

**АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ В ПОВНІСТЮ
ОПТИЧНІЙ МЕРЕЖІ З КОМУТАЦІЄЮ ЗА ДОВЖИНАМИ ХВИЛЬ**

© Красько О.В., Демидов І.В., Брич М.В., 2014

Наведено результати розрахунків OSNR, основані на отриманій аналітичній моделі для частини повністю оптичної мережі, а також надано рекомендації для розробників оптичних мереж.

Ключові слова: повністю оптична мережа, комутація за довжинами хвиль, оптичне відношення сигнал/шум, оптичні підсилювачі, оптична крос-комутація, якість передавання оптичного сигналу, фізичний рівень, структура оптичної мережі, оптичний штраф потужності.

O.V. Krasko, I.V. Demydov, M.V. Brych
Lviv Polytechnic National University

**ANALYSIS OF OPTICAL SIGNAL PARAMETERS
AT ALL OPTICAL NET WITH WAVELENGTH SWITCHING**

© Krasko O.V., Demydov I.V., Brych M.V., 2014

This paper is devoted to the analysis of optical signal to noise ratio (OSNR) for all optical networks (AON) with wavelength switching at the cascade switching of optical amplifiers and optical cross connectors, including modelling of transient interferences in optical cross connectors, due to the impact of which there is an additional communication lines' power penalty appears. In order to create economically profitable all optical net or to increase the throughput capacity of existent one considering its high performance, it is necessary to review such architectural and wavelength routing factors as network's physical layers restrictions. Available publications omitted any effective solutions of the wavelength routing task on the criterion of the structural cost and BER minimization in the respective optical wavelength path. Despite it, while designing (logically or physically) an optical network with wavelength switching in the most optimal way, we need to be sure that physical technology of the network will grant us with the acceptable level of negative impact from network elements' physical parameters. That's why the investigation of the AON physical layer impact by means of OSNR analysis in the optical channels with wavelength switching at the real transmission parameters is the scope of this work. It is shown, that optical signal probably should pass the set of optical cross connectors (OXC), distributed optical amplifiers and interconnected optical fibers that definitely will worsen the quality of the signal. This is due to the decrease in signal power within optical fiber attenuation, crosstalks in OXC and summing the useful signal with noise of Amplified Spontaneous Emission (ASE) in optical amplifiers. This article contains the result of OSNR calculation after the AON section analytical simulation and recommendations for network designers were presented. Resulted analytical expressions allow making justified choice of the AON with wavelength switching structure based on a given set of input parameters and optimize this structure on the criterion of maximum OSNR values on the corresponding wave transmission paths. It is also shown that FEC technology according to G.709/Y.1331 is applicable when we need to make our AON structure more scalable in the spatial dimension and more powerful when more sophisticated switching core needed to be realized. We could also conclude that worsening of OSNR value is

under strong impact of the number of optical amplifiers used, and in the less scale under impact of the OXC number.

Key words: all optical network, wavelength switching, OSNR, optical amplifiers, optical cross-connect, transmission quality of optical signal, physical layer, structure of optical net, optical power penalty.

Вступ. Транспортні мережі наступного покоління будуть широко використовувати архітектуру оптичної мережі з маршрутизацією за довжинами хвиль [1, 2]. Зазначимо, що сьогодні сучасні оптичні транспортні мережі є дорогими та складними технічними комплексами. Проте застосування мереж, що працюють на основі оптичної комутації з маршрутизацією за довжинами хвиль, має декілька привабливих особливостей:

1. Масштабованість, тобто здатність швидко забезпечити збільшення навантаження. Високощільне мультиплексування з розділенням за довжинами хвиль (Dense Wavelength Division Multiplexing – DWDM) [2] надає можливість збільшення трафіку за рахунок одночасного використання декількох довжин хвиль у тому самому волокні.

2. Просторове багаторазове використання довжин хвиль. Несівні оптичні хвилі можуть бути повторно використані на різних ділянках мережі між відповідними оптичними крос-комутаторами.

3. Прозорість послуг (служб). Мережеве обладнання не аналізує зміст клієнтського сигналу, що знижує вартість організації мережі. Весь трафік передається за допомогою оптичних мережевих елементів: транспондерів, перебудовуваних оптичних мультиплексорів введення-виведення, крос-комутаторів, а процес введення / виведення трафіку здійснюється тільки в маршрутизаторах IP/ATM/Ethernet/T-MPLS [1]. При цьому можемо говорити про мультипротоколову комутацію, що виявляється у частині незалежності отриманих мережевих рішень від тих способів передавання даних, які вибрали користувачі мережі.

4. Безпечна і надійна інфраструктура. Мережа не залежить від формату сигналу, швидкості, розміру пакета тощо, відповідно, може формуватися (логічно) у будь-якій конфігурації і може підтримувати будь-який протокол.

5. Живучість мережі. Захист довжини хвилі комутаційними можливостями підвищує надійність мережі.

Проте реалізація оптичної транспортної мережі насправді є дуже складним завданням. Необхідна підтримка різноманітних клієнтських потоків, причому з одночасно змінюваними вимогами, що зростають, такими як гарантована якість обслуговування (Quality of Service - QoS), гнучкість, масштабованість і живучість, пов'язаними зі швидкістю передавання даних і незалежністю протоколу.

Для того, щоб економічно вигідно створити нову оптичну мережу або збільшити пропускну здатність діючої мережі з урахуванням її високої продуктивності, необхідно врахувати такі фактори у виборі її архітектури та оптимізації маршрутизації довжин хвиль, як обмеження на параметри основних фізичних рівнів. Доступні методи оптимізації маршрутизації для таких мереж описано в [4–12], а за їх допомогою створюються інші методи, що забезпечують оптимізацію вартості мережі різними критеріями. Однак усі відомі публікації не містять розв'язання задачі оптимізації маршрутів оптичних каналів за критерієм мінімізації вартості мережі із заданою вірогідністю помилки. Але під час проектування оптичної мережі з маршрутизацією довжин хвиль найоптимальнішим способом необхідно врахувати фізичну технологію мережі та негативний вплив фізичних параметрів мережевих елементів. Проектувальникові потрібні не лише відомості для оптимального конструювання маршруту, але й дані про обмеження за маршрутами, яким надаватиметься особливе значення. Це робить будь-який мережевий проект на основі оптичних технологій перспективнішим.

В оптичній мережі зі статичною маршрутизацією довжин хвиль необхідний трафік задається як встановлений набір логічних з'єднань між парами вузлів доступу. Набір сполучень визначає логічну топологію. Ці сполучення, як передбачається, залишаються незмінними протягом порівняно тривалого періоду часу. Відомі спроби оптимізувати шляхи, якими вони будуть

маршрутизуватися при накладенні на фізичну топологію, навіть якщо така оптимізація потребує значних обчислень. Проте у деяких наведених публікаціях з оптимізації маршрутизації оптичної мережі зі статичною маршрутизацією довжин хвиль ігнорується спотворення сигналу. Публікації про аналіз переданого сигналу в оптичній мережі з маршрутизацією довжин хвиль дуже обмежені [13–15]. Вони стосуються алгоритмів, основаних на концепції хвильового шляху (Wavelength Path – WP) [13], віртуального хвильового шляху (Virtual Wavelength Path – VWP) [14–15], частково віртуального хвильового шляху (Partial Virtual Wavelength Path-PVWP) [16]. В алгоритмі WP фіксована довжина хвилі призначається (задається) для кожного оптичного шляху, і вона ніколи не змінюється на всьому його маршруті в мережі. У VWP довжина хвилі призначається (задається) від лінії зв'язку до лінії зв'язку для кожного шляху так, щоб довжина хвилі шляху могла бути змінена кросуванням в кожному оптичному крос-комутаторі. В алгоритмі PVWP в ОХС задається тільки обмежена кількість конверсій, тобто ОХС містить обмежену кількість перетворювачів.

Хоча у наведених працях параметри передавання оптичних сигналів і проаналізовано та порівняно для різних алгоритмів маршрутизації, таких як WP, VWP, PVWP і різних рівнів передавання, мета оптимізації маршрутизації – та сама мінімізація максимального завантаження лінії зв'язку. Це означає, що маршрути шляхів для всіх випадків – ті самі, а відмінність – це перетворення довжини хвилі або його відсутність, а також швидкість передавання даних кожного каналу, що порушує семантичну прозорість мережі. Інші ж подібні публікації взагалі оперують поняттям ідеальної мережі.

Тому дослідження впливу фізичного рівня повністю оптичної мережі за допомогою аналізу оптичного відношення сигнал / шум (надалі – OSNR) у каналах мережі з маршрутизацією довжин хвиль за реальних параметрів передавання і є метою цієї роботи.

Модель оптичної мережі з маршрутизацією за довжинами хвиль. У цифрових системах передавання одним з основних параметрів для оцінки якості переданого сигналу є ймовірність помилок за бітами (Bit Error Ratio – BER) [17]. А величина BER безпосередньо пов'язана з оптичним відношенням сигнал / шум (Optical Signal-to-Noise Ratio – OSNR) [18]. Тому, знаючи значення OSNR, можна робити висновки про якість сигналу. Хоча аналіз спотворення сигналу вперше висунуто на перший план в [13–14], якість переданого сигналу залежала тільки від конвертера, довжини хвилі й рівня нерівномірності каналу, і не залежала від того, як світлові шляхи маршрутизувалися на фізичному рівні. В згаданих роботах проаналізовано Q-фактор, що отримували на основі деяких перетворень і передбачали його використовувати як критерій для оцінки параметрів передавання з використанням заданих оптичних шляхів, зокрема обчислення значення BER. Крім того, на енергетичні параметри сигналу істотно впливає безпосередньо електро- або акустооптична комірка, яка виконує процес комутації довжин хвиль. В [19, 20] проведено експериментальні дослідження ефективності акустооптичних комірок для комутаторів та запропоновано ефективні їх конфігурації.

У цій роботі доповнимо дослідження, виконані в [21], в яких OSNR проаналізовано для лінії передавання зі ступеневим увімкненням оптичних підсилювачів (ОА). Отже, здійснюється аналіз OSNR для оптичної мережі з маршрутизацією довжин хвиль за ступеневого увімкнення оптичних підсилювачів та оптичних крос-комутаторів, встановлених між вузлами джерела та пункту призначення (див. рис. 1). Отже, цілком можна оцінити параметри переданого сигналу в оптичній мережі з маршрутизацією довжин хвиль. На рис. 1 показано, що оптичному сигналу, ймовірно, доведеться пройти через множину пристроїв: оптичних крос-комутаторів (їх ще називають Optical Cross Connect – ОХС), волоконних регенераційних ділянок та оптичних підсилювачів (ОП), що призведе до погіршення якості сигналу. Це викликано, наприклад, зменшенням потужності через загасання у волокні, перехідними перешкодами в ОХС, а також підсумовуванням корисних сигналів з шумом посиленої спонтанної емісії (Amplified Spontaneous Emission – ASE) в оптичних підсилювачах.

Отже, нам необхідно отримати аналітичний вираз для опису OSNR для оптичної мережі з маршрутизацією за довжинами хвиль, що містить ОА та оптичні крос-комутатори ОХС.

Для того, щоб отримати необхідну аналітичну модель OSNR, ми провели низку досліджень у такій послідовності:

- У праці авторів [22] аналізується OSNR для лінії передавання без проміжних крос-комутаторів.
- У праці авторів [23] аналізуються перехідні завади в активному мережевому оптичному обладнанні, зокрема крос-комутаторах і штраф потужності за рахунок цих завад.

У цій статті проаналізовано OSNR для світлового шляху зі ступеневим з'єднанням ОА, ОХС і наведено результати моделювання OSNR, основані на отриманій аналітичній моделі.

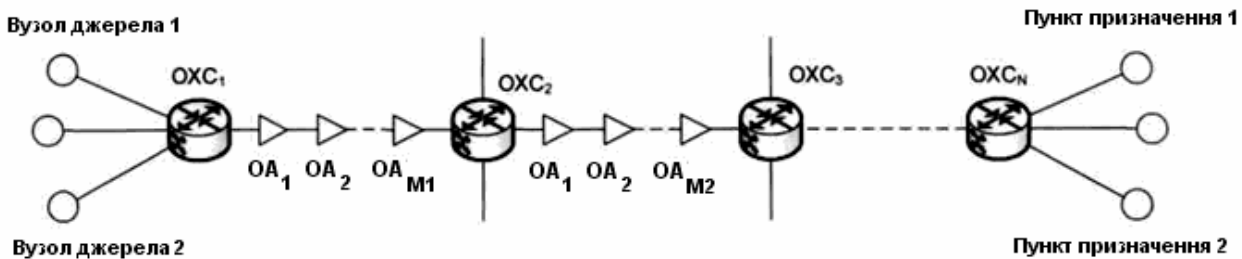


Рис. 1. Схема ділянки оптичної мережі з маршрутизацією за довжинами хвиль зі ступеневим увімкненням оптичних підсилювачів (ОА) та оптичних крос-комутаторів ОХС

Розрахунок OSNR для мережі з маршрутизацією за довжинами хвиль. Використаємо вдосконалені аналітичні вирази, отримані в [22, 23], для того щоб отримати загальні вирази для обчислення оптичного відношення сигнал / шум світлових шляхів, що містять оптичні підсилювачі та крос-комутатори. Отже, вирази для визначення OSNR отримано з урахуванням таких припущень:

- Рознесення оптичних каналів є більшим, ніж 50 ГГц. Згідно з цим припущенням, перехресними завадами сусідніх каналів можна знехтувати [14].
- Передана у волокно потужність ніколи не перевищує 2.5 мВт на виході передавального лазера. У зв'язку з цим припущенням можна знехтувати нелінійними ефектами Рамана і Бріллюена [13, 22, 23].
- Передбачається використовувати стандартні волокна з компенсацією дисперсії вздовж лінії (в ОХС або підсилювальних пунктах). Отже, нехтуємо міжсимвольною інтерференцією через дисперсію.
- Передбачається, що оптичні підсилювачі працюють в глибокому насиченні й мають ідеально плоску АЧХ.
- Втрати, що вносяться кожним ОХС, компенсуються оптичними підсилювачами, а штраф за рахунок перехресних завад в ОХС є доволі низьким.
- Всі ОА в ланцюзі, зокрема підсилювач потужності й передпідсилювач, мають однаковий коефіцієнт шуму для всіх каналів.
- Втрати на всіх ділянках однакові, а лінійні підсилювачі повністю компенсують загасання на регенераційній ділянці зв'язку.
- Рівні вихідної потужності бустера і лінійних підсилювачів однакові.

Тому в цій аналітичній моделі OSNR нелінійними ефектами нехтуємо (як це і відбувається у реальності), а погіршення сигналу світлового шляху спричинене шумом ASE, накопиченим від лінійних оптичних підсилювачів і штрафу потужності проміжних ОХС.

У процесі виведення виразів для потужностей шумів і штрафів потужності передбачається, що і шум биття, і шум приймача, що існує за відсутності перехідних завад, мають гауссівський розподіл густини ймовірності, хоча розподіл густини ймовірності шуму биття не є гауссівським, тому що є лише внесок перехідних завад. Але експериментально знайдено, що розподіл поступово стає гауссівським зі збільшенням кількості внесків перехідних завад. Розподіл густини ймовірності шуму на приймальній стороні за відсутності перехідних завад також не є гауссівським у випадку, коли підсилена спонтанна емісія (ASE) в ербієвих оптичних підсилювачах (EDFA) домінує над іншими джерелами шуму. Для простоти під час виведення аналітичного виразу для оцінки штрафу

потужності, викликаного перехідними завадами, передбачалось, що шум приймача має гауссівський розподіл густини ймовірності.

Обчислюючи OSNR в каналі для світлового шляху зі ступеневим з'єднанням оптичних підсилювачів і крос-комутаторів, також необхідно розглянути два випадки.

Випадок 1. Якщо відмінності затримок оптичного поширення в ОХС перевищують час когерентності лазера, тобто всі внески перехідних завад є некогерентними один з одним і некогерентні з сигналом. Тоді OSNR обчислюється так (позначення розшифровано у табл. 1):

$$OSNR = P_{out} - 10\lg M_{ch} - a_s - NF_{ASE} - 10\lg \left(N_{span} + \frac{10^{0,1G_{RA}}}{10^{0,1a_s}} \right) - 10\lg(hf \cdot \Delta f_{ch}) + 5\lg \left(1 - 4e \left(\sum_{i=1}^L M_{ch,i} + \sum_{i=1}^L N_i - 2 \cdot L \right) \rho^2 \right) \quad (1)$$

де (і далі) N_{span} – кількість ділянок передавання; L – кількість проміжних ОХС.

Випадок 2. Якщо відмінність затримок оптичного поширення в ОХС менша від часу когерентності лазера, то формуються складні перехідні завади. Частина цих завад когерентна з основним сигналом, частина – некогерентна. Складні перешкоди можуть виникати, якщо крос-комутатор не інтегрований, а складається з окремих оптичних компонентів. У цьому випадку OSNR обчислюється так (позначення розшифровано у табл. 1):

$$OSNR = P_{out} - 10\lg M_{ch} - a_s - NF_{ASE} - 10\lg \left(N_{span} + \frac{10^{0,1G_{RA}}}{10^{0,1a_s}} \right) - 10\lg(hf \cdot \Delta f_{ch}) + 5\lg \left(1 - 4e \left(\sum_{i=1}^L M_{ch,i}^2 + \sum_{i=1}^L N_i - 2 \cdot L \right) \rho^2 \right) \quad (2)$$

Моделювання, що ґрунтується на виразах (1) і (2), полягає в обчисленні оптичного відношення сигнал / шум за умови, що світловий шлях проходить ступеневе увімкнення оптичних підсилювачів та оптичних крос-комутаторів.

У процесі моделювання використовуються такі значення вхідних даних, які перераховані у таблиці.

Застосовуючи технологію передкорекції помилок FEC згідно з G.709/Y.1331, можливо зменшити вимоги до OSNR на 4-5 дБ і тоді для всіх шляхів, знайдених у оптичній мережі можна, відповідно, знизити вимоги щодо регенерації сигналу.

Використані значення вхідних даних для моделювання OSNR

Параметр	Символічне позначення	Одиниці вимір.	Значення
Швидкість передавання даних	STM-64	Гбіт/с	10
Q-фактор, що відповідає необхідному значенню коефіцієнта помилок	Q	-	6 для BER=10 ⁻⁹ 7 для BER=10 ⁻¹²
Рівень вихідної потужності групового сигналу	P _{out}	дБп	22
Рівень вихідної потужності в кожному хвильовому каналі	P _{ch.out}	дБп	3
Коефіцієнт підсилення підсилювача потужності	G _{BA}	дБ	22
Коефіцієнт шуму кожного оптичного підсилювача	NF _{ASE}	дБ	6.5
Кількість довжин хвиль, що поширюються в кожному волокні	M _{ch}	-	8
Кількість оптичних портів у кожному ОХС	N	-	4
Втрати оптичної потужності на відстані однієї регенераційної ділянки	a _s	дБ	22
Відношення оптичної потужності внеску кожної перешкоди до сигналу	e	дБ	-44 (випадок 1 - рис. 2) -55 (випадок 2 - рис. 3)

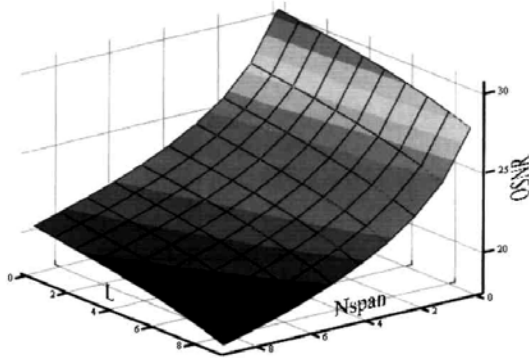


Рис. 2. Залежність OSNR від кількості регенераційних ділянок передавання (N_{span}) і кількості проміжних крос-комутаторів (L) за швидкості STM-64, $Q = 7$, $\varepsilon = -44$ дБ, $M_{ch} = 8$, $N = 4$

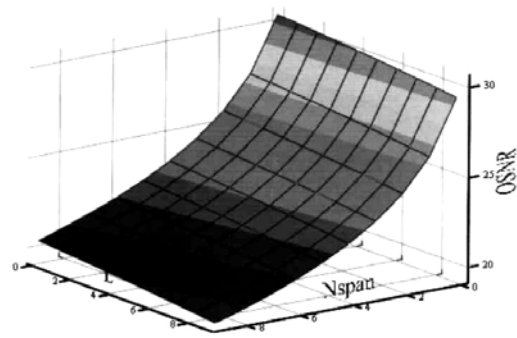


Рис. 3. Залежність OSNR від кількості регенераційних ділянок передавання (N_{span}) і кількості проміжних крос-комутаторів (L) при швидкості STM-64, $Q = 7$, $\varepsilon = -55$ дБ, $M_{ch} = 8$, $N = 4$

Висновки. З аналізу отриманих на рис. 2 та рис. 3 результатів можна зробити такі висновки:

1. Значення OSNR зменшуються швидше зі збільшенням кількості оптичних підсилювачів, ніж зі збільшенням кількості крос-комутаторів.

2. За заданої швидкості в оптичному каналі для того, щоб значення OSNR було в межах норми, оптичний тракт повинен містити певну кількість підсилювачів і крос-комутаторів. Наприклад, при швидкості 10 Гбіт/с, $Q = 7$, $\varepsilon = -44$ дБ, норма $OSNR > 24$ дБ. Тому канал зв'язку може містити одночасно три ділянки (два оптичних підсилювачі – ОА) і два крос-комутатори, або один ОА і шість крос-комутаторів (рис. 2).

3. Використовуючи технологію FEC згідно з G.709/Y.1331 або I/G.975.1 з чистим підсиленням кодованого сигналу і використанням розподіленого раманівського підсилення, можна отримати канал зв'язку за швидкості 10 Гбіт / с, $Q = 7$, $\varepsilon = -44$ дБ, що містить одночасно 15 ділянок (14 ОА) та 11 крос-комутаторів (за рахунок зменшення вимог до OSNR на 4–5 дБ). Тобто повністю оптична мережа стає масштабованішою.

4. Необхідно відзначити деякі застереження, пов'язані з крос-комутаторами. За умови, що відмінності затримок поширення оптичних шляхів у ОХС менші, ніж час когерентності лазерів, виникають складні перехідні завади (і когерентні, і некогерентні), які можуть згенерувати набагато більший штраф потужності, ніж у тому випадку, коли ця умова не виконується. Когерентні перехідні завади спричиняють флуктуації потужності сигналу, а це викликає шум залежно від співвідношення відмінностей затримки поширення і бітового інтервалу сигналу. Некогерентні перехідні завади можуть згенерувати набагато більшу потужність шуму, тому що їх внески все ще є когерентними між собою. Тому параметр ε повинен бути якомога меншим (для першого випадку завад $\varepsilon < -44$ дБ – рис. 2, для другого випадку перешкод $\varepsilon < -55$ дБ – рис. 3) для задоволення вимог щодо максимального штрафу за рахунок перехідних завад. Крім того, введення квантиля, основане на статистичному аналізі впливу когерентних і некогерентних перехідних завад, може послабити технічні вимоги до перехідних завад щодо компонентів системи.

5. Під час проектування ОХС у повністю оптичних мережах відмінності оптичних затримок поширення повинні встановлюватися більшими, ніж час когерентності передавальних лазерів, щоб зменшити вплив перехідних завад.

6. Отримані аналітичні вирази надають можливість здійснювати обґрунтований вибір структури повністю оптичної мережі з комутацією за довжинами хвиль з урахуванням заданого набору вхідних параметрів, а також її оптимізацію за критеріями максимальних значень OSNR відповідних хвильових шляхів передавання інформаційних потоків.

1. Krasko O., (2013), *Effectiveness of Virtual Concatenation Algorithms for Next Generation SDH/SONET Networks*, In *Int. Conf. Computer Science and Engineering*, Lviv Polytechnic National Univ.,

Ukraine, Nov. 2013, P.38-39. 2. Фокин В.Г. Оптические системы передачи и транспортные сети: учеб. пособие. – М.: Эко-Трендз, 2008. – 284 с. 3. Башарин Г.П., Савочкин Е.А. Приближенный метод вычисления вероятностей блокировок оптоволоконной сети с фиксированной маршрутизацией и без волновых конвертеров // ВЕСТНИК РУДН, Серия “Прикладная и компьютерная математика”. – 2002. – № 1(1). – С.25–33. 4. Березко М.П., Вишневский В.М., Левнер Е.В., Федотов Е.В. Математические модели исследования алгоритмов маршрутизации в сетях передачи данных // Информационные процессы. – 2001. – Том 1. – № 2. – С.103–125. 5. Ефимушкин В.А., Савандюков И.М. Анализ блокировок коммутатора оптической сети с коммутацией пакетов // Электросвязь. – 2007. – №8. – С.8–11. 6. Dumych S., Guskov P., Maksymyuk T. and Klymash M., (2013) Simulation of characteristics of optical burst switched networks, In Proc. IEEE International Conference on Microwave & Telecommunication technology (CriMiCo'2013), Sevastopol, Crimea, P. 492–493, Sep. 2013. 7. Каминецкий И.С. Применение теории графов для оптимизации распределения длин волн в ВОСП СР // Труды учебных заведений связи / СПбГУТ. – СПб, 2004. – № 171. – С.48–60. 8. Dumych S., Maksymyuk T. and Guskov P., Simulation of Burst Aggregation and Signaling schemes for Optical Burst Switched Networks, In Int. Conf. Computer Science and Engineering, Lviv Polytechnic National Univ., Ukraine, Nov. 2013., pp. 40–41. 9. Aggarwal A., Bar-Noy A., Coppersmith D., Ramaswami R., Schieber B., and Sudan M. Efficient routing and scheduling algorithms for optical networks // in Proc. 5-th Annu. ACM-SIAM Symp. Discrete Algorithms. – 1994. – № 1. – Pp. 412–423. 10. Krasko O., Huskov P. and Maksymyuk T., (2014), Advanced Multi-Wavelength Data Transmission Method for Optical Access Networks, In Proc. IEEE International Conference on the Modern Problems of Radio Engineering Telecommunications and Computer Science (TCSET'2014), Feb.-Mar. 2014. 11. Baroni S., Bayvel P. Wavelength Requirements in Arbitrarily Connected Wavelength-Routed Optical Networks // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 1997. – vol.15. – №2. – pp.242–251. 12. Baroni S., Bayvel P., Gibbens R.J., Korotky S.K. Analysis and Design of Resilient Multifiber Wavelength-Routed Optical Transport Networks // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 1999. – vol.17. – №5. – pp.743–758. 13. Iannone E., Sabella R., Binetti S. Granularity in All-Optical WDM Networks // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 1998. – vol.16. – №12. – P.2318–2327. 14. Sabella R., Iannone E., Listanti M., Berdusco M., Beinetti S. Impact of Transmission Performance on Path Routing in All-Optical Transport Networks // IEEE Journal of Lightwave Technology. – 1998. – vol.16. – №11. – pp.1965–1972. 15. Dumych, S., Maksymyuk, T., Krasko, O. and Guskov, P., The Virtual Channel Parameters Calculation in All-Optical Network, In Proc. IEEE International Conference on The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM 2013), P.87, Feb. 2013. 16. Listanti M., Berdusco M. and Sabella R. A new strategy for employing wavelength conversion in WDM optical networks // IEEE Lasers and Electro-Optics Society Annual Meeting. LEOS, 10th Annual Meeting. Conference Proceedings. – 1997. – vol.2. – P.464–465. 17. Listanti M., Berdusco M. and Sabella R. Optical path strategies in WDM all-optical networks: Minimization of wavelength converters in optical cross-connect // IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM. – 1997. – vol.1. – P.583–587. 18. Агравал Г.П. Волоконно-оптические системы передачи. Часть 1: Пер. сангл. – Новосибирск: Веди, 2005. – 252 с. 19. A. S. Andrushchak, E. M. Chernyhivsky, Z. Y. Gotra, M. V. Kaidan, A. V. Kityk, N. A. Andrushchak, T. A. Maksymyuk, B. G. Mytsyk and W. Schranz Spatial anisotropy of the acousto-optical efficiency in lithium niobate crystals // Journal of Applied Physics, vol.108, no.10, 103118-103118 (pp.1-5). 20. A.S. Andrushchak, M.V. Kaidan, Ye. M. Chernyhivskiy, O.V. Yurkevych, T.A. Maksymyuk, B.G. Mytsyk, and A.V. Kityk. Application efficiency increasing of LiNbO₃:MgO and GaP crystals for acoustooptical high-frequency control of powerfull laser irradiation // In Proc. IEEE International Conference on Laser and Fiber-Optical Networks Modeling 2010 (LFNM 2010), pp.173–175. 21. Sun Y., Srivastava A.K., Zhou J., Sulhoff J.W. Optical Fiber Amplifiers for WDM Optical Networks // Bell Labs Technical Journal. – 1999. – vol.4. – №1. – pp. 187–206. 22. Климаш М.М. Аналіз якості функціонування транспортних оптичних DWDM систем / М.М. Климаш, І.В. Демидов, М.І. Олексін // Зв'язок. – 2006. – № 7. – С.9–13. 23. Климаш М.М. Аналіз конфігурації та параметрів DWDM систем оптичних магістральних трактів / М.М. Климаш, І.В. Демидов, І.Б. Чайковський // Радіоелектроніка та телекомунікації. – Львів, 2006. – №557. – С.85–94.