с Q – фактор став менший за пороговий рівень 16,5 дБ.

Врахувати компенсацію дисперсії у моделі можна, скорегувавши коефіцієнт, що відповідає за дисперсію. Сумарна дисперсія шляху $H_{1,8}^1$ дорівнює 959 пс. У головному кільці використовуються модулі, які компенсують 240 пс дисперсії. Після корекції параметрів мережі основним фактором, що обмежує швидкість передавання, є перехресні завади, а збільшення вимог до стабільності джерел випромінювання на 50 % (до $\Delta\nu = 8,75 \cdot 10^{14}$ Гц) дало змогу збільшити швидкість передавання до 8,9 Гбіт/с, результати зміни параметрів мережі подано на рис. 5. Для того, щоб підвищити $P_c/P_{ш}$ на виході на 1 дБ, необхідно зменшити коефіцієнт шуму кожного підсилювача на 1 дБ. На практиці типові значення коефіцієнта шуму становлять 3–10 дБ для підсилювачів типу EDFA, зменшити їх достатньо складно. Збільшення кількості проміжних підсилювачів також приводить до збільшення $P_c/P_{ш}$ на виході системи. Зменшення впливу нелінійних явищ та перехресних завад досягають оптимальною конфігурацією обладнання, взявши за основу запропоновану модель завад.

DWDM тракт в повністю оптичній мережі подамо у вигляді спрощеної схеми, яка складається з N оптичних підсилювачів з однаковими коефіцієнтами підсилення G . Підсилювачі розділені сегментами ОВ, кожний з яких вносить затухання в сигнал $1/G$. Таким самим сегментом відділений перший підсилювач від точки входу сигналу. Таке подання DWDM тракту не враховує ефект насичення підсилювачів, але забезпечує достатньо точний результат і дає змогу спростити систему рівнянь (3).

Оскільки x_1 – функція потужності на вході в оптичне волокно ($1/P_{вх}$), x_2 – функція потужності сигналу на вході ОВ ($1/P_{вих}$), а $P_{вих}/P_{вх}$ – це коефіцієнт підсилення підсилювача (G), і зробивши відповідну підстановку, отримаємо такий вираз:

$$\frac{P_{вх}}{(a_1 + a_2 + \dots + a_j) + 1/G \cdot (b_1 + b_2 + \dots + b_k)} = \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right). \quad (6)$$

З (11) випливає, що для збільшення $P_c/P_{ш}$ на виході необхідно підвищити вхідну потужність, але вхідна потужність у оптичне волокно обмежена впливом нелінійних явищ. Оптимальним рішенням було б якомога частіше розміщувати підсилювачі, відповідно зменшивши коефіцієнт підсилення, але це, як правило, знижує економічну ефективність транспортної системи.

Результати моделювання DWDM тракту оптичної транспортної мережі з різною елементною структурою

Кількість підсилювачів у прольоті	Коефіцієнт підсилення підсилювача, дБ	$P_c/P_{ш}$ на виході прольоту, дБ	Приріст відношення $P_c/P_{ш}$ в прольоті, дБ	Загальна кількість підсилювачів у тракці	$P_c/P_{ш}$ на виході шляху, дБ	Приріст відношення $P_c/P_{ш}$ в шляху, дБ
1	24	30,99	–	7	21,549	–
2	12	38,99	8	14	30,539	8,99
4	6	41,979	10,99	28	33,528	11,98
8	3	41,969	10,97	54	33,676	12,13

Інший спосіб зменшити $P_c/P_{ш}$ – це зменшення коефіцієнтів a_j і b_k , оскільки коефіцієнти a_j і b_k належать множині коефіцієнтів a_i ($a_j, b_k \in a_i$), a_i – є функцією параметрів i -го компонента або нелінійного явища і може бути виражена $a_i = f(\vec{\beta}_i)$, де $\vec{\beta}_i$ – вектор параметрів i -го компонента або нелінійного явища. Отже, для зменшення $P_c/P_{ш}$ на виході системи необхідно визначити параметри компонентів $\vec{\beta}_i$ так, щоб коефіцієнт a_i набував мінімальне значення.

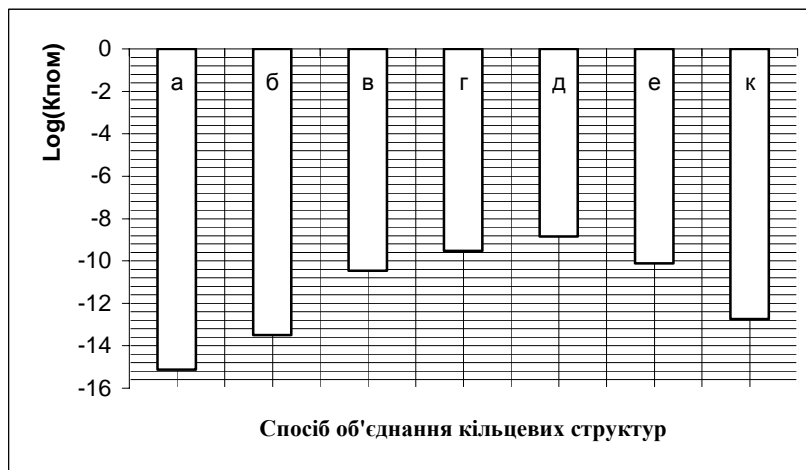


Рис. 7. Залежність коефіцієнта помилок від топології мережі:
 а – перетворення кілець, з'єднаних через два крос-конектори, в лінійну структуру;
 б – з'єднання кілець загальним ребром; в – з'єднання кілець в двох віддалених несуміжних вузлах;
 г – з'єднання кілець у багатьох вузлах; д – з'єднання кілець через виділену лінію;
 е – з'єднання кілець в одному вузлі; к – з'єднання кілець в дворівневу структуру

Незважаючи на те, що відстань між підсилювачами в лініях зв'язку на практиці неоднакова, відношення (б) дає змогу достатньо точно розрахувати зміну відношення P_o/P_{in} при зміні елементної структури мережі.

Здійснено дослідження завад в транспортній DWDM мережі з різними способами об'єднання кільцевих структур (див. рис. 7). Показано, що топологія “перетворення кілець, з'єднаних через два крос-конектори, в лінійну структуру” – має найменший коефіцієнт помилок, а топологія “з'єднання кілець через виділену оптичну лінію” – має найбільший коефіцієнт помилок.

Висновок

1. Нелінійні явища приводять до перекачування енергії з одних каналів у інші, збільшення додаткових гармонік внаслідок ЧХЗ ставлять вимогу до максимальної введеної потужності у волокно і тим самим обмежують максимальну кількість каналів у волокні, паразитна дисперсія обмежує швидкість передавання по волокну, а велика кількість вузлів, яку проходить сигнал, призводить до збільшення означених впливів у декілька разів.

2. Взнявши за основу для оптимізації конфігурації обладнання оптичних транспортних мереж якісні та структурні показники роботи з урахуванням обмеженої параметричної гнучкості реального обладнання, на основі цієї моделі можна побудувати ефективну систему моделювання та синтезу мережевих рішень.

3. Транспортна структура побудована на основі топології “перетворення кілець, з'єднаних через два крос-конектори, в лінійну структуру” – є найоптимальнішим рішенням з погляду коефіцієнта помилок мережевої системи, а використання для побудови транспортних платформ топології “з'єднання кілець через виділену оптичну лінію” внаслідок високого рівня завад є небажаним.

1. Чернихівський Є.М. Дослідження поляризаційної дисперсії і її вплив на пропускну здатність та структуру оптичних транспортних мереж. Дис. ... на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук. – Львів, 2006. 2. Однорог П.М. Омеїнська О.Б. Михайленко Є.В. / Під ред. В.Б. Катка WDM. – К., 2005. 3. A. A. M. Saleh and J. M. Simmons, Architectural principles of optical regional and metropolitan access networks, *J. Lightwave Technol.*, vol. 17, P. 2431–2448, Dec. 1999. 4. I. M. White, D. Wonglumsom, K. Shrikhande, S. M. Gemelos, M. S. Rogge, and L. G. Kazovsky, The architecture of HORNET: A packet-over-WDM multiple-access optical metropolitan area ring network, *Comput. Networks*, vol. 32, pp. 587–598, Sept. 2000 5. 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.