

Бібліотека експериментів (рисунок) ПМК передбачає можливість зберігати вхідні дані у вигляді текстових файлів для проведення типових експериментів. Формувати дані для текстових файлів можна як за допомогою ПМК, так і за допомогою будь-якого текстового редактора. Зберігання параметрів експериментів в бібліотеці дає змогу без зайвих труднощів повторити цікаві експерименти декілька разів.

ПМК реалізований на мові C++ для операційних систем MS DOS та Windows і доповнений методичними вказівками для проведення лабораторних досліджень алгоритмів керування АТС.

1. Бусленко В.Н. Автоматизация имитационного моделирования сложных систем. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1977. 2. Кнут Д. Искусство программирования для ЭВМ. – Т.2: Получисленные алгоритмы / Пер. с англ. – М.: Мир. – 1977. 3. Артемьев М.Ю., Самоделов В.П. Программное обеспечение управляющих систем электросвязи: Учебник для техникумов. – М.: Радио и связь, 1990. 4. Управляющие системы электросвязи и их программное обеспечение: Учебник для вузов / Р.А. Игнатьев, А.Г. Попова, Н.С. Чагаев. – М.: Радио и связь, 1991.

УДК 621.372

М.М. Климаш, В.І. Романчук

Національний університет “Львівська політехніка”,
кафедра телекомунікації

МАТРИЧНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ ОПТИЧНИХ ТРАНСПОРТНИХ МЕРЕЖ ЗІ СПЕКТРАЛЬНИМ УЩІЛЬНЕННЯМ КАНАЛІВ

© Климаш М.М., Романчук В.І., 2007

Запропоновано матричний метод аналізу оптичних мереж зі спектральним ущільненням каналів (WDM/DWDM), який дає змогу оцінити вплив перехресних міжканальних завад, нелінійних адитивних завад та власних завад у мультихвильовій оптичній мережі (MONET).

In this work the matrix method of analysis optical networks is offered with a wavelength division multiplexing , which allows to estimate influencing of crosstalk, nonlinear crosstalk in Multiwavelength Optical Networks.

Вступ. Для вирішення проблеми підвищення швидкості передавання використовуються нові технології, зокрема технологія мультиплексування за довжиною хвилі (WDM – Wavelength Division Multiplexing) та щільного мультиплексування за довжиною хвилі (DWDM – Dense Wavelength Division Multiplexing), для якої створено оптичне волокно з ненулевою дисперсією в робочій смузі довжин хвиль (Рекомендація Міжнародного Союзу Електрозв’язку G655).

Існуючі системи передавання працюють зі швидкостями 40 Гбіт/с і вище на одній довжині хвилі [1]. На таких швидкостях істотною стає проблема дисперсії сигналів, нелінійних ефектів, перехресних завад, шумів, в лінійному тракці ВОЛЗ. Особливо це відчутно в третьому вікні прозорості (1,55 мкм), тому що довжини регенераційних або підсилювальних ділянок при цьому становлять близько 100 кілометрів. Діапазон довжини робочих хвиль в околі 1,55 мкм має переваги порівняно з іншими діапазонами завдяки низькому загасанню та існуванню підсилювачів на волокнах, легованих ербієм (EFDA), які працюють саме в цьому діапазоні. При використанні EFDA відбувається підсилення сигналу без корегування його форми.

Використання систем DWDM на існуючих ВОЛЗ забезпечує значну економію коштів порівняно з прокладкою нових ВОЛЗ. В Україні вже введено в експлуатацію магістральні DWDM, побудовані за кільцевою типологією [2]. Оскільки мережі DWDM складаються з великої кількості компонентів, які працюють як одне ціле. Переконавшись в їх правильній роботі на старих ОВ доволі складне завдання, оскільки здебільшого спрогнозувати роботу системи є неможливо, враховуючи характеристики кожного компонента, для цього необхідно проводити дослідження системи загалом.

Матричний метод аналізу оптичної мережі. Основним системним параметром, що характеризує якісні характеристики системи з цифровим методом передачі, є коефіцієнт помилок $K_{\text{пом}}$ (BER – Bit Error Rate) або імовірності помилки $P_{\text{пом}}$, що виникають в процесі передачі деякої кількості повідомлень (біт інформації). Імовірність помилок можна інтерпретувати як функцію від сигнал/шум (с/ш), тобто $P_{\text{пом}}=f(\text{с/ш})$. Для двійкових цифрових каналів такою функцією є функція Крампа, що протабульована та широко використовується в інженерних розрахунках. Отже, розрахунок $P_{\text{пом}}$ еквівалентний розрахунку с/ш, а це, своєю чергою, реалізується за допомогою аналізу загальних шумів каналу системи, до складу яких включаються перехресні завади, шуми апаратури волокна тощо.

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

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

де Q – “Q-фактор” системи.

“Q- фактор” – це системний параметр, що визначається статистичними закономірностями на приймальному кінці системи під час прийняття рішень щодо рівня сигналу у кожен момент часу. Ці закономірності враховують усі шуми системи. Своєю чергою, існує аналітичний запис для знаходження величини Q-фактора:

$$Q = f\left(\frac{C}{\text{Ш}}\right) = \frac{2 \cdot \frac{P_c}{P_u} \cdot (\Delta\nu)^{-0.5}}{1 + \left(1 + 4 \cdot \frac{P_c}{P_u}\right)^{-0.5}}, \quad (2)$$

де P_c – потужність сигналу; P_u – потужність шуму; $\Delta\nu$ – ширина смуги випромінювання лазера.

Отже, для визначення коефіцієнта помилок $K_{\text{пом}}$ оптичної системи передачі даних необхідно визначити відношення с/ш (OSNR – Optical Signal-to-Noise Ratio) на виході системи (рис. 1)

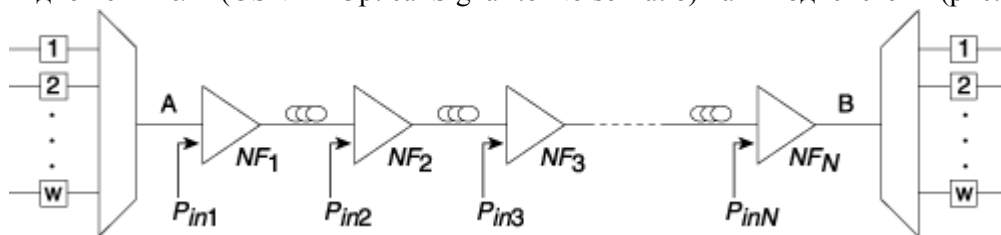


Рис. 1. DWDM-система з топологією точка-точка: P_{in} – потужність вхідного сигналу; NF – шум-фактор

Сумарний с/ш ($OSNR_{\Sigma}$) системи можна виразити так [3]:

$$\frac{1}{OSNR_{\Sigma}} = \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \dots + \frac{1}{OSNR_n}, \quad (3)$$

де $OSNR_n$ – с/ш компонентів DWDM системи і виражаються за формулою [3]

$$OSNR = \frac{P_{in}}{P_{ASE}}. \quad (4)$$

Отже, проаналізувавши вираз (3), систему зі спектральним ущільненням каналів можна подати лінійним рівнянням

$$a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + a_3 \cdot x_3 \cdots a_i \cdot x_i = \frac{1}{OSNR}, \quad (5)$$

де a_i – власні шуми i -го компонента системи; x_i – обернена величина потужності сигналу на вході в i -й компонент системи.

Оскільки коефіцієнт a_i характеризує власні завади i -го компонента, то a_i є функцією параметрів i -го компонента і може бути виражена: $a_i = f(\vec{\beta}_i)$, де $\vec{\beta}_i$ – вектор параметрів i -го компонента. Для подання j каналів системи зі спектральним ущільненням необхідно записати систему рівнянь:

$$\begin{cases} a_{1,1} \cdot x_1 + a_{2,1} \cdot x_2 + a_{3,1} \cdot x_3 \cdots a_{i,j} \cdot x_i = 1/OSNR_1 \\ a_{1,2} \cdot x_1 + a_{2,2} \cdot x_2 + a_{3,2} \cdot x_3 \cdots a_{i,j} \cdot x_i = 1/OSNR_2 \\ a_{1,3} \cdot x_1 + a_{2,3} \cdot x_2 + a_{3,3} \cdot x_3 \cdots a_{i,j} \cdot x_i = 1/OSNR_3 \cdot \\ \dots \\ a_{i,j} \cdot x_1 + a_{i,j} \cdot x_2 + a_{i,j} \cdot x_3 \cdots a_{i,j} \cdot x_i = 1/OSNR_n \end{cases} \quad (6)$$

Для визначення потужності вхідних сигналів на різних довжинах хвиль для кожного компонента системи можна використати матричний метод. На основі аналізу транспортної оптичної мережі зі спектральним ущільненням каналів можна задати матрицю A :

$$A = \begin{bmatrix} a_{1,1} + a_{2,1} + a_{3,1} \cdots a_{i,j} \\ a_{1,2} + a_{2,2} + a_{3,2} \cdots a_{i,j} \\ a_{1,3} + a_{2,3} + a_{3,3} \cdots a_{i,j} \\ \dots \\ a_{i,j} + a_{i,j} + a_{i,j} \cdots a_{i,j} \end{bmatrix}, \quad (7)$$

де $a_{j,i}$ – елемент матриці, що характеризує власні завади i -го компонента на j -му каналі.

Для визначення елементів $a_{j,i}$ матриці A необхідно проаналізувати роботу кожного компонента в системі і нелінійних ефектів у ОБ, і визначити аналітично їх вплив на OSNR. В таблиці наведено визначені коефіцієнти для деяких компонентів.

Розрахунок коефіцієнтів $a_{n,i}$ системи рівнянь

1	Передавач	
1	2	
$a_{1,i} = \frac{R_0^2 \cdot \Pi \cdot R}{U_{\text{эфф}}^2 \cdot K^2 \cdot E^2}$	$U_{\text{эфф}}$ – середньоквадратичне (ефективне) вхідне модульованої напруги R_0 – вхідний опір K – коефіцієнт узгодження $P_{\text{опт}}$ – вихідна оптична потужність E – лазерна крутизна R – відносна інтенсивність шуму RIN (Relative Intensity Noise)	
$x_1 = P_{\text{онм}}^2$		
2	Приймач	
$a_{2,i} = \frac{4 \cdot \Pi \cdot q}{m^2 \cdot S}$	ΔF – ширина смуги приймача m – індекс оптичної модуляції (OMI – Optical Modulation Index) $P_{\text{вх}}$ – потужність на вході в фотодетектор I_n – еквівалентний шумовий тепловий струм підсилювача S – чутливість оптичного модуля	
$x_2 = \frac{1}{P_{\text{вх}}}$		

1	2	
3	Підсилювач EDFA	
$a_{3,i} = h \cdot \lambda \cdot \Delta F \cdot (2 \cdot N_{amp} \cdot n_{sp} \cdot (G - 1) + 1),$ $x_3 = \frac{1}{P_{BX}}$	h – стала Планка λ – довжина хвилі ΔF – ширина спектра оптичного фільтра N _{amp} – кількість підсилювачів NF – шум-фактор G – коефіцієнт підсилення підсилювача N _{sp} – коефіцієнт спонтанної емісії	
4	Підсилювач Рамана	
$a = \frac{h \cdot \nu \cdot \Delta F \cdot N_{GA}}{G_{RA}} \quad x = \frac{1}{P_{in}}$	G _{RA} – коефіцієнт підсилення підсилювача N _{RA} – коефіцієнт шуму	
5	Мультиплексор вводу/виводу	
$a = X_{gate} \cdot \sum_{k=1}^M P_{in,k} \quad x = \frac{1}{P_{in}}$	X _{gate} – коефіцієнт міжканальних завад M – кількість каналів в тракці P _{in,k} – вхідна потужність на частоті k (k = [1,M]) i – номер каналу (i≠k)	
6	Чотирехвильове змішування (ЧХЗ)	
$a = n_{i,j,k} \cdot \left(\frac{2 \cdot \pi \cdot f_{i,j,k} \cdot d_{i,j,k} \cdot L}{3 \cdot c \cdot S_c} \right)^2 \cdot P_i \cdot P_j \cdot P_k \cdot e^{-\alpha L}$ $x = \frac{1}{P_{in_i,j,k}}$	n _{ijk} – коефіцієнт ефективності ЧХЗ α – загасання волокна d _{ijk} – коефіцієнт виродження ЧХЗ k _n – коефіцієнт нелінійності показника заломлення	
7	Вимушене комбінаційне розсіювання Рамана (ВКР)	
$a_j = \sum_{i=1}^{N-j} \frac{f_j \cdot P_i \cdot g_i \cdot L_{eff}}{f_i \cdot A_{eff}}$ $x = \frac{1}{P_{in,j}}$	i – номер каналу f _j – частота j-го каналу f ₀ – частота i-го каналу N – кількість каналів в тракці P _i – вхідна потужність в i-й канал L _{eff} – ефективна довжина волокна A _{eff} – ефективна площа серцевини g – раманівський коефіцієнт зв'язку i-го каналу з 0-м каналом	
8	Перехресні завади	
$S_n = \int_{f_n - \frac{\Delta f}{2}}^{f_n + \frac{\Delta f}{2}} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x - f_n + \Delta \sigma_n)^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx$ $Z_n = \int_{f_n - \frac{\Delta f}{2}}^{f_n} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x - f_{n-1} + \Delta \sigma_{n-1})^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx + \int_{f_n}^{f_n + \frac{\Delta f}{2}} \frac{1}{\sigma \cdot \sqrt{2 \cdot \pi}} \cdot e^{-\frac{(x - f_{n+1} + \Delta \sigma_{n+1})^2}{2 \cdot \sigma^2}} dx$ $\Delta \sigma = \frac{\Delta f \cdot random(1) \cdot R}{k * t_r}$	f _n – несуча частота n-го каналу; σ – подвійна швидкість передачі (σ=2·B) Δσ _n – нестабільність n-го джерела Δf – міжканальний інтервал random(1) – функція випадкових чисел, розподілених за нормальним законом розподілу, що належать інтервалу (0,1) R – рік експлуатації лазера t _r – максимальний термін експлуатації k – нормувальний коефіцієнт.	

Після визначення матриці A необхідно ініціалізувати матрицю-стовпець OSNR (8). Матрицю OSNR можна визначити, знаючи необхідний рівень K_{пом} з формул (1),(2).

$$OSNR = \begin{bmatrix} OSNR_1 \\ OSNR_2 \\ OSNR_3 \\ \dots \\ OSNR_j \end{bmatrix}, \quad (8)$$

де $OSNR_j$ – величина, що дорівнює $1/(с/ш)$ на вході у фотоприймач для p -каналу.

Внаслідок перемноження матриць A^{-1} і $OSNR$ (8) отримаємо матрицю-стовпець X (9), яка складатиметься з набору потужностей x_j (де j – номер ефекту). Мінімальний елемент матриці x_j означатиме максимальну потужність, яку можна ввести у волокно для j -го каналу, щоб відношення сигнал/шум не перевищувало задане ($OSNR_j$):

$$X = A^{-1} \cdot OSNR. \quad (9)$$

Після визначення матриці X необхідно проаналізувати елементи матриці X за критерієм максимуму $\max(x_1, x_2, \dots, x_n)$. Індекс мінімального елемента вказуватиме на компонент, який найбільше впливає на погіршення відношення $с/ш$ в DWDM-тракті:

$$X = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ \dots \\ x_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

Визначивши компонент (x_i), який найбільше погіршує відношення сигнал/шум в каналі, необхідно проаналізувати коефіцієнт $a_{i,j}$, який визначає залежність показників якості системи від параметрів $\vec{\beta}_j$. Задача визначення ефекту, який найбільше впливає на відношення $с/ш$ на виході системи зі спектральним ущільненням каналів зводиться до визначення коефіцієнтів $a_{j,i}$ матриці A за заданого вектора параметрів $\vec{\beta}_n$. А задача оптимізації DWDM-тракту зводиться до оптимізації параметрів вектора $\vec{\beta}_n$. У цьому випадку доцільно використовувати багатокритеріальну оптимізацію DWDM-тракту.

Моделювання та дослідження мультихвильової оптичної мережі. Моделювання мультихвильової оптичної мережі (MONET – Multiwavelength Optical Networks) відбувається у три етапи. На першому етапі необхідно визначити оптичний шлях між вузлами, що передають дані, як це показано на рис. 2. Це будуть вузли 1 і 5 [4].

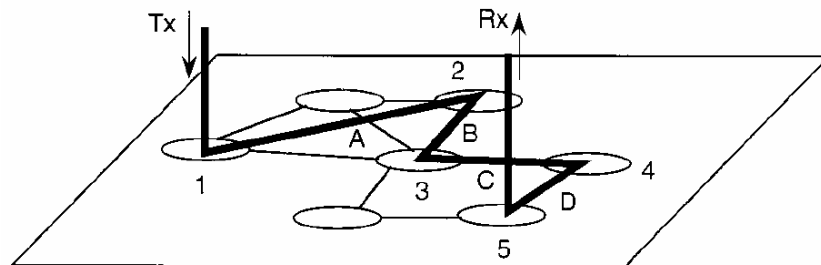


Рис. 2. Типологія мультихвильової оптичної мережі (MONET)

На другому етапі необхідно визначити еквівалентну схему оптичного каналу передачі даних між заданою парою вузлів (рис. 3). У цьому випадку немає значення, яким методом вибраний шлях, основне значення для моделі мають вузли та відстані та компоненти між цими вузлами. Для

простоти моделювання вважаємо відстані між підсилювачами в мережі однаковими і обладнання компонентів мережі однотипним.

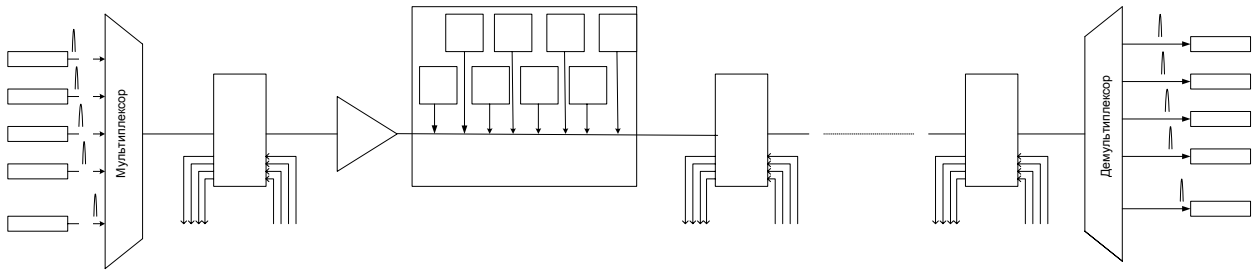


Рис. 3. Еквівалентна схема оптичного каналу

Третій етап моделювання складається з формування матриці (6) для оптичного каналу, отже, отримаємо систему лінійних рівнянь, яка описує оптичний канал мультихвильової оптичної мережі. Для цього необхідно визначити елементи матриці (a_{ij}).

Для проведення моделювання було вибрано тестову мережу (рис. 2) з такими параметрами: джерело сигналу лазер (EFL) з шириною смуги випромінення 0,1 нм, потужність джерела випромінення 10 мВт на канал, згасання волокна 0,2 дБ/км, довжина секцій 30 км, кількість каналів 40. Отже, для оптичного каналу (рис. 3) система рівнянь (6) матиме такий вигляд:

$$\begin{cases} 3.36 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 & 4.16 \cdot 10^{-9} \cdot x_2 & 20 \cdot 4.873 \cdot 10^{-6} \cdot x_3 & 22 \cdot 1.029 \cdot 10^{-4} \cdot x_4 & 4 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot x_5 & 2 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot x_6 & 20 \cdot 4.268 \cdot 10^{-6} \cdot x_7 & = & 0.0404 \\ 3.36 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 & 4.16 \cdot 10^{-9} \cdot x_2 & 20 \cdot 4.874 \cdot 10^{-6} \cdot x_3 & 22 \cdot 1.029 \cdot 10^{-4} \cdot x_4 & 4 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot x & 2 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot x_6 & 20 \cdot 4.115 \cdot 10^{-6} \cdot x_7 & = & 0.0404 \\ 3.36 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 & 4.16 \cdot 10^{-9} \cdot x_2 & 20 \cdot 4.876 \cdot 10^{-6} \cdot x_3 & 22 \cdot 1.03 \cdot 10^{-4} \cdot x_4 & 4 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot x & 2 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot x_6 & 20 \cdot 4.017 \cdot 10^{-6} \cdot x_7 & = & 0.0404 \\ 3.36 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 & 4.16 \cdot 10^{-9} \cdot x_2 & 20 \cdot 4.878 \cdot 10^{-6} \cdot x_3 & 22 \cdot 1.03 \cdot 10^{-4} \cdot x_4 & 4 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot x & 2 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot x_6 & 20 \cdot 4.884 \cdot 10^{-6} \cdot x_7 & = & 0.0404 \\ 3.36 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 & 4.16 \cdot 10^{-9} \cdot x_2 & 20 \cdot 4.88 \cdot 10^{-6} \cdot x_3 & 22 \cdot 1.031 \cdot 10^{-4} \cdot x_4 & 4 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot x & 2 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot x_6 & 20 \cdot 4.771 \cdot 10^{-6} \cdot x_7 & = & 0.0404 \\ 3.36 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 & 4.16 \cdot 10^{-9} \cdot x_2 & 20 \cdot 4.882 \cdot 10^{-6} \cdot x_3 & 22 \cdot 1.031 \cdot 10^{-4} \cdot x_4 & 4 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot x & 2 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot x_6 & 20 \cdot 4.686 \cdot 10^{-6} \cdot x_7 & = & 0.0404 \\ 3.36 \cdot 10^{-8} \cdot x_1 & 4.16 \cdot 10^{-9} \cdot x_2 & 20 \cdot 4.885 \cdot 10^{-6} \cdot x_3 & 22 \cdot 1.032 \cdot 10^{-4} \cdot x_4 & 4 \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot x & 2 \cdot 4 \cdot 10^{-5} \cdot x_6 & 20 \cdot 4.634 \cdot 10^{-6} \cdot x_7 & = & 0.0404 \end{cases} \quad (11)$$

Елемент системи складається з коефіцієнта та x_i . Коефіцієнт, своєю чергою, складається з двох добутоків. Перший – кількість таких елементів в оптичному каналі, другий – власні завади компонента.

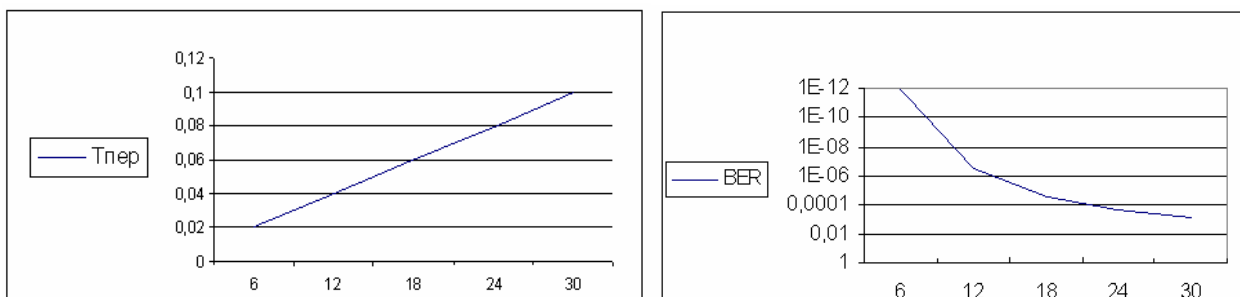


Рис. 4. Залежність точки перетину рівнянь системи та її еквівалентна BER від кількості вузлів в мережі

Оскільки кожне рівняння системи (11) характеризує оптичний канал на іншій довжині хвилі, а x_i – характеризує параметри компонентів оптичного каналу, то можна знайти спільні властивості компонентів оптичного каналу. Якщо система рівнянь має розв’язок, то існує єдина точка перетину рівнянь системи ($T_{пер}$), яка характеризує систему загалом та пов’язана з показником якості системи (OSNR) таким виразом $OSNR=1/T_{пер}$. На рис. 4, а показано залежність $T_{пер}$ від кількості вузлів в мережі. Залежність показує, що сигнал накопичує шум внаслідок проходження по оптичному

каналу без 3G-регенераторів. Отже, існує залежність між BER та кількістю вузлів в оптичному каналі та мультимовильовій оптичній мережі (рис. 4, б). Отже, MONET обмежена кількістю вузлів в мережі і ця межа залежатиме від характеристик оптичних компонентів, а саме – їх параметрів β_i .

Цей підхід дає змогу істотно зменшити час моделювання, оскільки замість моделювання усієї мережі моделюється еквівалентний оптичний канал.

Висновок. У роботі запропоновано модель та матричний метод аналізу оптичних мереж зі спектральним ущільненням каналів, яка уможливує оцінити BER модельованої мережі, а також оцінити можливість збільшення кількості вузлів в мережі і їх вплив на BER. Наведено результати моделювання завад та шумів тестової мультимовильової оптичної мережі, показано залежність BER від кількості вузлів в мережі.

1. Чернихівський Є.М. Дослідження поляризаційної дисперсії і її вплив на пропускну здатність та структуру оптичних транспортних мереж: Дисертація на здобуття наукового ступеня к. т. н. – Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”. 2006. 2. Однорог П.М., Михайленко Є.В., Омецінська О.Б. “WDM”. – К., 2005. 3. Tony Antony, Ashwin Gumaste “DWDM Network Designs and Engineering Solutions” Cisco Press, Feb 7, 2003. 4. Ioannis Roudas, Neophytos Antoniadis, Dwight H. Richards, Richard E. Wagner, Janet Lehr Jackel, Senior, Sarry F. Habiby, Thomas E. Stern, Aly F. Elrefaie “Wavelength-Domain Simulation of Multiwavelength Optical Networks” IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, VOL. 6, NO. 2, MARCH/APRIL 2000.