

**РЕСУРСЫ ПЕРЕОБОРУДОВАНИЯ НА WDM**

**РЕСУРСИ ПЕРЕОБЛАДНАННЯ НА WDM**

**THE RESOURSTS OF CONVERSION TU WDM**

**Аннотация.** Рассматриваются факторы, позволяющие увеличить эффективность переоборудования существующих линий передачи с SDH на WDM, приводятся оценки результатов оптимизации уровня передачи.

**Анотація.** Розглядаються фактори, які дозволяють збільшити ефективність переобладнання існуючих ліній передачі з SDH на WDM, наводяться оцінки результатів оптимізації рівня передачі.

**Summary.** We considered the causes which allowed to increase the efficiency of conversion of existing transmission lines from SDH to WDM. Besides we performed evaluation of results of optimization of transmission level.

**Проблема** повышения эффективности функционирования транспортных участков телекоммуникационной сети решается сегодня многими операторами за счёт использования волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) с технологией волнового мультиплексирования – WDM [1] (спектрального разделения каналов – СРК). Эта технология является основой транспортной составляющей сети следующего поколения – NGN [2].

Внедрение СРК осуществляется двумя путями:

- путём строительства новых волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) и установки соответствующего оборудования;
- путём переоборудования уже существующих одноканальных ВОСП-ОК с SDH на ВОСП-СРК (WDM).

Для «старых» операторов, таких как Укртелеком, имеющих уже сложившуюся, разветвленную сеть, внедрение WDM логично осуществлять путём замены существующих одноканальных ВОСП-ОК, работающих на волоконно – оптическом кабеле (ВОК) с оптическими волокнами (ОВ) типа SF (рекомендация G.652).

Увеличение количества оптических каналов (ОК) требует увеличения уровня передачи группового сигнала WDM, чтобы сохранить требуемую защищённость сигнала от помех. Увеличение уровня передачи приводит к появлению нелинейности в ОВ и, как следствие, возникновению различных нелинейных эффектов, главный из которых – четырёхволновое смешивание (ЧВС) – причина ухудшения защищённости канальных сигналов WDM. Это обстоятельство ограничивает допустимое количество оптических каналов ОК.

Однако, в литературе отсутствуют исследования по выбору оптимального уровня передачи, численные оценки этого оптимума и рекомендации по увеличению количества оптических каналов  $N_{ок}$ .

**Целью статьи** является определение ресурсов, позволяющих увеличить допустимое количество оптических каналов  $N_{ок}$  при переоборудовании ВОЛС-ОК на ВОСП-СРК.

Изменение количества оптических каналов  $N_{ок}$  влияет на защищённость сигнала от помех, поэтому необходимо контролировать **запас по защищённости (NM)** так, чтобы он был или заданной величины, или  $NM \geq 0$ .

**Запас по защищённости (NM)** определяется как разность:

$$NM = A_{ож-оп} - A_{доп-оп} \quad (1)$$

Здесь  $A_{доп-оп}$  – *допустимая оптическая защищённость*, которая зависит от допустимой вероятности ошибки.

$A_{ож-оп}$  – *ожидаемая оптическая защищённость*, которая определяется фактическими шумами линейного тракта ЦСП.

Обозначим  $A_1$  – ожидаемую защищённость от *нелинейных* помех регенерационной секции;  $A_2$  – ожидаемую защищённость от суммарного действия *всех других* помех регенерационной секции.

Тогда ожидаемая оптическая защищённость от совместного действия всех шумов регенерационной секции равна

$$A_{\text{ож-оп}} = 10 \times \lg \left[ \frac{1}{10^{-0,1A_1} + 10^{-0,1A_2}} \right]. \quad (2)$$

Оптическая  $A_{\text{оп}}$  и электрическая  $A_{\text{эл}}$  защищённости связаны соотношением [3]

$$A_{\text{оп}} = 0,5 A_{\text{эл}}, \quad (3)$$

Будем, в соответствии с [4], ориентироваться на численные значения

$$A_{\text{доп-эл}} = (24...26) \text{ дБ.}$$

Поэтому

$$A_{\text{доп-оп}} \approx 13 \text{ дБ.} \quad (4)$$

Допустимое количество оптических каналов ОК –  $N_{\text{ок}}$  определяется из уравнения (1) с учётом

$$(2) A_{\text{ож-оп}} = A_{\text{доп-оп}} + NM, \text{ т.е. } \lg[10^{-0,1A_1} + 10^{-0,1A_2}] = -0,1(A_{\text{доп-оп}} + NM). \text{ Поэтому}$$

$$10^{-0,1A_1} + 10^{-0,1A_2} = 10^{-0,1(A_{\text{доп-оп}} + NM)}. \quad (5)$$

Используем уравнение (5) для определения величины  $N_{\text{ок}}$  от параметров исходного и переоборудованного трактов. Для этого конкретизируем факторы, определяющие защищённости  $A_1$  и  $A_2$ .

Защищённость от нелинейных помех  $A_1$  является следствием четырёхволнового смешения [5], которое представляет собой продукты нелинейности третьего порядка. Для оценки защищённости сигнала от этих нелинейных помех, воспользуемся зависимостями, приведенными, например, в [6] для группового сигнала со сплошным энергетическим спектром. Можно полагать, что использование этих зависимостей даёт «оценку сверху» величине защищённости сигнала WDM, энергетический спектр которого только разновидностей DWDM и HDWDM приближается к сплошному.

$$A_1 = A_{10} - A_F \lg(n_{\text{уч}}) - 2p_W - 20 \lg(N_{\text{ок}}). \quad (6)$$

Здесь  $p_W$  – уровень мощности группового многоканального сигнала WDM;  $A_F$  – коэффициент, зависящий от рода нелинейных помех (1 или 2), которые определяются величиной дисперсии оптического волокна (ОВ) волоконно-оптического кабеля (ВОК);  $n_{\text{уч}}$  – количество пролётов на секции. При малых величинах дисперсии ОВ суммирование продуктов нелинейности ведётся по напряжению, а для больших значений дисперсии ОВ – суммирование по мощности, поэтому во 2-м окне прозрачности

$$A_F = \begin{cases} 10 - \text{ для ОВ типа SF,} \\ 20 - \text{ для ОВ типа DSF.} \end{cases}$$

$A_{10}$  – коэффициент, зависящий от величины нелинейных помех при  $N_{\text{ок}} = 1$ ,  $n_{\text{уч}} = 1$  и уровне передачи группового сигнала WDM  $p_W = 0$  дБ (в [6]  $A_{10}$  называют «затуханием нелинейности» при уровне передачи  $p_W = 0$  дБ).

В [7] приведены расчёты величин продуктов нелинейности шестнадцатиканальной ВОСП – WDM на секции из восьми одинаковых пролётов с ОВ типа SF и DSF. Используя эти данные, а также (6), определяем значение коэффициента  $A_{10}$  для третьего окна прозрачности

$$A_{10} = \begin{cases} 57,8 \text{ дБ} & \text{ для ОВ типа DSF,} \\ 73,8 \text{ дБ} & \text{ для ОВ типа SF.} \end{cases}$$

Ожидаемая оптическая защищённость ( $A_2$ ) от результирующего действия всех, кроме нелинейных, помех регенерационной секции определяется [3]:

– шумами спонтанного лучеиспускания, если в линейном тракте используются оптические усилители ЛОУ или ПОУ;

– шумами приёмного оптического модуля ПРОМ, т.е. шумами созданными приёмником излучения (ПИ) в процессе прохождения и преобразования оптического сигнала в электрический (это дробовые шумы p-i-n фотодетектора ФД или лавинного фотодетектора ЛФД); тепловыми шумами входных цепей регенератора (сопротивления нагрузки  $R_n$  и усилителя).

При первоначальном проектировании необходимо учитывать все эти виды помех.

При переоборудовании ВОСП-ОК на ВОСП-СРК можно считать, что все эти помехи были учтены при определении номинальной длины секции и для одноканального варианта выбраны оптимальные режимы работы. В этом случае  $A_{доп} = A_{доп-оп}$ , если фактическая длина усилительного участка (секции) совпадает с номинальной. Однако при переходе к WDM уровни передачи одного ОК и группового сигнала не совпадают. Как правило, фактическая длина секции (которая теперь может стать длиной пролёта) меньше номинальной. Ниже приведено выражение, для  $A_2$ , которое учитывает все эти отклонения.

$$A_2 = A_{доп-оп} + \Delta A_{уч} + \Delta p_{пер1} - a_T \left[ \frac{10^{(n_{уч}-1)} - 1}{10^{(n_{уч}-1)}} \right] - 10 \lg(n_{уч}). \quad (7)$$

Здесь  $\Delta A_{уч}$  – запас по затуханию

$$A_{уч} = (a_n l_n - a_{уч} l_{уч}), \quad (8)$$

где  $l_n$  и  $l_{уч}$  – номинальная и фактическая длины участка регенерации переоборудуемой ВОСП – SDH;  $\alpha$  – коэффициенты затухания ОВ, соответствующие  $l_n$  и  $l_{уч}$ ;  $\Delta p_{пер1}$  – изменение уровня сигнала одного оптического канала WDM на входе усилительного участка ( $p_{пер-1}$ ) по сравнению с уровнем передачи одноканальной ВОСП – SDH ( $p_s$ ) предшествующей WDM:

$$\Delta p_{пер-1} = p_{пер-1} - p_s. \quad (9)$$

Обычно, исходными данными при проектировании задается уровень  $p_w$  (дБ) группового многоканального WDM сигнала на входе усилительного участка.

Тогда

$$p_{пер-1} = p_w - 10 \lg(N_{ок}),$$

$$\Delta p_{пер-1} = p_w - 10 \lg(N_{ок}) - p_s,$$

т.е.

$$\Delta p_{пер-1} = \Delta p_{пер-w} - 10 \lg(N_{ок}), \quad (10)$$

где  $\Delta p_{пер-w} = p_w - p_s$ .

При переоборудовании терминальный мультиплексор SDH (SMT) заменяется на терминальный мультиплексор WDM. Замена мультиплексора SDH ввода/вывода (SMA) при переходе к WDM может осуществляться по разному (см. рис. 1) с использованием:

- двух терминальных мультиплексоров или
- оптического мультиплексора ввода/вывода (OADM).

В первом случае цифровые сигналы всех оптических каналов (ОК) регенерируются, поэтому при такой замене участок регенерации SDH заменятся на регенеративную секцию WDM.

Во втором случае регенерируются только сигналы тех ОК, которые выделяются в данном сетевом узле, а остальные транзитом проходят дальше. Мультиплексное оборудование OWDM для транзитных каналов – аналоговое. Оно может быть

- пассивным с затуханием  $a_T$  или
- активным, если дополнительно в точке транзита устанавливается оптический усилитель (ОУ).

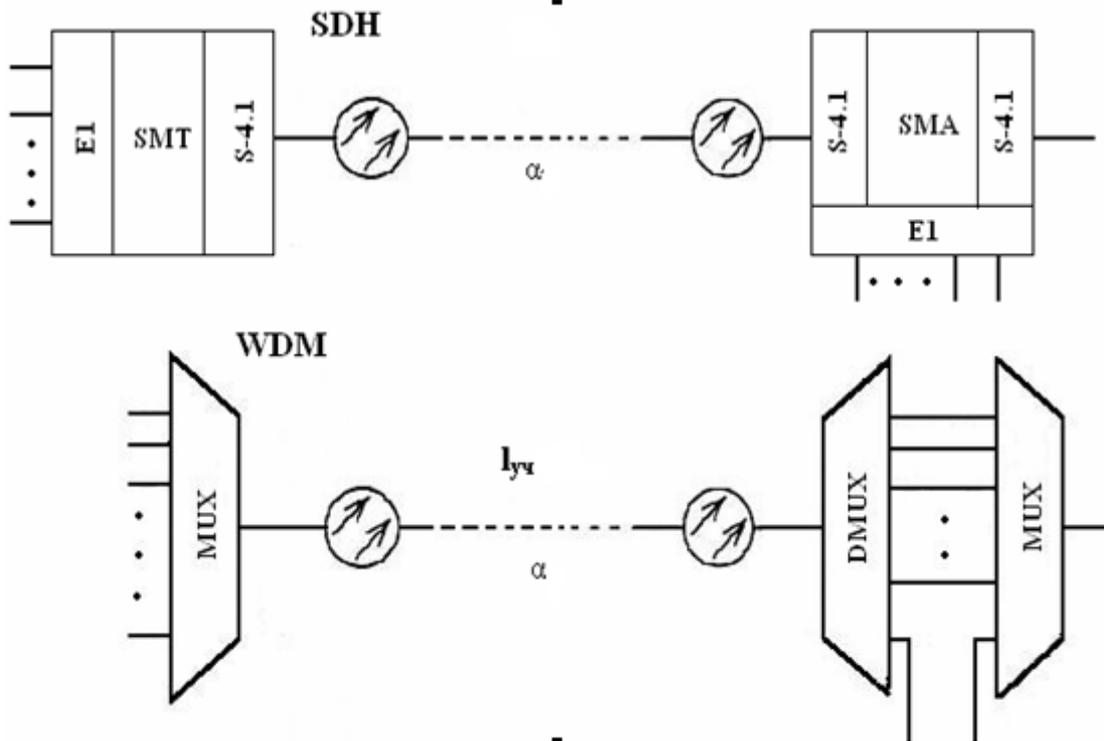


Рисунок 1 – Фрагменты линий передачи ВОСП- SDH и линии, переоборудованной на ВОСП–WDM

Для таких транзитных каналов с ОУ регенеративный участок SDH заменяется на усилительный участок (пролёт) WDM с увеличенным на  $a_T$  затуханием. Результирующее затухание такого пролёта компенсируется усилением ОУ, однако при этом увеличиваются шумы и соответственно уменьшается защищённость  $A_2$  как за счёт увеличенного на  $a_T$  затухания пролёта, так и за счёт накопленного ОУ шума.

Выделим в полученных выражениях для защищённостей  $A_1$  и  $A_2$  слагаемые, зависящие от количества оптических каналов  $N_{ок}$ :

$$A_1 = \Delta A_1 - 20 \lg(N_{ок}), \quad (11)$$

где

$$\begin{aligned} \Delta A_1 &= A_{10} - A_F \lg(n_{уч}) - 2p_W, \\ A_2 &= \Delta A_2 - 10 \lg(N_{ок}), \end{aligned} \quad (12)$$

где

$$\Delta A_2 = A_{доп-оп} + \Delta A_{уч} + \Delta p_{пер-w} - a_T \left[ \frac{10^{(n_{уч}-1)} - 1}{10^{(n_{уч}-1)}} \right] - 10 \lg(n_{уч}).$$

Подстановка (11) и (12) в (5) приводит к уравнению

$$a \times N_{ок}^2 + b \times N_{ок} + c = 0, \quad (13)$$

решение которого

$$N_{ок} = \frac{-b \pm [b^2 - 4ac]^{0.5}}{2a} \quad (14)$$

определяет достижимое количество оптических каналов  $N_{ок}$ .

Здесь  $a = 10^{-0,1\Delta A_1}$ ;  $b = 10^{-0,1\Delta A_2}$ ;  $c = -10^{-0,1(NM + A_{доп-оп})}$ .

Приведенные соотношения определяют ресурсы, использование которых позволяют увеличить количество оптических каналов  $N_{ок}$  внедрением WDM.

Таковыми ресурсами являются:

- уменьшение допустимой защищённости  $A_{доп-оп}$  корректирующими кодами;
- переход из 2-го ( $\alpha_2$ ) в 3-е ( $\alpha_3 < \alpha_2$ ) окно прозрачности;

– увеличение запаса по затуханию  $\Delta A_{уч}$ , которое можно реализовать с помощью оптических усилителей (ОУ), если величины  $\Delta A_{уч}$  за счёт меньших, по сравнению с номинальными, значений  $l$  и  $\alpha$  – недостаточно.

На рис. 2 и 3 приведены, в качестве примера, значения  $N_{ок}$ , рассчитанные по (14) для секции без пролётов (кривая 1, рис. 2,) и с различными значениями пролётов  $n_{уч}$  (остальные кривые рис 2 и 3).

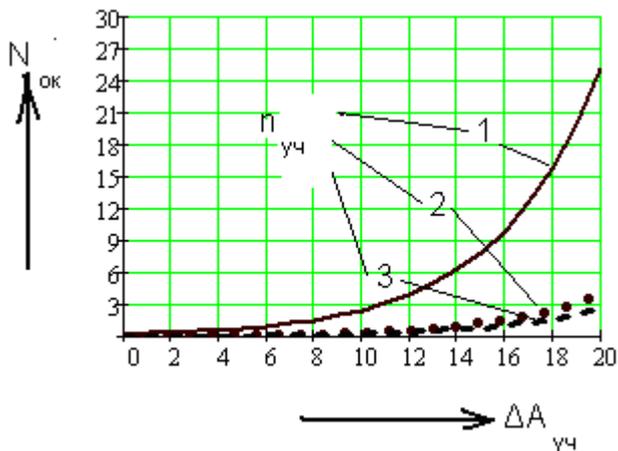


Рисунок 2 – Зависимость  $N_{ок}$  для малых значений  $n_{уч}$

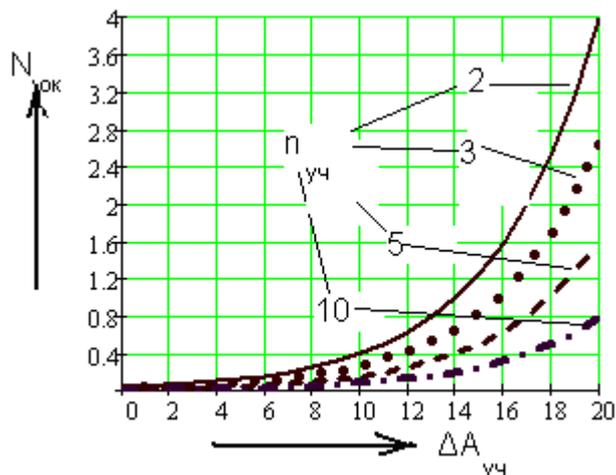


Рисунок 3 – Зависимость  $N_{ок}$  для больших значений  $n_{уч}$

При переходе из 2-го ( $\alpha_2$ ) в 3-е ( $\alpha_3 < \alpha_2$ ) окно прозрачности ОВ типа SF

$$\Delta A_{уч} = \alpha_2 l_n \frac{\alpha_2 - \alpha_3}{\alpha_2} \approx 8 - 15 \text{ дБ}, \text{ что обеспечивает всего лишь } N_{ок} = 3 - 6.$$

Применение бустерного оптического усилителя (БОУ) двояко и противоречиво сказывается на составляющих ожидаемой защищённости  $A_{ож-оп}$  увеличивая  $A_2$ , так как уровень сигнала увеличивается, и уменьшая  $A_1$ , так – как с ростом уровня сигнала быстро возрастают нелинейные помехи. Следствием этих противоречий является экстремум функции  $N_{ок}(p_w)$  (рис. 4).

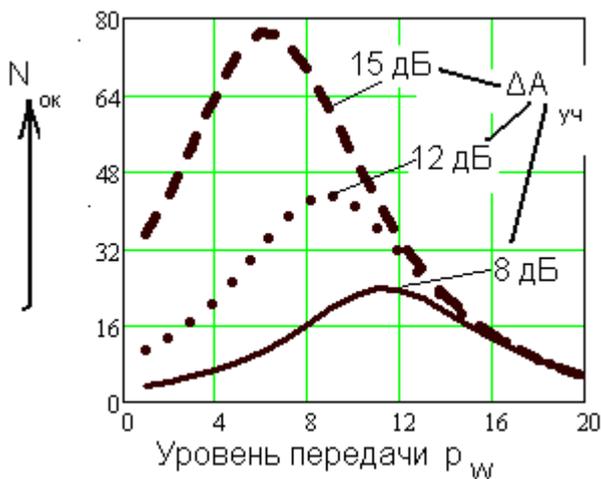


Рисунок 4 – Увеличение  $N_{ок}$  с помощью БОУ

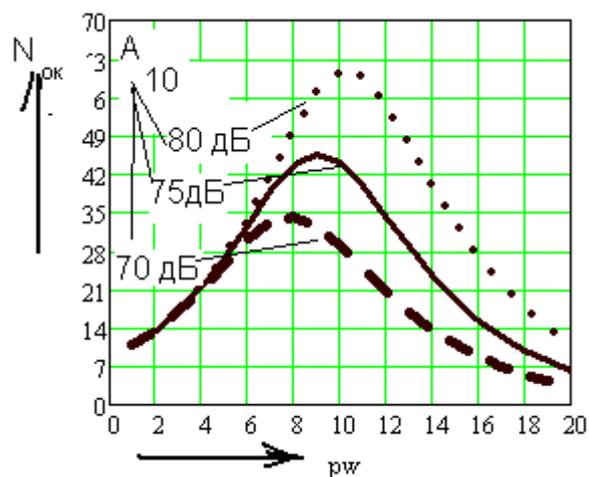


Рисунок 5 – Влияние затухания нелинейности  $A_{10}$  на оптимальные параметры БОУ

Из приведенных расчётов, видно, что оптимизация уровня передачи  $p_w$  позволяет существенно увеличить количество оптических каналов  $N_{ок}$  и тем в большей степени, чем больше запас по затуханию  $\Delta A_{уч}$ , при этом, если  $\Delta A_{уч} \approx 10$  дБ, то количество ОК  $N_{ок} \approx 40$ .

На величину достижимого значения  $N_{ок}$  существенно влияет значение затухания нелинейности  $A_{10}$  (см. рис. 5). В работе использовано расчётное значение  $A_{10}$ . Практически эту величину надо уточнять измерениями. Однако, из графиков рис. 5 видно, что изменение величины  $A_{10}$  не существенно изменяет оптимальное значение уровня передачи  $p_w$  (при отклонениях  $A_{10}$  на 5 дБ оптимальное значение уровня  $p_w$  изменяется на 1 дБ).

Увеличение запаса по затуханию  $\Delta A_{уч}$  можно осуществить использованием предварительного оптического усилителя – (ПОУ), если чувствительность ПОУ ( $p_{ПОУ}$ ) меньше чувствительности приёмного оптического модуля ПРОМ ( $p_{ПРОМ}$ ).

Чувствительность ПОУ определяется шумами спонтанного лучеиспускания [8] и необходимым превышением уровня этих шумов [4]. Чувствительность ПОМ  $p_{ПОУ} < -40$  дБ, а чувствительность ПРОМ  $p_{ПРОМ} \approx -30$  дБ, что увеличивает запас по затуханию  $\Delta A_{уч}$  с помощью ПОУ на величину более 10 дБ.

Таким образом, совместное использование БОУ и ПОУ, при оптимизации уровня передачи  $p_w$ , позволяет существенно увеличить количество оптических каналов (см. рис. 4).

Проведенное исследование позволяет сделать следующие **выводы**:

1. Получить большое количество оптических каналов при замене ВОСП-SDH на ВОСП-WDM без изменения параметров линейного тракта невозможно, в особенности, если при переоборудовании часть секций заменяется на пролёты.

2. Важными резервами переоборудования являются увеличение запаса по защищённости, за счёт использования бустерного (БОУ) и предварительного (ПОУ) усилителей.

3. Существенный выигрыш за счёт использования БОУ может быть достигнут только при выборе оптимального для данного типа ОВ уровня передачи, соответствующего экстремуму  $N_{ок}$ .

Оценка эффективности использования корректирующих кодов – является предметом отдельного исследования

### **Литература**

1. *Бирюков Н.Л.* Транспортные сети и сети электросвязи. Системы мультиплексирования: [Учебник для вузов по специальности «Телекоммуникации»] / Н.Л. Бирюков, В.К. Стеклов. – К., 2003. – 352 с.
2. *Сети* следующего поколения NGN/ [Росляков А.В., Ваняшин М.Ю., Сасонов М.Ю. и др.]; под ред. А.В. Рослякова. – М.: Эко-Тренз, 2008. – 424 с.
3. *Корнейчук В.И.* Волоконно-оптические системы передачи / В.И. Корнейчук, И.П. Панфилов. – Одесса: Друк, 2001. – 431 с.
4. *Брескин В.А.* Цифровая система плезиохронной иерархии / В.А. Брескин, Т.С. Бунчужная. – Одесса, ОНАС им А.С. Попова, 2003. – 49 с.
5. *Агравал Г.Р.* Нелинейная волоконная оптика / Г.Р. Агравал; [пер. с англ. С.В. Черникова и др.]. – М.: Мир, 1996. – 232 с.
6. *Дальняя связь*: [учеб. пособ. для институтов связи] / Л.Н. Астраханцев А.М. Зингеренко, В.Б. Изаксон, В.С. Лавриш; под ред. А.М. Зингеренко. – М.: Связь, 1970. – 408 с.
7. *Заславский К.Е.* Расчёт мощности помех, возникающих из-за четырёхволнового смешивания в каналах ВОСП-WDM / К.Е. Заславский., Л.М. Капустиненко // Электросвязь. – 2004. – № 10.
8. *Макаров Т.В.* Когерентные волоконно-оптические системы передачи / Т. В. Макаров. – Одесса: Друк, 2003. – 125 с.