

УДК 621.372.8

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ С ПОЛЯРИЗАЦИОННЫМ МУЛЬТИПЛЕКСИРОВАНИЕМ

Мазур А.Д., Педяш В.В.

*Одесская национальная академия связи им. А.С. Попова,
65029, Украина, г. Одесса, ул. Кузнечная, 1.
pedyash@onat.edu.ua*

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ОПТИЧНОЇ СИСТЕМИ ПЕРЕДАЧІ З ПОЛЯРИЗАЦІЙНИМ МУЛЬТИПЛЕКСУВАННЯМ

Мазур Г.Д., Педяш В.В.

*Одеська національна академія зв'язку ім. О.С. Попова,
65029, Україна, м. Одеса, вул. Кузнечна, 1.
pedyash@onat.edu.ua*

ESTIMATION OF QUALITY PARAMETERS OF OPTICAL TRANSMISSION SYSTEM WITH POLARIZATION MULTIPLEXING

Mazur A.D, Pedyash V.V.

*O.S. Popov Odessa national academy of telecommunications,
1 Kuznechna St., Odessa, 65029, Ukraine.
pedyash@onat.edu.ua*

Аннотация. Стремительное развитие сети Интернет заставляет операторов связи постоянно расширять свои сети и увеличивать их пропускную способность. На участке сетей абонентского доступа наблюдается постепенный переход от сетей на базе медного кабеля к оптическому волокну. Поэтому задача увеличения скорости волоконно-оптических систем передачи, составляющих основу сетей транспортного участка, постоянно является актуальной. Достижение поставленной цели в современных ВОСП выполняется путем их построения по многоканальному принципу. Для передачи оптических сигналов в каждом канале можно использовать практически любой тип модуляции. Одним из простых методов повышения спектральной эффективности вдвое является поляризационное мультиплексирование канальных сигналов. Данная статья посвящена исследованию влияния параметров оптического сигнала и конфигурации линейного тракта на качественные характеристики канала ВОСП (Q-фактор). В ней выполнено сопоставление двух распространенных на сегодня видов модуляции оптического сигнала: по интенсивности и ФМ-4 с разделением по поляризации (DP-QPSK). На примере ВОСП с модуляцией по интенсивности выполнено сопоставление результатов расчета по аналитическим выражениям и имитационным моделированием. Сопоставление полученных данных показало, что имитационному моделированию соответствуют меньшая величина Q-фактора, поскольку при этом учитываются переходные и передаточные характеристики функциональных блоков ВОСП, а также нелинейные искажения сигнала в оптическом волокне. Сравнение результатов моделирования ВОСП с модуляцией по интенсивности и DP-QPSK доказало преимущества последнего вида модуляции, поскольку позволяет увеличить длину линейного тракта примерно вдвое (с 5 до 10 секций).

Ключевые слова: волоконно-оптическая система передачи, волокно, вероятность ошибки, Q-фактор, ОТН, когерентный прием.

Анотація. Стрімкий розвиток мережі Інтернет змушує операторів зв'язку постійно розширювати свої мережі та збільшувати їхню пропускну здатність. На ділянці мережі абонентського доступу спостерігається поступовий перехід від мереж на базі мідного кабелю до оптичного волокна. Тому завдання збільшення швидкості волоконно-оптичних систем передачі, що становлять основу мереж транспортної ділянки, постійно є актуальною. Досягнення поставленої мети у сучасних ВОСП виконується шляхом їхньої побудови за багатоканальним принципом. Для передавання оптичних

Мазур А.Д., Педяш В.В.

61

сигналів у кожному каналі можна використовувати практично будь-який тип модуляції. Одним із простих методів підвищення спектральної ефективності вдвічі є поляризаційне мультиплексування каналних сигналів. У статті досліджується вплив параметрів оптичного сигналу та конфігурації лінійного тракту на якісні характеристики каналу ВОСП (Q-фактор). У ній порівнюються два розповсюджені на сьогодні види модуляції оптичного сигналу: за інтенсивністю та ФМ-4 з поділом за поляризацією (DP-QPSK). На прикладі ВОСП із модуляцією за інтенсивністю порівнюються результати розрахунків за аналітичними виразами та імітаційним моделюванням. Порівняння отриманих даних показало, що імітаційному моделюванню відповідає менше значення Q-фактора, оскільки при цьому враховуються перехідні та передатні характеристики функціональних блоків ВОСП, а також нелінійні спотворення сигналу в оптичному волокні. Порівняння результатів моделювання ВОСП з модуляцією за інтенсивністю та DP-QPSK довело переваги останнього виду модуляції, оскільки дозволяє збільшити довжину лінійного тракту приблизно вдвічі (з 5 до 10 секцій).

Ключові слова: волоконно-оптична система передачі, волокно, імовірність помилки, Q-фактор, ОTH, когерентне приймання.

Abstract. Rapid development of the Internet requires operators to constantly expand their networks and increase their bandwidth. On the segment of subscriber access networks, a gradual transition from networks based on a copper cable to an optical fiber is carried out. Therefore, the problem of increasing the speed of fiber-optic transmission systems, which is the basis of transport network networks, is always urgent. Achievement of the set goal in modern fiber systems is carried out by constructing them on a multi-channel principle. The transmission of optical signals in each channel is possible with any type of modulation. One of the simple methods for increasing the spectral efficiency is the polarization multiplexing of the channel signals. The influence of the optical signal parameters and the configuration of the linear path on the quality characteristics of the channel of the fiber transmission system (Q-factor) is studied in the article. A comparison is made between the two types of optical signal modulation that are common today: intensity and QPSK with polarization separation (DP-QPSK). For a system with intensity modulation, a comparison is made between the results of calculations for analytical expressions and simulation simulations. Comparison of the data obtained proved that a smaller quantity Q-factor corresponds to the simulation, as this takes into account the transition and transmission characteristics of the transmission system of functional units, and non-linear distortion of the signal in the optical fiber. Comparison of the simulation results with intensity modulation and DP-QPSK proved the advantages of the latter type of modulation, since it allows to increase the length of the linear path by about two times (from 5 to 10 sections).

Key words: optical communication system, fiber, bit error probability, Q-factor, OTH, coherent receiver.

Создание концепций сетей NGN и IMS позволило существенно увеличить количество телекоммуникационных услуг и снизить их себестоимость. Основой этих сетей является транспортная сеть на базе волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) оптической транспортной иерархии (ОTH), позволяющей организовать каналы с линейной скоростью до 112 Гбит/с [1]. С целью повышения технико-экономических параметров транспондеров ОTH следует использовать оптические сигналы с высокой спектральной эффективностью. Одним из вариантов ее повышения является применение поляризационного мультиплексирования в комбинации с простыми методами модуляции, например, по интенсивности или фазовой. В имеющейся литературе рассмотрены физические принципы реализации соответствующих передающих (ПОМ) и приемных (ПРОМ) оптических модулей [2, 3]. Однако вопросы, связанные с влиянием параметров оптического сигнала и волоконно-оптического линейного тракта (ВОЛТ) на качественные характеристики ВОСП детально не рассмотрены.

Поэтому **целью данной статьи** является оценка влияния параметров оптического сигнала и конфигурации ВОЛТ на качественные характеристики ВОСП с поляризационным мультиплексированием.

Для решения задачи оценки качественных параметров ВОСП в данной работе использовались модели, построенные согласно обобщенной структурной схемы (рис. 1) с параметрами, указанным в табл. 1. Ширина спектра излучения современных лазерных излучателей в установленном режиме составляет лишь единицы мегагерц, поэтому в исследованиях данной работы не учитывалась ($\Delta\lambda = 0$ нм).

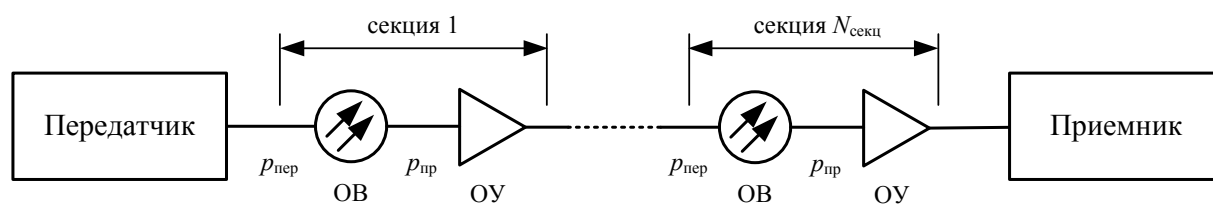


Рисунок 1 – Обобщенная структурная схема канала ВОСП

Таблица 1 – Параметры модели канала ВОСП

Параметр	Значение
Скорость передачи, V	112 Гбит/с
Длина волны оптического сигнала, λ	1550 нм
Ширина спектра излучения лазера, $\Delta\lambda$	0 нм
Коэффициент затухания ОВ, α	0,2 дБ/км
Дисперсия ОВ (G.652), σ_{01}	16,75 пс/(нм·км)
Шум-фактор ОУ, nf	5,5 дБ
Полоса пропускания полосового фильтра приемника, $\Delta\nu_0$	100 ГГц

С целью упрощения методик расчета и моделирования, ВОЛТ состоял из однотипных секций с длиной $L_{ов}$. Ввиду независимости информационных потоков, передаваемых в ортогональных плоскостях поляризации и их отдельной обработки в приемнике ВОСП, поляризационные искажения сигнала в оптическом волокне и усилителях не учитывались. Полная компенсация затухания сигнала в волокне выполнялась в оптическом усилителе (ОУ) с коэффициентом усиления

$$G_{oy} = 10^{0,1\alpha L_{ов}}, \quad (1)$$

где α – коэффициент затухания волокна, помещенного в сердечник оптического кабеля, дБ/км; $L_{ов}$ – длина оптического волокна, км.

В транспондерах современных ВОСП наибольшее распространение получила модуляция по интенсивности (on-off keying, ООК) [4]. Поэтому сначала рассмотрим ее в комбинации с поляризационным разделением для передачи оптического сигнала со скоростью 112 Гбит/с. В передатчике соответствующей ВОСП (рис. 2) входной двоичный сигнал со скоростью V разделяется на два одинаковых цифровых потока при помощи демультиплексора (ДМ), передающихся в двух ортогональных плоскостях поляризации 0° и 90° среды распространения. Формирователь оптического сигнала каждой плоскости поляризации содержит драйвер лазера (ДЛ), который модулирует интенсивность оптического сигнала на выходе лазерного излучателя (ЛИ). Сформированные два оптических сигнала комбинируются в один при помощи объединителя сигналов поляризации (ОСП).

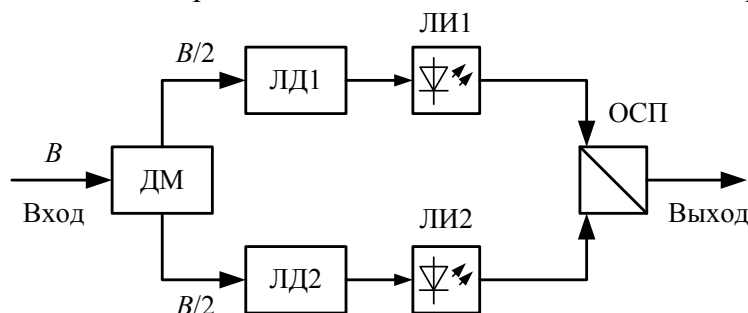


Рисунок 2 – Функциональная схема передатчика ВОСП с модуляцией по интенсивности и разделением по поляризации

Мощность шумов усиленного спонтанного излучения (УСИ) одного оптического усилителя рассчитывается по известной формуле [5]:

$$P_{\text{УСИ}} = 2n_{sp}(G_{\text{оу}} - 1)h\nu\Delta\nu_{\text{о}}, \quad (2)$$

где n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии; $\Delta\nu_{\text{о}}$ – ширина полосы пропускания оптического полосового фильтра ВОСП; h – постоянная Планка ($h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж·с); ν – несущая оптического сигнала.

Для ВОЛТ, состоящего из нескольких одинаковых секций (рис. 1), мощность шума пропорционально увеличивается:

$$P_{\text{УСИ}\Sigma} = P_{\text{УСИ}} N_{\text{секц}}. \quad (3)$$

Критериями качества оптических каналов ВОСП будут выступать стандартные параметры - Q -фактор и вероятность ошибки (BER), вычисленные согласно выражениям [5]:

$$Q = \sqrt{\frac{OSNR \cdot \Delta\nu_{\text{о}}}{\Delta\nu_{\text{е}}}}, \quad (4)$$

и

$$BER \approx \frac{\exp\left(-\frac{Q^2}{2}\right)}{Q\sqrt{2\pi}}. \quad (5)$$

где $OSNR$ – оптическое отношение сигнал/шум на входе приемника ВОСП; $\Delta\nu_{\text{е}}$ – ширина полосы пропускания ТИУ ($\Delta\nu_{\text{е}} \approx 0,75 B$).

В качестве допустимого значения вероятности ошибки будем опираться на $BER = 10^{-12}$, которому соответствует $Q \approx 7$. Рассчитанные параметры качества канала ВОСП с поляризационным мультиплексированием и модуляцией по интенсивности для скорости $B=112$ Гбит/с и длиной оптической секции 100 км показаны на рис. 3, а. Сравнение трех кривых показывает, что для одной оптической секции изменение уровня передачи на 10 дБ приводит к изменению Q -фактора примерно в 3 раза. Увеличение количества секций приводит к существенной деградации параметров качества сигнала. Так, уже при 5 секциях качественный прием сигналов с уровнями мощности -10 и -5 дБм невозможен. Следует отметить, что вышеприведенная методика расчета не учитывает многих других факторов, которые приводят к существенному уменьшению защищенности сигнала на входе приемника ВОСП. Для получения достоверных данных согласно схем рис. 1 и 2 в среде Optiwave Optisystem 7 была разработана соответствующая имитационная модель ВОСП. Полученные с ее помощью результаты (рис. 3, б) существенно отличаются от расчетных, так как моделирование позволяет учитывать нелинейность волокна и реальные характеристики функциональных блоков ВОСП. Моделирование показало, что качественная передача сигнала на 5 секциях ВОЛТ невозможна даже при уровне 0 дБм, так как $Q < 7$.

В современных системах со скоростями 43 Гбит/с (OTU3 OTN) и выше используются также когерентные методы модуляции, обладающие большей помехоустойчивостью. Одним из распространенных методов передачи сигналов со скоростью 112 Гбит/с является фазовая модуляция с поляризационным разделением (Dual-polarization quadrature phase shift keying, DP-QPSK). В передатчике ВОСП (рис. 4) входной поток разделяется на четыре части со скоростью 28 Гбит/с каждый и поступает на вход соответствующего модулятора ФМ-2. Опорное несущее колебание формируется в лазерном излучателе, общем для всех четырех подканалов передачи. Сдвиг плоскости поляризации для подканалов 3 и 4 выполняется во вращателе плоскости поляризации (ВПП). Выходные модулированные сигналы попарно поступают через объединители (О) и ОП на вход ВОЛТ. Приемник когерентных сигналов построен на базе схемы, идентичной описанной ранее в работе [6].

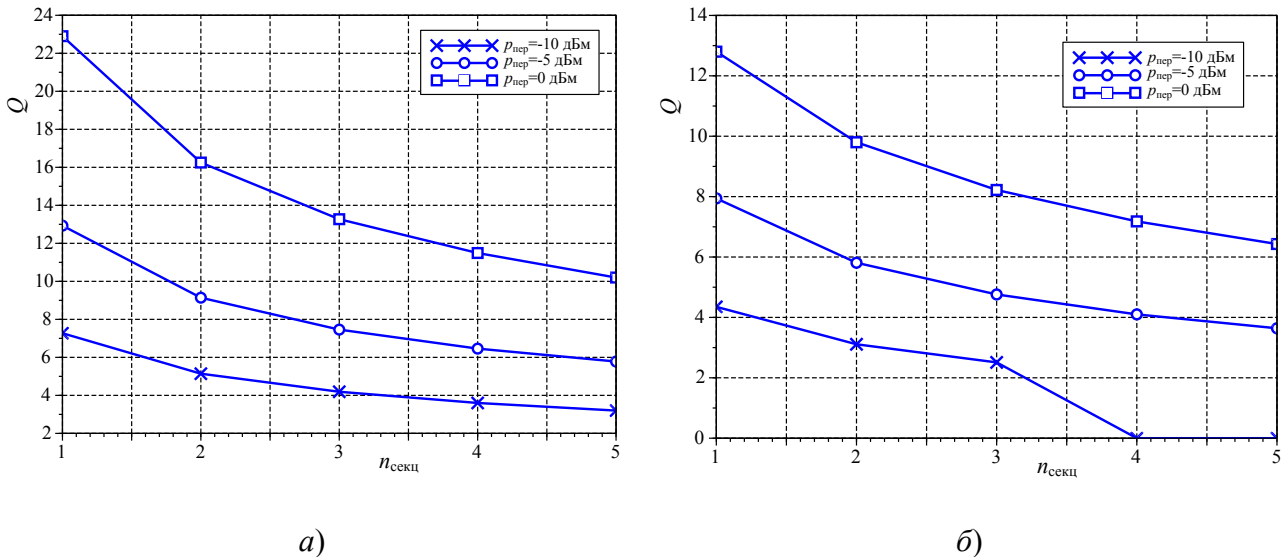


Рисунок 3 - Параметры качества ВОСП с модуляцией по интенсивности и поляризационным разделением сигналов: а) расчетные; б) имитационное моделирование

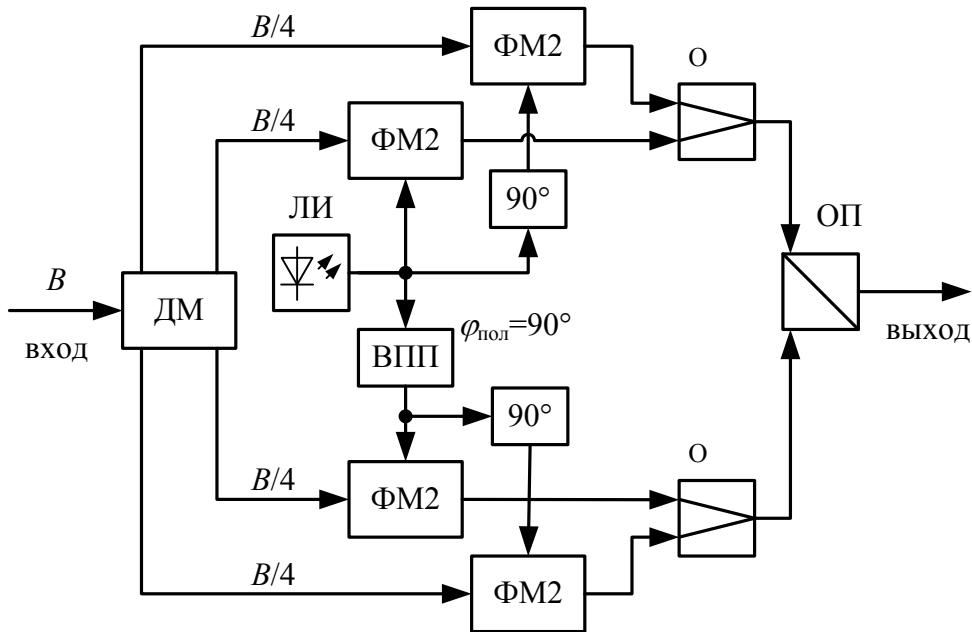


Рисунок 4 – Структурная схема передатчика с модуляцией DP-QPSK

В соответствии с вышеуказанными схемами, в программе Optiwave Optisystem 7 была построена соответствующая имитационная модель ВОСП с модуляцией DP-QPSK. Параметры качества для длин секций 60 и 100 км показаны на рис. 5. Сравнение результатов моделирования для ВОЛТ с одной секцией длиной 100 км (рис. 3, б и 5, б) показало, что варианту использования модуляции DP-QPSK соответствует почти в два раза большая величина Q -фактора ($Q = 22,19$ против $Q = 12,8$ для модуляции по интенсивности). При пяти секциях указанный выигрыш DP-QPSK в два раза также сохраняется. Таким образом, применение модуляции DP-QPSK позволяет увеличить количество секций с 5 до 10 при сохранении допустимых показателей качества.

Следует отметить, что рассмотренные выше методики расчета и моделирования не учитывают особенностей кода Рида-Соломона RS(255,239), применяемого в технологии ОТН согласно рекомендациям ITU-T G.975 и G.709. Данный корректирующий код позволяет исправлять до 8 ошибок в блоке размером 255 байт, содержащем 239 информационных байт. При вероятности ошибки в канале 10^{-15} энергетический выигрыш кодирования составляет 6,2 дБ [5].

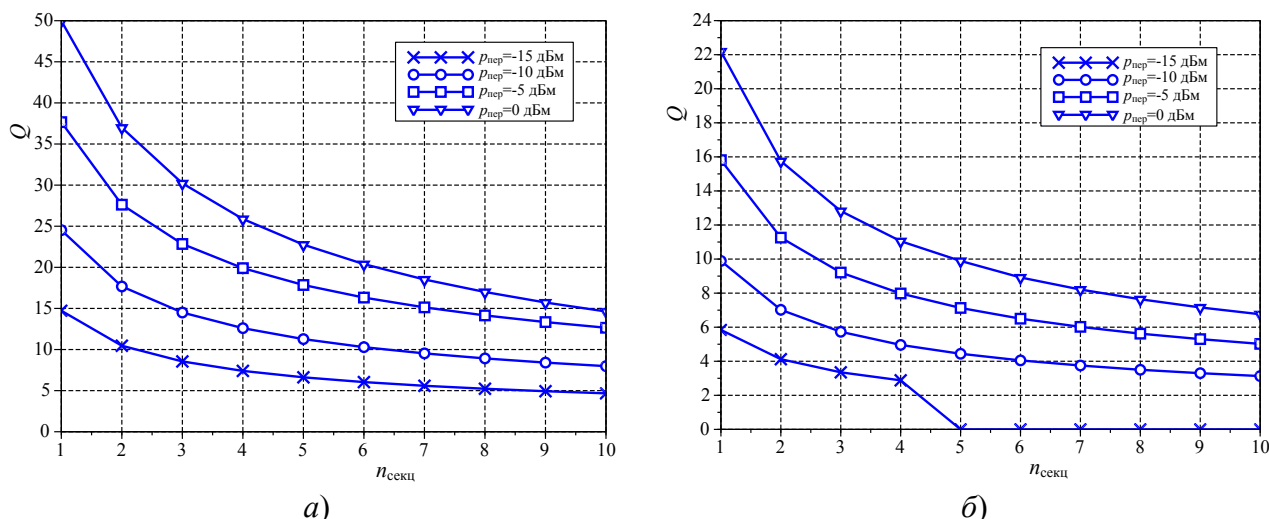


Рисунок 5 – Параметры качества ВОСП с модуляцией DP-QPSK для длин секций 60 км (а) и 100 км (б)

В заключении следует отметить, что поставленная в статье задача исследования влияния параметров оптического сигнала и конфигурации ВОЛТ на качественные характеристики ВОСП с поляризационным мультиплексированием выполнена. На примере передачи сигнала со скоростью 112 Гбит/с в статье выполнено сопоставление модуляций по интенсивности и DP-QPSK в комбинации с поляризационным разделением. Решение поставленного задания выполнялось методами аналитического расчета и численного моделирования. Исследование модуляции по интенсивности показало, что моделирование имеет лучшую точность, поскольку позволяет учесть реальные искажения сигнала в функциональных блоках ВОСП. Сопоставление параметров качества имитационных моделей ВОСП для рассмотренных двух видов модуляции показало, что применение DP-QPSK позволяет увеличить длину тракта примерно в два раза (с 5 до 10 секций длиной 100 км каждая) с сохранением допустимой вероятности ошибки.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Соломенчук В.Д. Оптические транспортные сети / Соломенчук В.Д., Мищенко В.А., Гура К.Н. – К.: Центр последипломного образования ПАО «Укртелеком», 2014. – 294 с.
2. Keang-Po H. Phase-Modulated Optical Communication Systems / H. Keang-Po. – Springer, 2005. – 430 p.
3. Seimetz M. High-Order Modulation for Optical Fiber Transmission / Seimetz M. - Berlin: Springer, 2009. – 252 p.
4. Idler Wilfried. Modulation Formats for 100G and beyond / Lach Eugen, Wilfried Idler // Optical Fiber Technology. – 2011. – № 17. – P. 377–386.
5. Убайдуллаев Р.Р. Протяженные ВОЛС на основе EDFA / Р.Р. Убайдуллаев // Lightwave russian edition. – 2003. – № 1. – С. 22-29.
6. Мазур А.Д. Оценка влияния нелинейных искажений оптического волокна на качественные показатели когерентной ВОСП [Текст] / Мазур А.Д., В.В. Педяш // Наукові праці ОНАЗ ім. О.С.Попова. – 2016. – № 2. – С.131-136.

REFERENCES:

1. Solomenchuk V.D. Opticheskie transportnyye seti / Solomenchuk V.D., Mischenko V.A., Gura K.N. – K.: Tsentr poslediplomnogo obrazovaniya PAO «Ukrtelekom», 2014. Print.
2. Ho, Keang-Po. Phase-modulated Optical Communication Systems. N.p.: Springer, 2005. Print.
3. Seimetz, Matthias. High-order Modulation for Optical Fiber Transmission. Berlin: Springer, 2009. Print.
4. Lach, Eugen, and Wilfried Idler. "Modulation Formats for 100G and beyond." Optical Fiber Technology 17.5 (2011): 377-386. Web.
5. Ubaydullaev R.R. "Protyazhennyye VOLS na osnove EDFA." Lightwave Russian Edition 1 (2003): 22-29. Print.
6. A.D., Mazur, and Pedyash V.V. "Otsenka vliyaniya nelineynykh iskazheniy opticheskogo volokna na kachestvennyye pokazateli kogerentnoy VOSP". Naukovi pratsi ONAZ im. O.S.Popova, 2 (2016): 131–136.