

Климаш М.М., д.т.н.; Кайдан М.В., к.т.н.; Андрущак В.С., аспірант

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОРЯДКІВ МОДУЛЯЦІЇ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧІ

Klymash M.M., Kaidan M.V., Andrushchak V.S. Research the orders of modulations for increasing energy efficiency optical transport network. In paper proposed the structure of telecommunication system of transfer with speed 25 Tbit/s, considering effective use electrical energy and providing reliability system. Here, considered the idea of distribution DWDM mesh with interval between channels 33 GHz and using PM-QPSK modulation for providing the capacity 25 Tbit/s. This solution allows to increase energy efficiency of system to 14% relatively system which use PM-32QAM modulation. Confirmed that the using higher orders of modulation is not a good solution for getting capacity 25 Tbit/s and higher. Proposed using the photonic-crystal fibers (PCF) for elements of telecommunication system of transfer. Using the erbium doped fiber amplifiers (EDFA) based on PCF leads to reduce energy consumption of optical line to 9.5% and increase the reliability of line to 1.6 times. The results obtained can be used the network operator at design or modernization of optical transport network. It leads to make a right choice of devices for network that will reduce the capital and operating costs. For increasing the length of regeneration area, increasing the allowable input optical power in fiber, increasing reliability of system and reducing operating costs in paper proposed concentrate attention on scientific researches PCF.

Keywords: energy efficiency, modulation, telecommunication system of transfer, DWDM, reliability, photonic-crystal fibers.

Климаш М.М., Кайдан М.В., Андрущак В.С. Дослідження порядків модуляції для підвищення енергоефективності телекомунікаційних систем передачі. В роботі запропоновано структуру телекомунікаційної системи передачі з ідеєю розподілу DWDM сітки з міжканальним інтервалом 33 ГГц і використанням PM-QPSK модуляції для забезпечення пропускної здатності 25 Тбіт/с. Дане рішення, дозволило підвищити енергоефективність системи на 14%. Запропоновано використання оптичних підсилювачів легованим ербієм (EDFA) на основі фотонно-кристалічних волокон (ФКВ), що дозволило зменшити енергетичне споживання оптичного тракту на 9,5% та збільшити його надійність в 1,6 рази.

Ключові слова: енергоефективність, модуляція, телекомунікаційна система передачі, DWDM, надійність, фотонно-кристалічні волокна.

Климаш Н.Н., Кайдан Н.В., Андрущак В.С. Исследование порядков модуляции для повышения энергоэффективности телекоммуникационных систем передачи. В работе предложена структура телекоммуникационной системы передачи с идеей распределения DWDM сети с межканальной интервалом 33 ГГц и использованием PM-QPSK модуляции для обеспечения пропускной способности 25 Тбит / с. Данное решение позволило повысить энергоэффективность системы на 11%. Предложено использование оптических усилителей легированным эрбием (EDFA) на основе фотонно-кристаллических волокон (ФКВ), что позволило уменьшить потребление энергии оптического тракта на 9,5% и увеличить его надежность в 1,6 раза.

Ключевые слова: энергоэффективность, модуляция, телекоммуникационная система передачи, DWDM, надежность, фотонно-кристаллические волокна.

Вступна частина

Постановка задачі. За прогнозами компанії Cisco кількість світового трафіку до 2019 року перевищить 2.0 зеттабайт, що є в два рази більше по відношенню до прогнозованого у 2016 року – 1.1 зеттабайт [1]. Це в свою чергу вимагає збільшення пропускної здатності оптичних волокон для можливості передачі прогнозованого навантаження з відповідною якістю обслуговування. Однак на сьогодні немає рішення яке б дозволило спроектувати телекомунікаційну систему передачі із пропускною здатністю оптичного тракту 25 Тбіт/с яка б характеризувалась ефективним використанням електроенергії, високими параметрами надійності та низькими капітальними і експлуатаційними витратами.

Аналіз літературних джерел. Одним із методів підвищення пропускної здатності оптичних трактів телекомунікаційних систем передачі є збільшення швидкості передачі даних [2], що призводить до сильнішого впливу дисперсії, нелінійних ефектів, та інших чинників, які негативно впливають на оптичну несучу. Крім того, збільшення швидкості передачі даних впливає на збільшення енергетичного споживання таких мереж [3]. Як встановлено в наших попередніх роботах [4] збільшення швидкості передачі у два рази, не призведе до збільшення енергетичного споживання мережі у стільки разів. Збільшення швидкості передачі призводить до зменшення кількості електроенергії, яка є необхідною для передачі одного біта даних (параметр енергоефективності).

В роботі [5] визначено параметр енергоефективності для сучасних технологій транспортних оптичних мереж і мереж доступу. Проте в цій роботі не запропоновані рішення подальшого зменшення цього параметру.

В роботі [6] запропонована нова DWDM сітка із міжканальним інтервалом 33 ГГц для формування пропускної здатності оптичного тракту 25 Тбіт/с. Проте не вказано як запропоноване рішення вплине на міжканальні перехресні завади, оскільки це призведе до зменшення відношення сигнал/шум і введення штрафів по потужності.

В роботах [7, 8] представлено використання фотонно-кристалічних волокон (ФКВ) для отримання рівня підсилення оптичних підсилювачі легованим ербієм (EDFA) вище 35 дБп. Однак в роботі не представлено як це вплине на параметр енергоефективності і надійність оптичного тракту та телекомунікаційної системи передачі в цілому.

Невирішені питання. Виходячи із аналізу літературних джерел є доцільність оцінити параметр енергоефективності для телекомунікаційної системи передачі із пропускною здатністю оптичного тракту 25 Тбіт/с та показати чи вираш від енергоспоживання запропонованих рішень покриє зменшення часу життя та надійності пристроїв системи. Дану оцінку слід провести виходячи із типу модуляції, оскільки власне вона дозволяє отримати необхідну швидкість передачі даних і визначає тип та архітектуру приймально-передавального обладнання. Однак незважаючи на вплив нелінійних ефектів, дисперсій та інших чинників, слід розглянути рішення, які можуть реально збільшити пропускну здатність оптичного тракту та дослідити вплив розглянутих рішень на енергетичне споживання та надійність мережі.

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є побудова телекомунікаційної системи передачі із пропускною здатністю 25 Тбіт/с що характеризується ефективним використанням електроенергії та високими параметрами надійності.

Для досягнення мети розв'язуються такі наукові задачі:

- Дослідження DWDM сітки із міжканальним інтервалом 33 ГГц для забезпечення пропускної здатності 25 Тбіт/с;
- Визначити і оцінити вплив вищих порядків модуляції на енергоефективність, надійність та час життя модуляторів;
- Показати вплив вищих порядків модуляції на енергоефективність та надійність телекомунікаційної системи передачі;
- Запропонувати використання ФКВ для зменшення енергетичного споживання та збільшення надійності оптичного тракту;
- Запропонувати структуру телекомунікаційної системи передачі із швидкістю 25 Тбіт/с із високою енергоефективністю та покращеними параметрами надійності відносно інших існуючих рішень.

1. Типи модуляцій і структура досліджуваних пристроїв

Для забезпечення високих швидкостей передачі використання типової ООК (on-off keying) модуляції є неефективним рішенням. При швидкості 100 Гбіт/с така модуляція характеризується низькою спектральною ефективністю (0,5 біт/с/Гц – швидкість передачі

інформації яку можна досягти при передаванні через дану смугу пропускання) і займає досить широку смугу в сітці частот DWDM (200 ГГц) [9]. Схематична структура модулятора, який використовує ООК представлена на рис.1(а).

На сьогоднішній день для забезпечення швидкості передачі 100 Гбіт/с найбільшого використання набула РМ-QPSK модуляція [9-11], яка характеризується спектральною ефективністю порядку 2 біт/с/Гц. Схематична структура модулятора, який використовує РМ-QPSK модуляцію представлена на рис. 1(б). Для реалізації потоків із швидкістю 200, 400 Гбіт/с і вище використовуються аналогічні структури модуляторів (рис. 1(б)) із дублюванням відповідних робочих частин пристрою, оскільки це необхідно для реалізації вищих порядків М-QAM модуляції. Детальний опис цих та інших модуляцій представлений в роботі [9].

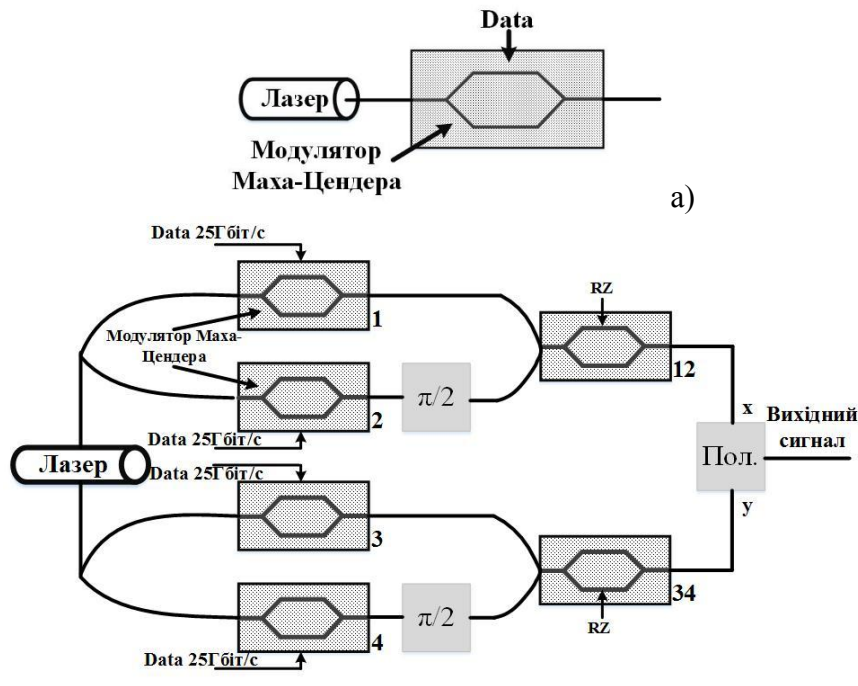


Рис. 1. Структура оптикоелектронних компонентів типового передавача: а) ООК б) РМ-QPSK

Ключовими елементами в таких пристроях є інтерферометр Маха-Цендера (модулятор), контролер (процесор) і генератор напруги, який здійснює безпосереднє прикладання напруги до електрооптичної комірки (ЕОК), суматори і фазообертачі.

2. Оцінка параметру енергоефективності для досліджуваних архітектур електрооптичних модуляторів

В наших попередніх роботах запропоновано математичну модель визначення параметру енергоефективності для електрооптичних модуляторів [7], який визначається за формулою (1):

$$P_{\text{mod}}(V) = P_{\text{proc}}(v) + P_{\text{gen}V}(v) + P_{\text{cool}}(v), \quad (1)$$

де $P_{\text{proc}}(v)$ – енергоспоживання контролера (процесора) $P_{\text{gen}V}(v)$ – енергоспоживання генератора напруги, $P_{\text{cool}}(v)$ – електроенергія, яка витрачається на охолодження модулятора. Детальне визначення енергоспоживання кожного із компонентів пристрою представлено в роботі [12].

Відповідно для трьох структур електрооптичних модуляторів, які реалізують відповідно ООК, РМ-QPSK та РМ-16QAM проведено моделювання для визначення

параметру енергоефективності. Архітектури досліджуваних пристроїв представлені на рис. 1-2 відповідно. Для PM-16QAM модуляції використовується структура представлена на рис. 1(б) із дублюванням відповідних модуляторів і фазообертачів.

Вхідні дані для моделювання представлені в табл. 1.

Таблиця 1

Вхідні дані для моделювання

Параметр	Значення	Параметр	Значення
Процесор		Параметри кристалу і генератора	
Напруга, U	1,25 В	Показник заломлення, n	2,2378
Тактова частота, f	2,8 ГГц	Довжина хвилі, λ	632,8 нм
Сукупна ємність навантаження (СЄН) ALU, C_{ALU}	310 пФ	Електрооптичний коефіцієнт, r_{ij}	$39,7 \cdot 10^{-12}$ м/В
СЄН тактового генератора, C_{clk}	3330 пФ	Товщина зразка, d	13,4 мм
СЄН кешу C_C	957 пФ	Довжина зразка, L	18,5 мм
СЄН кешу і шин C_{mchl}	0,088 фФ	Значення струму генератора, I	20 мА

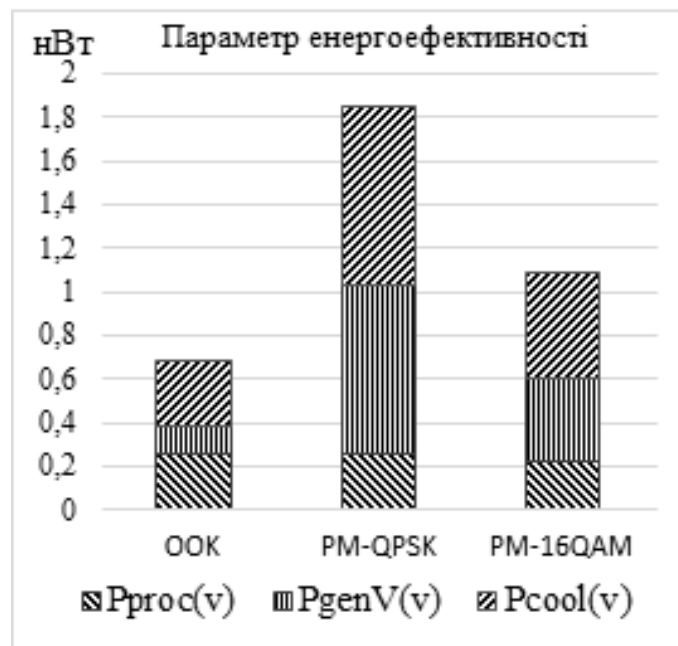


Рис. 2. Складові параметри енергоефективності для різних типів модуляції

Відомо, що збільшення швидкості передачі даних, призводить до збільшення енергетичного споживання мережевих пристроїв [5, 12], що і спостерігається для PM-16QAM модулятора (400 Гбіт/с) – див. табл. 2. Однак збільшення швидкості передачі у два рази не призводить до збільшення енергетичного споживання мережі у стільки рази [12]. Збільшення швидкості призводить до зменшення кількості електроенергії, яка є необхідна для обробки одного біта даних. Так, наприклад, встановлено, що при використанні PM-16QAM модулятора ефективність використання електроенергії зростає на 41,6% по відношенню до PM-QPSK модулятора – див. табл. 2.

Результати моделювання – енергетичне споживання модуляторів

Елементи модулятора	ООК (100 Гбіт/с)	PM-QPSK (100 Гбіт/с)	PM-16QAM, (400 Гбіт/с)
$P_{proc}(v)$	25.2 Вт	25.2 Вт	85.1 Вт
$P_{gen}(v)$	12.8 Вт	77.3 Вт	154.5 Вт
$P_{cool}(v)$	30.2 Вт	82.0 Вт	191.6 Вт
$P_{total}(v)$	68.5 Вт	184.5 Вт	431.1 Вт
Параметр енергоефективності	0,685 нВт/біт	1,845 нВт/біт	1,078 нВт/біт

Проте необхідно дослідити чи виграв енергоефективності перекиє втрати за рахунок зменшення часу життя і надійності роботи таких модуляторів.

3. Вплив параметру енергоефективності на надійність і час життя мережевих модуляторів

Аналіз параметру надійності для досліджуваних структур модулятора

Для оцінки часу життя мережевих пристроїв логічно було б оцінити параметр надійності таких структур модуляторів. Математичне визначення параметру надійності (ймовірності відмови пристрою) для ООК модулятора (див. рис.1) визначається за формулою 2:

$$P_{БР}(t) = P_{proc}(t) \cdot P_{ЕОК}(t) \cdot P_{gener}(t) \quad (2)$$

де $P_{БР}(t)$ – ймовірність відмови модулятора, $P_{proc}(t)$ – ймовірність відмови контролера (процесора) модулятора, $P_{ЕОК}(t)$ – ймовірність відмови ЕОК, $P_{gener}(t)$ – ймовірність відмови керуючого генератора напруги.

Для PM-QPSK модулятора (див. рис.2) ймовірність відмови визначається за формулою 3:

$$P_{БР}(t) = P_{proc}(t) \cdot (((P_1(t) \cdot P_{gener_1}(t) + P_2(t) \cdot P_{gener_2}(t)) \cdot P_{12}(t) \cdot P_{gener_12}(t)) + ((P_3(t) \cdot P_{gener_3} + P_4(t) \cdot P_{gener_4}) \cdot P_{34}(t) \cdot P_{gener_34})) \cdot P_{Пол}(t) \quad (3)$$

де $P_{proc}(t)$ – ймовірність відмови роботи контролера (процесора) модулятора, $P_{proc}(t)$ – ймовірність відмови роботи поляризатора, $P_j(t)$ – ймовірність відмови відповідних ЕОК (див. рис. 2) $j=1,2,3 \dots$, $P_{gener_i}(t)$ – ймовірність відмови керуючого генератора напруги.

Для PM-16QAM модулятора ймовірність безвідмовної роботи визначається за формулою 4:

$$P_{БР}(t) = P_{proc}(t) \cdot (((P_1(t) \cdot P_{gener_1} + P_2(t) \cdot P_{gener_2}) \cdot P_{12}(t) \cdot P_{gener_12}) + ((P_3(t) \times P_{gener_3} + P_4(t) \cdot P_{gener_4}) \cdot P_{34}(t) \cdot P_{gener_34}) + ((P_5(t) \cdot P_{gener_5} + P_6(t) \cdot P_{gener_6}) \times P_{56}(t) \cdot P_{gener_56}) + ((P_7(t) \cdot P_{gener_7} + P_8(t) \cdot P_{gener_8}) \cdot P_{78}(t) \cdot P_{gener_78})) \cdot P_{Пол}(t) \quad (4)$$

При використанні ООК і PM-QPSK модуляторів не відбувається зростання параметру активності компонентів процесора оскільки вони працюють із однаковими вихідними швидкостями передачі (встановлено в попередньому моделюванні при оцінці параметру енергоефективності). Тобто, можна вважати, що ймовірність відмови контролера для цих модуляторів не змінюється $P_{proc_ООК}(t) = P_{proc_PM-QPSK}(t)$.

Ймовірності надійної роботи ЕОК для цих двох досліджуваних модуляторів є різними. Це визначається швидкістю передачі даних для кожної із комірок. При PM-QPSK модуляції

ЕОК працюють із швидкостями 25 і 50 Гбіт/с, а при ООК модуляції – 100 Гбіт/с. Швидкість передачі визначає тривалість прикладання високовольтної напруги для модуляції “1” чи “0”. Можна припустити, що збільшення частоти прикладання електричного поля (збільшення швидкості передачі даних) до ЕОК призведе до зменшення його нагрівання і до збільшення часу його експлуатації. При менших швидкостях передачі (меншій частоті прикладання електрооптичного поля) досягається збільшення нагрівання ЕОК, оскільки для модуляції одного біта даних затрачається більше часу, що дає змогу більше нагріти ЕОК. Тобто можна припустити, що $P_{j_PM-16QAM}(t) > P_{j_PM-QPSK}(t)$. Однак враховуючи той факт, що кристал ніобат літію (ЕОК), який сьогодні є популярним рішенням для ЕОК [13-14], характеризується малим коефіцієнтом теплової провідності $\kappa=5,6$ Вт/м*К (при 300 К) [15] зміна частоти прикладання електричного поля не суттєво вплине на час надійної експлуатації пристрою. Тому вважаємо, що $P_{j_PM-16QAM}(t) = P_{j_PM-QPSK}(t)$.

При збільшенні швидкості передачі даних відбувається збільшення перемикаць керуючого генератора напруги ЕОК. Генератор має також власний час життя і скінченну кількість перемикаць. Це в свою чергу призводить до зменшення надійності пристрою і відповідно до зниження ймовірності надійної його роботи $P_{gener_i}(t)$. Як уже зазначалося, в РМ-QPSK модуляторі ЕОК комірки працюють із швидкостями 25 і 50 Гбіт/с. Тому в РМ-QPSK модуляторі генератори напруги характеризуються кращою надійністю по відношенню до ООК модулятора, оскільки в ООК, в даному випадку, ЕОК працює із швидкістю 100 Гбіт/с.

Розглянемо надійність РМ-16QAM модулятора. Як і в попередньому випадку припускаємо, що надійність ЕОК не змінюється при зміні швидкості передачі, оскільки тут комірки працюють із швидкостями порядку 50 і 100 Гбіт/с. Для даного модулятора відбувається збільшення енергетичного споживання контролера (процесора) майже в 3,4 рази по відношенню до ООК і РМ-QPSK модуляторів. Це пояснюється збільшення параметру активності елементів процесора за рахунок переходу від 100 до 400 Гбіт/с. Це в свою чергу призведе до збільшення нагрівання процесора і зменшення часу роботи такого пристрою. При підвищенні температури процесора на 10 градусів вище допустимого робочого рівня його термін роботи зменшується в два рази, а його продуктивність зменшується майже на 1,5% [16]. Для забезпечення надійної роботи і підтримки відповідного часу життя пристрою РМ-16QAM модулятора вимагається використання процесорів із високою тактовою частотою і надійною системою охолодження, оскільки вони працюють із сумарним потоком даних порядку 400 Гбіт/с.

Виходячи із вище описаного, при переході до більш швидкісних систем передачі і, наприклад, використання РМ-16QAM модуляторів слід звернути увагу на надійність роботи керуючих генераторів напруги, оскільки вони будуть найбільш ненадійними компонентами модулятора.

Оцінка параметру часу життя досліджуваних модуляторів

Встановлено (див. пункт *оцінка параметру енергоефективності для досліджуваних архітектур електрооптичних модуляторів*), що використання РМ-16QAM модулятора дозволяє отримати зменшення витрат електроенергії при обробці одного біта даних майже на 42% по відношенню до РМ-QPSK модулятора. Слід оцінити чи даний виграв з точки зору енергоефективності покриє втрати з точки зору часу життя пристрою. Для оцінки даного критерію використано наступний математичний апарат [17]:

$$\frac{k \cdot P_{eq} \cdot C_{kWh}}{k \cdot P_{eq} \cdot C_{kWh} + \frac{FR}{10^6} (MTTR \cdot P_{ers} \cdot C_m + C_{eq})} \quad (5)$$

де k – відсоток зменшення параметру енергоспоживання пристрою, P_{eq} – енергетичне споживання пристрою в активному режимі, C_{kWh} – вартість електроенергії \$/кВт, FR – представляє відношення кількості виходу із ладу пристрою за 10^9 годин роботи пристрою, $MTTR$ – час необхідний для відновлення роботи пристрою, P_{ers} – кількість працівників, яка є необхідна для відновлення роботи пристрою, C_m – часова ставка працівника – в \$/год, C_{eq} – ціна заміненого елемента.

Таблиця 3

Вхідні дані для розрахунку допустимого зменшення часу життя пристрою

Параметр	Значення	Параметр	Значення
$k, \%$	42	MTTR, год	2
P_{eq}, Bm	431	$P_{er}, осіб$	1
$C_{kWh}, \$/кВт$	0.039	$C_m, \$$	10
FR	34400	$C_{eq}, \$$	100

Перш за все необхідно визначити параметр FR для РМ-16QAM модулятора. Відштовхуємось від ймовірного значення кількості поломок 100 гігабітної лінійної карти за 10^9 годин роботи, яке становить 8600 [17]. Як встановлено вище (див. *Аналіз параметру надійності для досліджуваних структур модулятора*) найбільш ненадійним елементом модуляторів є керуючий генератор напруги. При переході від РМ-QPSK до РМ-16QAM вихідні потоки ЕОК зростають від від 25 до 50 Гбіт/с і від 50 до 100 Гбіт/с відповідно. Якщо кількість перемикачів генератора, яку він здійснює за час t становить D , то при збільшенні швидкості в два рази він здійснює D перемикачів за час $t/2$. Тому можна припустити, що збільшення швидкостей роботи ЕОК в два рази призведе до збільшення ймовірності відмови керуючого генератора напруги в стільки ж разів ($2 * P_{gener_j}(t)$).

Використовуючи виведені співвідношення (див. формула 4) оцінюємо вплив вище описаного переходу швидкостей ЕОК на надійність РМ-16QAM модулятора вцілому. Вважаємо, що ймовірність відмови роботи ЕОК і керуючих генераторів які працюють із однаковими швидкостями є рівною - $P_1(t) = P_2(t) = \dots = P_j(t)$, $P_{12}(t) = P_{34}(t) = \dots = P_{ij}(t)$, $P_{gener_1}(t) = P_{gener_2}(t) = \dots = P_{gener_i}(t)$, $P_{gener_12}(t) = P_{gener_34}(t) = \dots = P_{gener_ij}(t)$. Відповідно математична формула визначення відмови РМ-QPSK модулятора визначається за спрощеною формулою:

$$P_{БР1} = 4 \cdot P_{proc}(t) \cdot P_1(t) \cdot P_{gener_1}(t) \cdot P_{12}(t) \cdot P_{gener_12}(t) \cdot P_{пол}(t) \quad (6)$$

Відповідно при переході від РМ-QPSK до РМ-16QAM модулятора і відповідно зменшенні ймовірності надійної роботи керуючого генератора напруги ($2 * P_{gener_j}(t)$) ймовірність відмови РМ-16QAM модулятора становить:

$$P_{БР2} = 16 \cdot P_{proc}(t) \cdot P_1(t) \cdot P_{gener_1}(t) \cdot P_{12}(t) \cdot P_{gener_12}(t) \cdot P_{пол}(t) \quad (7)$$

Можна вважати, що перехід до 400 Гбіт/с знизить надійність модулятора в 4 рази за рахунок керуючих генераторів напруги. Відповідно для такого модулятора приймаємо параметр FR_{400} рівний $4 * FR_{100} = 4 * 8600 = 34400$. На основі даного параметру визначаємо наскільки можливо зменшити час життя модулятора, щоб вигреш отриманий за рахунок енергоефективності покрив ці втрати. Для обчислення використовуємо формулу (5) і вхідні дані для неї (див. табл. 3). Отримано, що допустиме зменшення часу життя пристрою за рахунок переходу від 100 до 400 Гбіт/с (перехід від використання РМ-QPSK до РМ-16QAM типів модуляторів) становить 63,1%.

4. Вплив типу модуляції на енергоефективність телекомунікаційних мереж

Відомо, що збільшення швидкості передачі призводить до зменшення довжини регенераційної ділянки за рахунок впливу дисперсій та цілої низки нелінійних ефектів. Збільшення швидкості передачі даних за рахунок використання вищих типів модуляції також призводить до зменшення довжини регенераційної ділянки [2]. Так наприклад для PM-QPSK модуляції дальність передачі без використання регенераторів становить 3000 км, а для PM-32QAM модуляції становить 350 км. Це призводить до частішого використання як оптичних підсилювачів так і 3R регенераторів, що в свою чергу призводить до зменшення надійності оптичного лінійного тракту, а також підвищення його енергетичного споживання. Тому є доцільність здійснити оцінку параметру енергоефективності для телекомунікаційних систем передачі при різних порядках модуляції.

В роботі [6] запропоновано наростити ємність оптичного волокна шляхом збільшення кількості несучих довжин хвиль. Це досягається шляхом об'єднання C і L діапазону оптичного волокна, а також зменшенням міжканального інтервалу між оптичними несучими до 33 ГГц. Це дозволяє отримати 250 хвиль по 100 Гбіт/с кожна (з використанням PM-QPSK модуляції) і, відповідно, 25 Тбіт/с пропускної здатності оптичного тракту. Тому є доцільність здійснити оцінку як капітальних так і експлуатаційних витрат (параметр енергоефективності) при використанні вище запропонованого рішення і PM-32QAM модуляції яка може забезпечити пропускну здатність оптичного лінійного тракту 24 Тбіт/с.

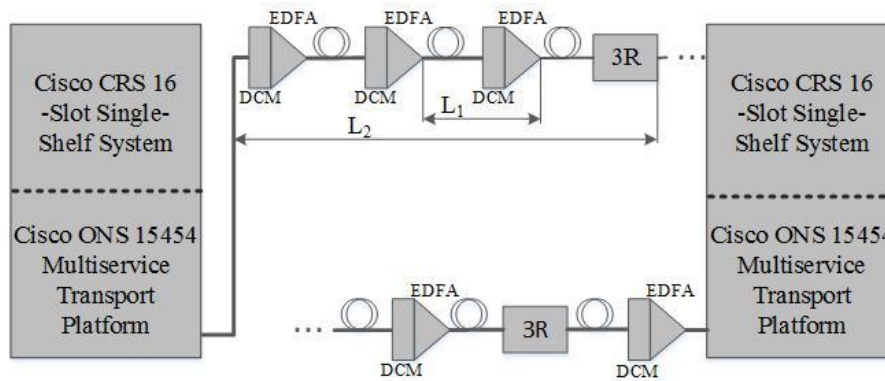


Рис. 3. Досліджувана структура телекомунікаційної системи передачі

Досліджувана структура телекомунікаційної системи передачі представлена на рис. 3. Для підвищення точності визначення параметру енергоефективності система побудована на основі реального обладнання. Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System виконує функції маршрутизатора транспортної мережі, а також формує (приймає) транспортні модулі технології OTN. Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform забезпечує необхідний тип модуляції оптичної несучої, дальність передачі без регенерації 3000 км при швидкості 100 Гбіт/с, а також здійснює спектральне ущільнення каналів. Детальне визначення параметру енергоефективності для кожного із елементів системи представлено в роботі [13] (табл. 4).

Математичний апарат для визначення параметру енергоефективності для заданої системи визначаємо за формулою 8:

$$P_{total} = 2 \cdot N_F \cdot (k_1 \cdot P_{IP,link} + k_2 \cdot P_{DWDM}) + N_{opt.amp} \cdot P_{opt.amp} + N_{3R} \cdot N_\lambda \cdot P_{3R} \quad (8)$$

де N_F – необхідна кількість кінцевого обладнання (Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System та Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform) для забезпечення необхідної пропускної здатності F ; k_1, k_2 – коефіцієнти використання продуктивності системи кожного із обладнання (в даному випадку $k_1=1, k_2=0,666$ – див. обладнання Cisco); $P_{IP,link}, P_{DWDM}$ – енергетичне

споживання обладнання, яке працює на мережевому, каналному і DWDM рівні; $N_{opt.amp.}$ – кількість оптичних підсилювачів, яка визначається довжиною регенераційної ділянки L_1 – див. рис. 4; $P_{opt.amp.}$ – енергетичне споживання оптичних підсилювачів; N_{3R} – кількість електричних регенераторів, яка визначається дальністю телекомунікаційних систем передачі L_2 – див. рис. 4; N_λ – кількість електричних регенераторів, яка визначається кількістю довжин хвиль в оптичному лінійному тракту; P_{3R} – енергетичне споживання електричних регенераторів.

Таблиця 4

Енергетичне споживання елементів досліджуваної телекомунікаційної системи передачі

Обладнання/елементи	Енергетичне споживання, Вт
Enhanced Chassis Cisco CRS 16-Slot	18 000 [18]
4-Port 100GE LAN/OTN interface module Cisco CRS 16-Slot	120 [19]
Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform (з використанням 100Gbps Coherent DWDM Trunk Card)	1500 [20]
AVARA EDFA	20 [21]
3R (на основі transponder Cisco ONS 15454)	120 [22]

На основі досліджуваної структури телекомунікаційної системи передачі (див. рис. 3), її елементів (див. табл. 4), математичного апарату (див. формула 8) різних порядків модуляції (PM-QPSK та PM-32QAM) та запропонованого методу перегрупування оптичних каналів з міжканальною відстанню 33 ГГц проведено визначення і оцінку параметру енергоефективності.

Таблиця 5

Результати обчислення

Тип модуляції (міжканальний інтервал)	К-сть хвиль	Довжина тракту, км	L_1 , км	L_2 , км	P_{total} , кВт	F Тбіт/с	Параметр енергоефективності нВт/біт
PM-QPSK (50 ГГц)	64	9500	100	3000	55,20	6,4	8,62
PM-32QAM (50 ГГц)	64			350	276,21	25,6	10,79
PM-QPSK (33 ГГц)	250			3000	238,17	25,0	9,30

Як зазначено вище, при переходу до вищих порядків модуляції довжина дальності безрегенераційної передачі зменшується [2]. Це впливає на збільшення енергетичного споживання оптичного лінійного тракту за рахунок використання більшої кількості 3R регенераторів. Кількість хвиль в оптичному волокні також визначає кількість цих пристроїв N_λ (в залежності від конфігурації пристрою – кількості вхідних/вихідних портів). Смуги роботи EDFA підсилювача, який підсилює в цілому діапазоні (C і L діапазоні), є достатньо в одному підсилювальному пункті. Відповідно при переході від PM-QPSK до PM-32QAM модуляції відбувається зростання параметру енергоспоживання на 25,2% за рахунок зменшення дальності безрегенераційної передачі і відповідно збільшенням енергетичного споживання оптичного лінійного тракту.

Запропонований перехід до міжканального інтервалу 33 ГГц при використанні PM-QPSK модуляції дозволяє отримати пропускну здатність F 25,0 Тбіт/с так як і у випадку використання PM-32QAM модуляції із 50 ГГц міжканальним інтервалом. Ущільнення DWDM сітки хоч і збільшує енергетичне споживання DWDM обладнання і 3R регенераторів (за рахунок збільшення кількості хвиль) зменшення параметру енергоспоживання відбувається майже на 14% по відношенню до систем з PM-32QAM модуляцією. Запропоноване рішення володіє кращою надійністю, оскільки зменшується в 2,4 рази кількість 3R регенераторів. Крім того, при виходу із ладу одного оптичного порта відбудуться в чотири рази менші втрати в об'ємі інформації ніж при використанні PM-32QAM модуляції (швидкість несучої в першому випадку 100 Гбіт/с, а в другому 400 Гбіт/с). Збільшення надійності запропонованого рішення відбувається за рахунок збільшення кількості альтернативних шляхів і зменшення кількості обладнання.

5. Фотонно-кристалічні волокна (ФКВ) – як засіб економії енергоресурсів і підвищення надійності телекомунікаційних систем

Відомо, що при переході до вищих порядків модуляцій – збільшенні числа символів – відстань між ними в евклідовому просторі швидко зменшується. Крім того зменшується кількість оптичної потужності що припадає на один біт даних. Це збільшує чутливість до шумів і відповідно, як уже неодноразово зазначалось, до зменшення довжини безрегенераційної передачі. З іншої сторони збільшити кількість оптичної енергії яка припадає на один біт можна за рахунок збільшення загальної оптичної потужності яка вводиться в волокно. Проте таке рішення призводить до цілої низки нелінійних ефектів при переході порогового рівня 20 дБп [23]. На сьогоднішній день площа перерізу світлового потоку становить 72 мкм². Проте необхідна щільність світлового потоку росте і 72 мкм² вже є недостатньо. Проте збільшення допустимої потужності яке вводиться в волокно можна за рахунок збільшення розміру сердечника волокна, що з іншої сторони є неприпустимо оскільки це призведе до невиконання умови одномодовості. На сьогоднішній день рішенням цієї проблеми є використання фотонних заборонених зон (ФЗЗ), що накладають умови заборони поширення світлових мод в певному діапазоні. Відомо дві технології забезпечення одномодовості з використанням ФЗЗ – це брегівське волокно і фотонно-кристалічне волокно. Детальне опис даних технологій представлено в роботі [24-25].

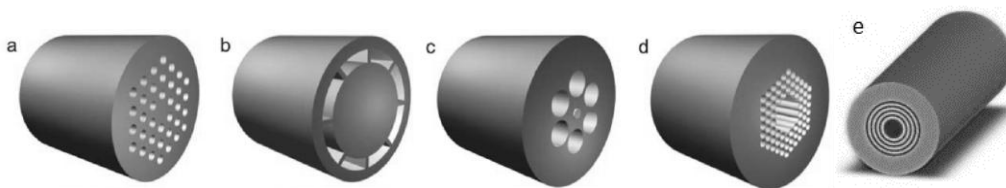


Рис. 4 Різні типи ФКВ: (а) Одномодовое порожнинне волокно
(б) Багатомодовое волокно (с) Активне волокно створюється
(д) Порожнисте волокно з фотонним кристалом із забороненою зоною
(е) Бреґівське волокно

Волокна Бреґга, яке має порожнистий сердечник, оточений оболонкою, утвореної чергуються кільцями з низьким і високим показниками заломлення. У всіх типах світловодів може змінюватись цілий ряд параметрів, таких як форма мікроотворів, схема локалізації мікроотворів, кількість сердечників, кількість дефектів, що утворюють сердечник. При зміні хоча б одного з геометричних параметрів структурної оболонки волокна спектр випромінювання трансформується. Кількість мод, що поширюються в ФКВ визначається тільки величиною відношення діаметру d повітряних каналів до відстані між їх осями Λ . При цьому для випадку $d/\Lambda \leq 0,2$ ФКВ є одномодовими у всьому спектральному діапазоні, тоді в

серцевині поширюються тільки моди нижчого порядку, а всі вищі моди йдуть в оболонку і загасають. Наявність порожнин в оболонці дозволяє більш ніж на порядок збільшити різницю показників заломлення серцевини і оболонки порівняно зі стандартним волокном.

Однаково змінюючи всі геометричні розміри структури ФКВ, можна створювати діаметр серцевини, що багаторазово перевищує або, навпаки, зменшеним порівняно з діаметром сердечника стандартного одномодового волокна, при цьому буде зберігатися одномодовий режим поширення світла. Великий розмір сердечника дозволяє знизити вплив нелінійних ефектів на форму поширюються по волокну імпульсів світла.

Власне першим застосуванням нових типів волокон стало їх використання для стикування із потужними лазерами. Проте найбільшого використання вони набули при створенні високоефективних шнурів комутації лазерного, оптичного підсилювального обладнання і компенсаторів дисперсії.

Не менш важливого застосування ФКВ набули в оптичних підсилювачах EDFA, де вони використовуються в якості відрізка волокна, легованим ербієм [7]. На сьогоднішній день провідні компанії по виготовленню EDFA підсилювачів такі як Agiltron Inc, Alfa Photonic SAS, Fiberinthebox, Finisar, AVARA Technologies, Fiber Store забезпечують підсилення оптичних несучих в 23 до 35 дБп. ФКВ леговані ербієм дозволили отримати підсилення оптичних несучих до 54,8 дБ [8] при $d/\Lambda=0,33$ причому зберегти режим одномодовості і зберегти лінійний режим роботи для вхідного сигналу. Відповідно це дозволить зменшити кількість оптичних підсилювачів на ділянці оптичного тракту за рахунок більшої довжини підсилювальної ділянки. Відповідно є доцільність оцінити параметр енергоефективності оптичного лінійного тракту при підсиленні оптичних несучих на 54,8 і 35 дБп при PM-QPSK модуляції (оцінка даного параметру для значення 35 дБп проведена в попередньому розділі *Вплив типу модуляції на енергоефективність телекомунікаційних мереж*).

Таблиця 6

Результати обчислення

Тип підсилювача	Тип модуляції	Кількість хвиль	Довжина тракту, км	L_1 , км	L_2 , км	P_{OLT} , кВт	F Тбіт/с	Параметр енергоефективності OLT нВт/біт
Типовий EDFA	PM-QPSK (50 ГГц)	64	9500	100	3000	13,36	6,4	2.09
EDFA із ФКВ		64		156,5		12,68		1.98
EDFA із ФКВ	PM-QPSK (33 ГГц)	250		156,5		47,32	25	1,89

При використанні ФКВ у EDFA підсилювачах вдається зменшити енергетичне споживання оптичного лінійного тракту на 5,2% по відношенню звичайних EDFA підсилювачів. Надійність тракту, виходячи із теорії надійності систем, покращиться в 1,58 рази (за рахунок зменшення кількості EDFA підсилювачів). При використанні телекомунікаційної системи передачі із міжканальним інтервалом 33 ГГц вдається досягнути зменшення енергетичного споживання оптичного тракту з використанням ФКВ EDFA на 9,5% по відношенню до звичайних підсилювачів.

6. Структура телекомунікаційної системи передачі для швидкості 25 Тбіт/с

Запропонована структура системи (див. рис. 5) не суттєво відрізняється від попередньої досліджуваної на рис. 3. Перш за все пропонується використовувати DWDM 250-ти каналну сітку для забезпечення пропускної здатності тракту 25 Тбіт/с. Швидкість передачі кожної

несучої становить 100 Гбіт/с які формуються шляхом використання PM-QPSK модуляції. Оскільки ФКВ характеризуються великою ефективною площею їх пропонується використовувати для стикування потужних лазерів. Для зменшення енергетичного споживання такої системи і підвищення її надійності пропонується використовувати EDFA підсилювачі DCM компенсатори дисперсії на основі ФКВ.

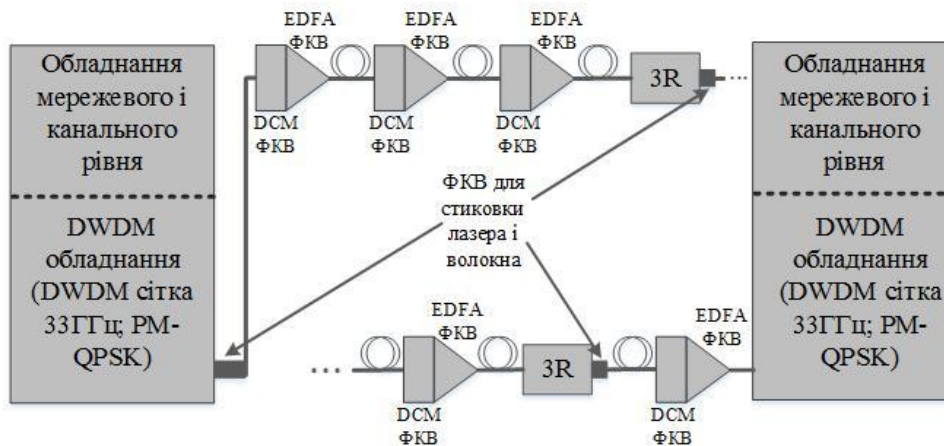


Рис. 5. Запропонована структура телекомунікаційної системи передачі

Висновки

В роботі здійснено дослідження телекомунікаційних систем передачі які забезпечують швидкість до 25 Тбіт/с. Оцінка здійснено з точки зору параметрів енергоефективності, часу життя і надійності роботи. Для варіанту збільшення пропускної здатності систем шляхом переходу до вищих порядків модуляції визначено і оцінено параметр енергоефективності. Перехід від PM-QPSK до PM-16QAM модуляторів дозволив отримати зменшення кількості електроенергії на обробку одного біта даних на 42%. Проте ймовірність відмови PM-16QAM модулятора є в чотири рази вищою по відношенню до PM-QPSK модулятора. Оскільки параметр надійності є важливіший по відношенню до параметру енергоефективності PM-QPSK модулятор є кращим рішенням для телекомунікаційних систем передачі.

Оцінено два способи нарощення пропускної здатності 25 Тбіт/с оптичної лінії з використання PM-32QAM модуляції і ущільненням DWDM сітки до 33 ГГц. Ущільнення DWDM сітки по відношенню до використання систем передачі із PM-32QAM модуляцією дозволяє отримати зменшення енергетичного споживання системи на 14% і збільшити її надійність шляхом створення великої кількості оптичних каналів (альтернативних шляхів) і меншим навантаженням на кожен із них.

Для зменшення енергетичного споживання оптичного лінійного тракту і підвищення його надійності запропоновано використання EDFA підсилювачів на базі ФКВ. Запропоноване рішення з використанням ущільнення DWDM сітки дозволило зменшити енергетичне споживання тракту на 9,5% відношенню до тракту із звичайними EDFA. Це вдалось досягнути за рахунок збільшення доступного підсилення EDFA ФКВ підсилювачів на 57%. Надійність роботи оптичного тракту при використанні ущільненої DWDM сітки з EDFA ФКВ підсилювачами збільшилась майже в 1,6 рази.

Запропоновано архітектуру телекомунікаційної системи передачі на базі ущільненої DWDM сітки і використання ФКВ для систем передачі із швидкістю 25 Тбіт/с. Вкотре доведено, що перехід до вищих порядків модуляції не є виходом для збільшення пропускної здатності оптичних трактів. Використання PM-QPSK модуляції поки що залишається кращим рішенням для телекомунікаційних систем передачі.

Література

1. Cisco. Cisco Visual Networking Index: Forecast and Methodology, 2014-2019 White Paper. [Електронний ресурс] // – Режим доступу: http://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/ip-ngn-ip-next-generation-network/white_paper_c11-481360.html
2. Infinera. Скорость передачи данных по суперканалам в сетях DWDM превышает 100 Гбит/с. [Електронний ресурс] // – Режим доступу : https://www.infinera.com/russian/files/RU-Infinera-DWDM_Networks.pdf
3. F.Musumeci. On the Energy Efficiency of Optical Transport with Time Driven Switching. / F.Musumeci, F. Vismara, V.Grkovic, M.Tornatore, A. Pattavina // IEEE international Conference (ICC'2011) p.1-5.
4. М. Кайдан. Модель Розрахунку Енергоефективності для Електро- та Акустооптичних Пристроїв у Оптичній Транспортній мережі. / М. Кайдан В. Андрушак // In Proceeding of the I International Conference (AICT'2015). - с.171-174.
5. Kery Hinton. Power consumption and energy efficiency in the internet / Kery Hinton, Jayant Baliga, Michael Feng, Robert Ayre and Rodney S.Tucker // IEEE Network. - March/April 2011. - р.6.
6. Трещиков В.Н. Разработка DWDM-системы ёмкостью 25 Тбит/с. / Трещиков В.Н. // Фотон-экспрес. – Март 2013. - №2(106). – с. 24-28.
7. Uma R. Rao. Development of Erbium Doped Fiber Amplifier using Photonic Crystal Fibers as Gain Media. / Uma R. Rao, B.K. Lande // International Journal of Recent Trends in Engineering. – November 2009. – V.12. - №7. – р. 34-36.
8. Peiying Chen. Crystal Fiber Based Erbium Doped Amplifier and Their Gain. / Peiying Chen, Suqin Feng, Lanzhu An, Haixu Song, Ximei Zhao, Conge Xu // International Journal of Future Computer and Communication. June 2012. – V.1. - №1. – р. 40-43.
9. Eugen Lach. Modulation formats for 100G and beyond. / Eugen Lach, Wilfried Idler // Optical Fiber Technology. – 2011. - №17. – р.377-386.
10. Н.В. Гуркин. Производительность когерентных DWDM-систем с канальной скоростью 100 Гбит/с. / Н.В. Гуркин, О.Е. Наний, В.Н. Трещиков, Р.Р. Убайдуллаев // Весник связи. – 2013. - №2. – с. 40-42.
11. Н.В. Гуркин. Оптические когерентные DWDM системы связи с канальной скоростью 100 Гбит/с. / Н.В. Гуркин, В.Н. Трещиков, О.Е. Наний // Фотон-Экспресс. 2014. - №4(116). – с.24-27.
12. М.В. Кайдан. Визначення параметру енергоефективності оптичних транспортних мереж. / М.В. Кайдан, В.С. Андрушак // Системи обробки інформації. – 2016. - В друку.
13. Ed. L. Wooten. A Review of Lithium Niobate Modulators for Fiber-Optic Communications Systems. / Ed. L. Wooten., K. M. Kissa, A. Yi-Yan, Ed. J. Murphy, D. A. Lafaw, P. F. Hellemerer, D. Maack, D.V. Attanasio, D.J. Fritz, G. J. McBrien, D. E. Bossi // IEEE Journal of selected topics in quantum electronics. – 2000. – V.6. - №1. – р. 69-82
14. J.E. Toney. Lithium Niobate Photonics. Artech House. Norwood. – 2015. – р.269.
15. Almaz Optics. Lithium Niobate. [Електронний ресурс] // – Режим доступу : <http://www.almazoptics.com/LiNbO3.htm>
16. FAQHard. Как рассчитать охлаждение CPU. [Електронний ресурс] // – Режим доступу : <http://faqhard.ru/articles/13/11.php>
17. P. Monti. Is green networking beneficial in terms of device lifetime? / P. Monti, J. Chen, J. Lorincz, L.Wosinska // IEEE Communications Magazine. – May 2015. – р.231-240.
18. Cisco. Cisco CRS 16-Slot Single-Shelf System Data Sheet. [Електронний ресурс] // – Режим доступу : http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/CRS-3_16-Slot_DS.html

19. Cisco CRS 100 Gigabit Ethernet Interface Modules Data Sheet. [Електронний ресурс] // – Режим доступу : Режим доступу: <http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/routers/carrier-routing-system/datasheet-c78-730788.html>
20. Cisco. Cisco ONS 15454 Multiservice Transport Platform Data Sheet. [Електронний ресурс] // – Режим доступу : http://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/optical-networking/ons-15454-m12-multiservice-transport-platform-mstp/product_data_sheet09186a00801849e7.html
21. Avara Technologies. EDFA. [Електронний ресурс] // – Режим доступу : <http://www.avaratechnologies.com/products/EDFA.php>
22. Cisco. Cisco ONS 15454 DWDM Reference Manual, Release 9.0. Chapter 9, Transponder and Muxponder Cards. [Електронний ресурс] // – Режим доступу : http://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/optical/15000r9_0/dwdm/reference/guide/454d90_ref/454d90_txrpxcard.html
23. Кись О.М. Проектування волоконно-оптичної транспортної мережі. / Кись О.М., Корнійчук В.І. Навчальний посібник. - Одеса: ОНАЗ ім. О.С. Попова, 2014. – с. 92.
24. Н.Слепов. Фотонно-кристаллическое волокно – уже реальность. Новые типы оптических волокон и их применение. Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2004. - №5. – 80-84.
25. Кайдан М.В. Дослідження структур фотонно-кристалічних волокон для побудови фотонних транспортних мереж / Климаш М.М., Кайдан М.В. Сучасні проблеми телекомунікацій та підготовка фахівців – 2013. Матеріали конференції 30 жовтня-2 листопада 2013 р. – Львів, 2013. – с.211-214

Автори статті

Климаш Михайло Миколайович - доктор технічних наук, професор, професор кафедри “Телекомунікації”, завідувач кафедри “Телекомунікації”, Директор Навчально-технічного центру мережевих технологій, Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна. Тел. +38 050 431 98 07. E-mail: mklimash@lp.edu.ua.

Кайдан Микола Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри “Телекомунікації”, Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна. Тел. +38 098 263 15 34. E-mail: kaidan_k@mail.ru.

Андрушак Володимир Степанович - студент першого курсу магістратури за напрямком “Інформаційні мережі зв'язку” кафедри “Телекомунікації”, Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, Україна. Тел. +38 063 837 16 29. E-mail: volodya1andrushchak@gmail.com

Authors of the article

Klymash Mykhailo Mykolayovych – sciences doctor (technic), professor, professor of telecommunication chair, head of department “Telecommunication”, director training and technical center of network technologies, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. Tel. +38 050 431 98 07. E-mail: mklimash@lp.edu.ua.

Kaidan Mykola Volodymyrovych – candidate of science (technic), assistant professor, assistant professor of telecommunication chair, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. Tel. +38 098 263 15 34. E-mail: kaidan_k@mail.ru.

Andrushchak Volodymyr Stepanovych – student the first course of magistrate in direction “Information networks of communication”, department of “Telecommunication”, Lviv Polytechnic National University, Lviv, Ukraine. Tel. +38 063 837 16 29. E-mail: volodya1andrushchak@gmail.com.

Дата надходження в редакцію: 24.02.2016 р.

Рецензент: д.т.н., проф. Л.Н. Беркман