

---

---

## ВОЛОКОННО-ОПТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ІНФОРМАЦІЙНИХ (INTERNET, INTRANET ТОЩО) ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ МЕРЕЖАХ

---

---

УДК 621.315.396

Б.Г. ИБРАГИМОВ, И.М. МАМЕДОВ

### ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПЕРЕДАЮЩЕГО И ПРИЕМНОГО ОПТОЭЛЕКТРОННОГО МОДУЛЯ

*Азербайджанский технический университет  
АЗЕ1073, проспект Г. Джавида, 25,  
г.Баку, Азербайджан*

**Аннотация.** Проанализировано качество функционирования оптических транспортных сетей связи на базе технологии спектрального разделения каналов, использующих передающий и приемный оптоэлектронные модули. На основе исследования предложен метод улучшения показателей волоконно-оптических систем передачи оптической информации и определены основные параметры эффективности и помехоустойчивости оптических транспортных сетей.

**Abstract.** The analyses qualities of functioning of optical transport communication networks on the basis of technology spectral divisions of the channels using transferring and reception optoelectronics of the module. On a basis research the method of improvement of indicators of fiber-optical systems of transfer information is offered and key parameters of efficiency and a noise stability of optical transport networks are defined.

**Ключевые слова:** эффективность, волоконно-оптические линии связи (ВОЛС), оптические терминалы, оптические сигналы, средняя вероятность битовых ошибок приема оптических сигналов, оптические транспортные, оптоэлектронный модуль.

**Key words:** efficiency, optical fiber communication lines, optical terminals, optical signals, average probability bit mistakes reception of optical signals, optical transport networks.

#### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время развитие мультисервисных сетей и систем связи, в условиях интенсивного роста объема передаваемого мультимедийного трафика, требует создания эффективных и помехоустойчивых транспортных волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) с использованием терминальных передающего и приемного оптоэлектронных модулей.

На основе исследований установлено [1, 2], что качества функционирования оптических телекоммуникационных систем существенно зависит от волоконно-оптических систем передачи (ВОСП), оптических средств и волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), базирующихся на WDM/DWDM и HDWDM (Wavelength Division Multiplexing/ Dense WDM&High Dense WDM) технологии для передачи любых видов сообщений практически на любые расстояния с наивысшими скоростями. Однако, ВОЛС с использованием систем спектрального разделения каналов (СРК) для уплотнения оптических волокон является одной из проблем развития мультисервисных сетей следующего поколения NGN (Next Generation Network)

Проведенные анализы показали [2, 3], что для повышения качества функционирования систем передачи оптической информации на базе современных оптических технологий требует создания распределенных ВОЛС и ВОСП с повышенной пропускной способностью.

Для решения таких задач большое внимание уделяется созданию эффективных транспортных систем передачи оптической информации, использующих технологий WDM/DWDM и HDWDM (Wavelength Division Multiplexing/ Dense WDM&High Dense WDM) для организации

телекоммуникационных оптических локальных и транспортных сред, что приобретает большую значимость в системах телекоммуникации.

Таким образом, исследования методов улучшения эффективности и помехоустойчивости оптических сетей телекоммуникации с использованием оптической технологии и анализ информационной эффективности ВОЛС, обеспечивающий качество сервиса QoS (Quality of Service) передачи оптического трафика, являются актуальной задачей.

### ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Известно [3, 4], что с целью повышения качества функционирования волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) необходимо улучшить эффективность всех иерархических сетевых уровней, начиная от физического уровня локальных сетей до транспортных магистральных сетей.

Исследуемая транспортная система передачи оптической информации и ее подсистемы-ВОЛП, ВОК, ВОЛС с использованием приемных и передающих оптических модулей (ПРОМ и ПОМ), работающих в смешанном режиме, функционирует на нижних – физическом, канальном, сетевом и транспортном уровнях эталонной модели взаимосвязи открытых систем (ЭМ ВОС). В [4, 5] проводится сравнение распространенных структур оптических систем передачи информации по качественным и количественным параметрам ВОСП, однако детального анализа их качества функционирования по достижимой эффективности транспортных оптических сетей с использованием технологии СРК-WDM&DWDM не проводилось.

Учитывая вышеизложенное, математическая формулировка задачи качества функционирования транспортных оптических сетей с использованием терминального передающего и приемного оптоэлектронного модуля на базе WDM&DWDM – технологий может быть представлена следующей целевой функцией:

$$Q_{\text{кф}} = \arg \max_i [E_{i,\text{эф}}], \quad i = \overline{1, n} \quad (1)$$

при следующих ограничениях

$$P_{\text{ср.ош}} \leq P_{\text{ср.ош.доп.}}, \quad G_i \leq G_{i,\text{доп.}}, \quad C_{i,\text{ап}} \leq C_{i,\text{ап.доп.}} \quad (2)$$

где  $C_{\text{ап}}$  – стоимость линий передачи оптической информации и программно-аппаратных средств ВОЛС на основе оптических абонентских терминалов;  $G_i$  – коэффициент усиления оптического сигнала,  $i = \overline{1, n}$  (где  $n$  – число волоконно-оптических усилителей в ВОЛС.);  $P_{\text{ср.ош}}$  – средняя вероятность битовых ошибок.

Исследуются методы улучшения качества функционирования транспортных оптических сетей, использующих передающий и приемный оптоэлектронные модули на базе WDM&DWDM – технологий.

### СХЕМА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИССЛЕДУЕМОЙ ЗВЕНА ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

На основе системно-технического анализа [2,3] установлено, что для построения оптических транспортных сетей связи, требуются создание ВОЛС с ПРОМ и ПОМ, позволяющих выделять из многоканального сигнала оптические сигналы с определенными длинами волн  $\lambda_i = \lambda_1, \dots, \lambda_n$  и вводить вместо них другие с теми же длинами волн  $\lambda_i$ . Все остальные передающие сигналы приходят через эти устройства без каких-либо преобразований.

Учитывая вышеизложенное, предлагается схема функционирования исследуемого звена оптической транспортной сети, показанная на рис.1., которая является структурно-функциональной схемой ВОСП со спектральным разделением (WDM и DWDM) каналов.

Из схемы следует, что ВОСП предназначенная для однонаправленной передачи информации по волоконно-оптическим кабелям (ВОК) оптических сигналов, состоит из оборудования формирования многоканального сигнала (ОФМС), ПОМ и ПРОМ, которые обеспечивают формирование, обработку и передачу оптических сигналов. В ее состав также входит устройство спектрального мультиплексирования (УСМ), осуществляющее ввод различных оптических несущих в ВОК, и устройство спектрального демультиплексирования (УСДМ) оптических несущих.

ВОЛС предназначены для передачи цифровых оптических сигналов, несущих информацию от передающего оптического модуля (ПОМ) к приемному оптическому модулю (ПРОМ) с помощью оптоэлектронных каналов.

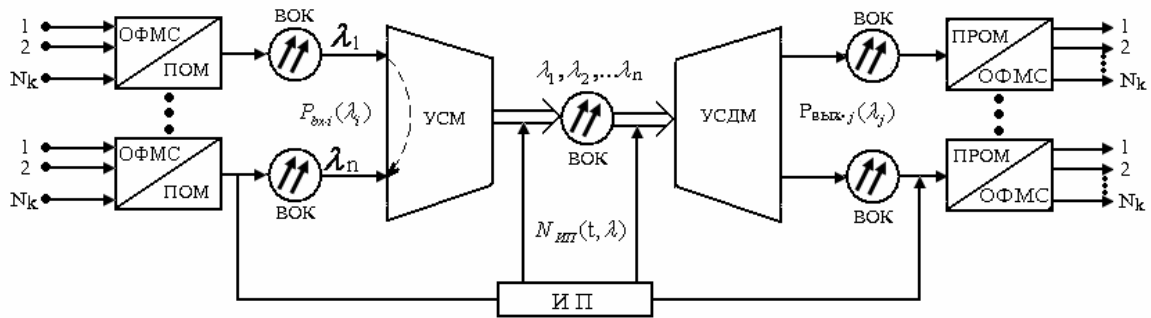


Рис.1. Структурно-функциональная схема функционирования исследуемого звена оптических транспортных сетей, использующих WDM и DWDM-технологии

Алгоритм работы схемы функционирования исследуемого звена оптических транспортных сетей основывается на том, что на передающей станции имеется  $n$  – ПОМ, т.е. оптических передатчиков, излучающих различные оптические несущие  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}, \lambda_n$ . С помощью УСМ производится ввод различных оптических сигналов в ВОК, при этом на входе УСДМ получаем:

$$S(t, \lambda_i) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} U[a_j \cdot U_m(t - j\Delta T)] + N_{шп}(t, \lambda), \quad (3)$$

где  $a_j$  – коэффициент равный 0 при передаче «0» или 1 при передаче «1»;  $U_m$  – амплитуда передаваемого оптического сигнала;  $N_{шп}(t, \lambda)$  – источник помехи в момент времени  $t$ , который представляет собой узкополосные квазигармонические колебания шумов со случайными параметрами.

#### АНАЛИЗ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВОЛС

Предварительные исследования способствовали формулированию нового подхода к решению поставленной выше задачи – анализа качества функционирования исследуемого звена оптических транспортных сетей. В данном решении физической средой для передачи оптических сигналов являются одномодовые ВОК и создаваемые на их основе ВОЛС, использующие WDM и DWDM-технологии с длиной волн  $\lambda_i = (1.31, \dots, 1.55)$  мкм. Совокупность ВОСП и ВОЛС образуют волоконно-оптические линии передачи, которые являются основными подсистемами оптических транспортных сетей связи, обеспечивающими управления передачей и маршрутизацией оптической информации. Здесь, важной подсистемой является УСМ, т.е. мультиплексор WDM и DWDM, пространственно объединяющий при передаче компонентные сигналы в агрегатный.

Качество функционирования мультиплексора WDM и DWDM при создании спектральных каналов связи характеризуется переходным затуханием на ближнем конце  $Z_{om}(\lambda_i)$ , которое оценивает переходные влияния, возникающие в оптических мультиплексорах ввода/вывода (Optical Add/Drop Multiplexer - OADM), и определяется соотношением

$$A_{om}(\lambda_i, p_{ex}, G_{yc}) = \min_{i \neq j} \{10 \lg [p_{ex.i}(\lambda_i) / p_{ex.j}(\lambda_i)]\}, i = \overline{1, n} \quad (4)$$

где  $p_{ex.i}(\lambda_i)$  – мощность сигнала с длиной волны  $\lambda_i$  на входе  $i$ -го оптического порта оптического мультиплексора ввода;  $p_{ex.j}(\lambda_i)$  – мощность сигнала с длиной волны  $\lambda_i$  на  $j$ -го входном порте оптического мультиплексора ввода,  $i \neq j$ ;  $G_{yc}$  - коэффициент усиления слабого оптического сигнала, необходимого в подсистемах мультиплексирования по длине волны (WDM и DWDM).

В современных системах WDM и DWDM используются ВОК с ненулевой смещенной дисперсией (NZ-DSF), удовлетворяющие рекомендации ITU-T G.655 [5]. При этом мощность усиленного излучения выходного сигнала  $p_{вых}(\lambda_i)$  УСМ определяется формулой

$$G_{yc}(\lambda_i) = \frac{\eta_{кэ}(\lambda_i)}{h \cdot \nu} \cdot p_{вых}(\lambda_i) \cdot N_{sp}^{-1} + 1, \quad (5)$$

где  $N_{sp}$  – коэффициент спонтанной эмиссии;  $\eta_{кэ}(\lambda_i)$  – квантовая эффективность линейных волоконно-оптических усилителей, которая выражается следующим образом:

$$\eta_{кэ.i}(\lambda_i) = p(\lambda_i) \cdot \frac{1,24I_{ft}}{\lambda_i} < 1, \quad (6)$$

где  $I_{ft}$  – фототок оптического мультиплексора;  $p_n(\lambda_i)$  – полная оптическая мощность излучения на длине волны  $\lambda_i$ .

### ЭФФЕКТИВНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ВОЛС, ИСПОЛЬЗУЮЩИХ ОПТИЧЕСКИЕ ПРИЕМНИКИ ОПТОЭЛЕКТРОННОГО КАНАЛА СВЯЗИ

Из схемы рис.1. следует, что с помощью УСМ производится ввод различных несущих в ВОК на длине волны  $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ . На приемной стороне в УСДМ оптические несущие разделяются и подаются на оптические приемники (ПРОМ) и далее на ОФМС. Таким образом, по одному ВОК организуется n-спектрально разделенных оптических каналов.

На основе WDM и DWDM-технологии организации оптических спектральных каналов пропускная способность ВОСП с использованием ПОМ и ПРОМ оптоэлектронного канала определяется следующим образом [6]:

$$C_{max}^{op}(\lambda_i) = \sum_{i=1}^n V_{i.nc}(\lambda_i) \cdot N_{i.k} \cdot L_{i.OB}(\lambda_i), \quad (7)$$

где  $N_{i.k}$  – предельное количество организуемых спектральных оптических каналов;  $L_{i.OB}(\lambda_i)$  – количество оптических волокон в ВОК, в том числе резервных на длине  $\lambda_i$ ;  $V_{i.nc}(\lambda_i)$  – предельная скорость передачи оптических сигналов при конкретной длине  $L_{ВОК}$  участка регенерации, которая определяется типом оптического волокна и характеристиками ПОМ и ПРОМ оптоэлектронного канала.

Известно [4, 5], что эффективное использование пропускной способности ВОЛС на базе WDM и DWDM-технологии существенно зависит от оптического соотношения сигнал/шум ( $OSNR_{вых}$ ) и определяется выражением:

$$OSNR_{вых}(\lambda_i) = 0,5 p_{ex.i}(\lambda_i) \cdot (h\nu \cdot \Delta f \cdot N_y \cdot N_{ns})^{-1} / G_{yc}(\lambda_i) \quad (8)$$

Выражения (7) и (8) являются количественной и качественной характеристиками исследуемого звена оптических транспортных сетей, использующих WDM и DWDM-технологии

### АНАЛИЗ КАЧЕСТВА СВЯЗИ ОПТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СЕТЕЙ

Важнейшей рабочей характеристикой действующей оптической транспортной системы передачи информации, определяющей качество сетей связи, является средняя вероятность битовых ошибок. Причин возникновения ошибок много, но основными из них являются помехи оборудования оптического линейного тракта, дисперсионные явления в оптическом волокне, межсимвольные помехи, сбои в работе устройств тактовой синхронизации линейных и станционных регенераторов, а также помехи переходов между спектральными каналами  $Z_{пер}(\lambda_i)$  в ВОСП со спектральным разделением (технология WDM и DWDM).

Для практических случаев определения вероятности ошибки ПРОМ допускают, что шумы на входе решающего устройства фотоприемника имеют нормальное распределение и описывается следующим выражением:

$$N(\lambda, i_n, t) = \frac{1}{\sigma_n(t)\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left[-\frac{i_n^2}{2\sigma_n^2(t)}\right], \quad (9)$$

где  $i_n$  и  $\sigma_n(t)$  мгновенное и среднеквадратическое значения суммарного тока помехи в момент времени t, на входе порогового устройства ПРОМ.

Прохождение цифрового оптического сигнала по оптическому транспортному тракту

сопровождается появлением ошибок, когда вместо «1» (наличие оптического излучения) фиксируется «0» (отсутствие излучения) и наоборот. Процесс регистрации символов «1» или «0» информационной последовательности  $p(1)$  и  $p(0)$  при наличии помех характеризуется средней вероятностью битовых ошибок  $P_{cp.oui}$  и определяется суммой:

$$P_{cp.oui} = 0,5[p(0)p(0/1) + p(1)p(1/0)], \quad (10)$$

где  $p(0/1)$  – вероятность трансформации под действием помехи «0» в «1»;  $p(1/0)$  – вероятность трансформации под действием помехи «1» в «0».

Анализ качества работы оптических транспортных сетей связи показал [4,5], что ошибочная регистрация символа информационной последовательности возможна при определенных соотношениях между значениями тока  $i_n$  и порогового тока  $I_n$  порогового устройства ПРОМ. С учетом последних предположений (9) и (10) средняя вероятность битовых ошибок может быть определена по формуле

$$P_{cp.oui} = \frac{1}{\sigma_n(t)\sqrt{2\pi}} \cdot \int_{I_n}^{\infty} \exp\left[-\frac{i_n^2}{2\sigma_n^2(t)}\right] di_n = 0,5 \operatorname{erfc}\left(\frac{I_n}{\sqrt{2}} \cdot \sigma_n^{-2}\right), \quad (11)$$

где  $\operatorname{erfc}$  –дополняющий интеграл ошибки, значения которого табулированы [6].

Выражения (10) и (11) определяют один из важных показателей помехоустойчивости одномодовых оптических транспортных сетей связи, использующих терминальные передающий и приемный оптоэлектронные модули на базе WDM и DWDM.

Из алгоритма работы следует, что большая часть мощности оптического излучения с длиной волны  $\lambda_i$  распространяется по  $i$  – му оптическому каналу ВОСП-СРК. Однако часть мощности оптического излучения УСДМ на этой длине волны  $\lambda_i$ , может появиться на выходах других оптических каналов как переходная помеха, паразитное влияние на качество связи которой оценивается переходным затуханием на дальнем конце, и определяется следующим образом:

$$Z_{пер}(\lambda_i) = \min 10 \lg \frac{p_{ex.i}(\lambda_i)}{p_{вых.j}(\lambda_j)}, \quad j = \overline{1, N_k}, \quad i \neq j, \quad i = \overline{1, n}, \quad (12)$$

где  $p_{ex.i}(\lambda_i)$  – мощность сигнала с длиной волны  $\lambda_i$  на входе оптического демультиплексора (ОДМ);  $p_{вых.j}(\lambda_j)$  – мощность сигнала с длиной волны  $\lambda_j$  на выходе оптического канала.

Для оценки качества функционирования ВОЛС на основе полученных аналитических выражений проведены численные расчеты с помощью системы MATLAB 7.0 и её пакетов Signal Processing Communications [7] и получены следующие результаты:  $\lambda_i = 1,31$  мкм,  $V_b \geq 622$  Мбит/с,  $L_{max} = (80 \div 160)$  км,  $OSNR_{вых}(\lambda_i) \geq (6, \dots, 6,48)$  dB,  $C_{max}^{op}(\lambda_i) = 12,44$  Гбит/с и  $P_{cp.oui} \leq (10^{-9} \div 10^{-10}) \leq P_{cp.oui.доп}$ . Из численных расчетов следует, что полученный результат удовлетворяет заданным требованиям рекомендации ITU-T, G.694 [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате исследования качества функционирования систем передачи оптической информации предложен метод, учитывающий эффективность и помехоустойчивость оптических транспортных сетей связи на базе современных WDM и DWDM-технологий.

На основе предложенного метода получены аналитические выражения, позволяющие оценить показатели ВОЛС на базе WDM и DWDM-технологий при передаче различных сигналов – телефонии, телевидения, телеметрии, передачи данных с различными скоростями и типами модуляции, которые обеспечивают создание экономичных многофункциональных телекоммуникационных транспортных систем.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гитин В.Я., Кочановский Л.Н. Волоконно-оптические системы передачи. Москва.: Радио и Связь. 2003. – 128с.
2. Гринфильд Д. Оптические сети. Киев.: ООО «ТИД» «ДС», 2002. - 256с.
3. Педяш В.В. Влияние параметров оптических волокон на отношении оптических сигналов/

- /шум в ВОСП-СРК // Научные труды ОНАС им.О.С.Попова. – 2011. - № 1. – С.21-26.
4. Ибрагимов Б.Г., Мамедов И.М. Эффективность волоконно-оптических линий связи с использованием WDM/DWDM технологий // Труды конференции «Телекоммуникационные и вычислительные системы» Москва, МТУСИ, 2009. с.179-180.
  5. Корнейчук В.И., Панфилов И.П. Волоконно-оптические системы передачи. – Одесса. Изд-во «Друг». 2001. – 436с.
  6. Мамедов Г.А., Ибрагимов Б.Г. Про один підхід оцінки пропускної здатності ланки мультисервісних мереж зв'язку // Optoelektronik International – Power Technologies. № 1 (17), Вінн.Нац.Тех.Уні. 2009. – с.225 – 228.
  7. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. Учебник для вузов. 2-е изд. – СПб.: Питер, 2007. – 751с.

Надійшла до редакції 16.06.2012р.

**ИБРАГИМОВ Б.Г.** – доктор технических наук, профессор кафедры «Многоканальные телекоммуникационные системы» Азербайджанского Технического Университета, Баку, Азербайджан.

**МАМЕДОВ И.М.** – диссертант кафедры «Многоканальные телекоммуникационные системы» Азербайджанского Технического Университета, Баку, Азербайджан.