

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО СВЯЗИ  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ И ИНФОРМАТИКИ»

Кафедра линий связи и измерений в технике связи

Методические указания  
по выполнению курсовой работы  
по дисциплине “Оптические транспортные сети”

**РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ УЧАСТКА ОПТИЧЕСКОЙ  
ТРАНСПОРТНОЙ СЕТИ**

Составил: к.т.н., доцент Дашков М.В.

Самара  
2018

## Введение

Для современных оптических транспортных сетей характерны следующие особенности:

а) Использование спектрального мультиплексирования для увеличения пропускной способности волоконно-оптических линий передачи. Применение технологии плотного спектрального мультиплексирования (DWDM) позволяет обеспечить передачу до нескольких сотен оптических каналов по одной паре оптических волокон.

б) Применение оптических мультиплексоров ввода/вывода каналов (Optical Add-Drop Multiplexer - OADM), реконфигурируемых OADM (Reconfigurable Optical Add-Drop Multiplexer - ROADM) и оптических кросс-коммутаторов на их основе для обеспечения гибкости и масштабируемости сети.

в) Увеличение скорости передачи информации в оптическом канале 10 и 40 Гбит/с до 100 и 400 Гбит/с.

г) Использование транспортных блоков оптических каналов оптической транспортной иерархии OTN/ОТН для гибкого размещения пользовательских данных и их гарантированной защиты с применением коррекции ошибок FEC.

д) Развитие в направлении интеллектуальных транспортных сетей.

Данная курсовая работа посвящена расчету параметров участка оптической транспортной сети. В работе рассматриваются следующие вопросы: изучение характеристик оконченного оборудования; расчет параметров оптического тракта; выбор и размещение модулей компенсации хроматической дисперсии; изучение характеристик оптических усилителей; расчет диаграммы уровней оптического сигнала; подбор параметров оптических усилителей; изучение параметров реконфигурируемого мультиплексора ввода/вывода; расчет оптического отношения сигнал-шум на участке оптической транспортной сети.

## 1. Структура оптической транспортной сети

1.1. В общем виде структура рассматриваемой оптической транспортной сети (ОТС) приведена на рис. 1.1. Сеть состоит из 7 узлов, в которых размещаются реконфигурируемые мультиплексоры ввода-вывода (ROADM), и соединительных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), включающих один или несколько элементарных кабельных участков (ЭКУ).

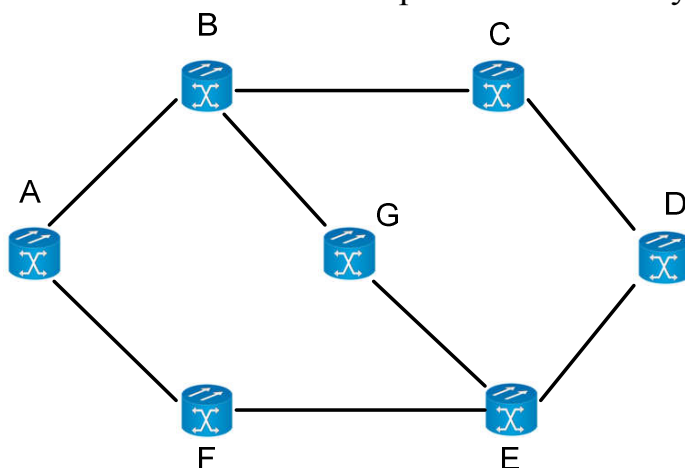


Рис. 1.1 - Структура оптической транспортной сети

Параметры ВОЛП приведены в таблице 1.

Таблица 1.1 - Параметры ВОЛП

ВОЛП	Количество ЭКУ	Протяженность ЭКУ	Тип оптического волокна
A-B	2	$90+2*n - m$	G.652
		$80+2*n - m$	
B-C	1	$120+ n - 2*m$	G.652
B-G	2	$100 - m$	G.652
		$80 + n$	
C-D	1	$90+ 2*n + m$	G.652
D-E	2	$85+ n + m$	G.652
		$105 - n - m$	
G-E	1	$100 + n - 2*m$	G.652
E-F	2	$100 + m$	G.652
		$90-m$	
F-A	2	$110+2*n - m$	G.652
		$90+2*n - m$	

где  $mn$  – последние две цифры зачетной книжки

Расчеты производятся для участка оптической транспортной сети, согласно варианта из таблицы 1.2.

Таблица 1.2 – Варианты участков ОТС

Вариант (m+n)	Участок ОТС
0	A-B-G-E
1	B-G-E-D
2	B-C-D-E
3	D-E-F-A
4	A-B-C-D
5	C-D-E-F
6	D-E-G-B
7	C-B-G-E
8	E-F-A-B
9	E-G-B-A

где mn – последние две цифры зачетной книжки

1.2. Зарисуйте схему рассматриваемого участка оптической транспортной сети.

В качестве примера на рис. 1.2 приведена схема участка А-В-С.

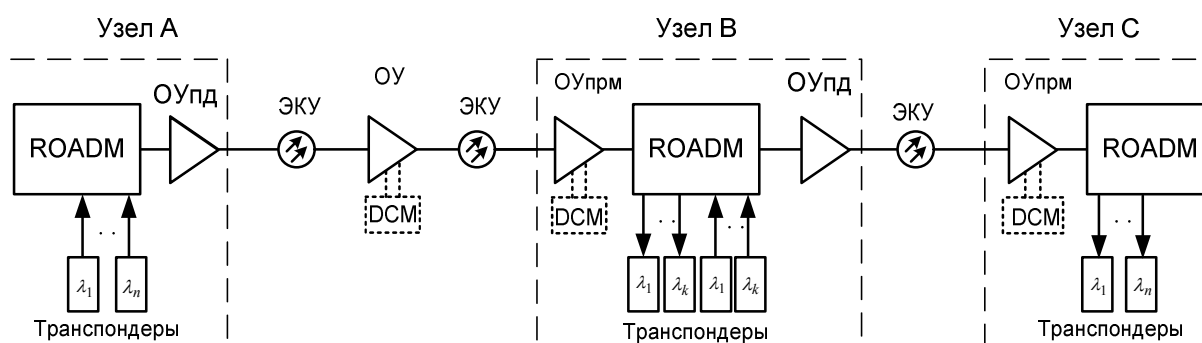


Рис. 1.2 – Пример схемы участка ОТС

На схеме для каждого узла указано основное оборудование: реконфигурируемый мультиплексор ROADM, клиентское оборудования, оптические усилители и модули компенсации дисперсии (DCM).

В качестве окончного оборудования могут выступать транспонеры, мукспондеры или волоконно-оптические системы передачи с интерфейсом DWDM. Транспонеры служат для согласования интерфейсов клиентского оборудования и аппаратуры спектрального уплотнения. Мукспондеры позволяют выполнять агрегацию нескольких клиентских сигналов в один сигнал, соответствующий интерфейсу DWDM.

Оптический усилитель на передаче (бустер) ОУпд служит для компенсации затухания в пассивных элементах ROADM и обеспечения требуемой мощности сигнала, вводимого в оптический тракт.

Оптический усилитель на приеме (предусилитель) ОУпрм служит для компенсации затухания в оптическом тракте и обеспечения требуемого уровня сигнала на приемном порту окончного оборудования.

Модули компенсации дисперсии (DCM) могут располагаться между каскадами линейных или предварительных оптических усилителей. Необходимость применения компенсаторов и их требуемые характеристики определяются в зависимости от параметров ВОЛП и приемо-передающего оборудования.

ROADM служит для ввода/вывода и коммутации оптических каналов в узлах сети. Подробная схема ROADM будет рассмотрена в разделе 5.

ВОЛП состоит из одного или нескольких элементарных кабельных участков с промежуточными линейными усилителями ОУ.

В данном примере в узлах А и С располагаются ROADM на два направления (2-Degree), в узле В располагается ROADM на три направления (3-Degree). При этом для упрощения на схеме в узле В не указано третье направление к узлу G, и в узлах А и С указаны только направления к узлу В.

Для организации связи на данном участке используются длины волн  $\lambda_1 \dots \lambda_n$ . При этом на участках А-В и В-С оптические каналы передаются на длинах волн  $\lambda_1 \dots \lambda_k$ , в то время как рабочие длины волн  $\lambda_{k+1} \dots \lambda_n$  используются для организации связи между узлами А и С, а через узел В проходят транзитом. Тогда распределение длин волн DWDM можно представить в виде таблицы 1.3.

Таблицы 1.3 - Распределение длин волн

	А	В	С
А		$\lambda_1 \dots \lambda_k$	$\lambda_{k+1} \dots \lambda_n$
В	$\lambda_1 \dots \lambda_k$		$\lambda_1 \dots \lambda_k$
С	$\lambda_{k+1} \dots \lambda_n$	$\lambda_1 \dots \lambda_k$	

На приведенной схеме ВОЛП между узлами А и В состоит из двух ЭКУ и промежуточного линейного усилителя, а между узлами В и С – их одного ЭКУ.

Аналогично рассмотренному примеру зарисуйте схему рассматриваемого участка оптической транспортной сети для всех 4-х узлов. Укажите на схеме протяженность всех ЭКУ. Модули DCM на данном этапе не зарисовывайте.

В данной работе предполагается использование высокоскоростных оптических каналов со скоростью передачи информации 40 и 100 Гбит/с. Для согласования интерфейсов клиентского оборудования с аппаратурой спектрального уплотнения используются транспондеры. Оптический сигнал на выходе транспондера соответствует сетке частот DWDM (ITU-T G.694.1), обладает требуемой стабильностью по длине волны, формат модуляции выбирается в соответствии с требованиями по производительности. Оптический сигнал линейного интерфейса рассматриваемых в работе транспондеров соответствует рек. ITU-T G.709. При этом применяются соответствующие технологии кодирования с исправлением ошибок (FEC),

позволяющие повысить качество передачи информации и снизить ограничения по оптическим характеристикам сигнала (в частности, OSNR).

На рис. 1.3 изображен внешний вид плат транспондеров коммерческих систем.



Рис. 1.3 – Платы транспондеров

Параметры линейных интерфейсов транспондеров различных уровней приведены в таблицах 1.4 – 1.6

При дальнейшем выполнении работы предусмотрите возможность совместной работы транспондеров с различной скоростью передачи на одном участке.

Таблица 1.4 - Параметры линейного интерфейса транспондеров уровня 40G (OTU3 / OTU3e)

Параметр	Значение
<b>Передатчик</b>	
Тип модуляции	NRZ - DPSK
Диапазон рабочих длин волн (перестраиваемый лазер)	191.7 ÷ 196.1 ТГц (С-диапазон)
Точность длины волны	±2.5 ТГц
Интервал между каналами	50 ТГц
Время настройки лазера	30 с
OSNR на передаче	45 дБ/0.1 нм
Уровень мощности на передаче	+8 ÷ +13 дБм
Стабильность выходной мощности	0.5 дБ
Точность контроля выходной мощности	1 дБ
Коэффициент гашения	13 дБ
<b>Приемник</b>	
Диапазон уровня мощности на приеме	от -20 до - 7 дБм
Максимально-допустимое значение ПМД	10 пс
Диапазон перестройки компенсатора дисперсии	±1200 пс/нм

NRZ-DPSK –дифференциальный фазовый формат модуляции (без возвращения к нулю)

ПМД – поляризационная модовая задержка

OSNR – оптические отношения сигнал-шум

Таблица 1.5 - Параметры линейного интерфейса транспондеров уровня 40G (OTU3 / OTU3e) (с когерентным приемом)

Параметр	Значение
<b>Передатчик</b>	
Тип модуляции	CP-QPSK
Диапазон рабочих длин волн (перестраиваемый лазер)	191.7 ÷ 196.1 ТГц (С-диапазон)
Интервал между каналами	50 ГГц
Ширина спектра (по уровню 3дБ)	<25 ГГц
Уровень мощности на передаче	+1 ÷ +6.5 дБм
Минимальное требуемое ORL	30 дБ
<b>Приемник</b>	
Тип фотоприемника	PIN
Чувствительность приемника	-20 дБм
Уровень перегрузки	-8 дБм
Максимальная накопленная дисперсия	±29000 пс/нм
Максимальная дифференциальная групповая задержка	100 пс
Требуемое отношение сигнал-шум (OSNR) при стандартном FEC и при максимальной дисперсии ±29000 пс/нм	14 дБ

CP-DQPSK – квадратурный фазовый формат модуляции с уплотнением по поляризации и когерентным приемом

Таблица 1.6 - Параметры линейного интерфейса транспондеров уровня 100G (OTU4) (с когерентным приемом)

Параметр	Значение
Стандарт интерфейса	OTU4
Диапазон рабочих длин волн (перестраиваемый лазер)	1528,7–1567,1 нм
Интервал между каналами	50 ГГц
<b>Передатчик</b>	
Тип модуляции	DP-QPSK
Уровень мощности на передаче	-10...+2,5 дБм
<b>Приемник</b>	
Максимальная накопленная хроматическая дисперсия	+/- 70000 пс/нм
Чувствительность приемника	-18 дБм
Уровень перегрузки	0 дБм
Требуемое отношение сигнал-шум (OSNR)	10,3 дБ
Коэффициент отражения приемника	30 дБ
Дифференциальная групповая задержка	180 пс

DP-QPSK – квадратурный фазовый формат модуляции с уплотнением по поляризации и когерентным приемом

## 2. Исходные данные для расчета параметров оптического тракта

2.1. Инсталляция оборудования высокоскоростных волоконно-оптических систем передачи с аппаратурой спектрального уплотнения, как правило, сопровождается обследованием линейно-кабельных сооружений (ЛКС), включающим контрольные измерения параметров оптического тракта.

В результате обследования ЛКС ВОЛП были получены следующие результаты.

2.2. Спектральная зависимость коэффициента затухания оптического волокна на ЭКУ определяется выражением:

$$\alpha(1550_{\text{нм}}) = 0.18 + 0.01 \cdot [(mn) \bmod 4], \text{ дБ/км.} \quad (2.1)$$

$$\alpha(\lambda) = \alpha(1550_{\text{нм}}) + 5 \cdot 10^{-6} \cdot (\lambda - 1550)^2, \text{ дБ/км.} \quad (2.2)$$

где  $\lambda$  - длина волны, нм.

Выполните расчет для рабочих длин волн в С-диапазоне (1530 – 1565 нм). Приведите результаты расчета для длины волны 1550 нм и крайних длин волн диапазона. Постройте график зависимости коэффициента затухания от длины волны.

2.3. Спектральная зависимость коэффициента хроматической дисперсии определяется следующими параметрами:

- длина волны нулевой дисперсии:

$$\lambda_0 = 1300 + m + n, \text{ нм;} \quad (2.3)$$

- наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии:

$$S_0 = 0.085 + 0.001 \cdot (m - n), \text{ пс}/(\text{нм}^2 \cdot \text{км}); \quad (2.4)$$

Расчет спектральной зависимости коэффициента хроматической дисперсии для стандартного ступенчатого ОВ (G.652) производится по формуле:

$$D_{ХД}(\lambda) = \frac{S_0}{4} \left( \lambda - \frac{\lambda_0^4}{\lambda^3} \right), \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км}). \quad (2.5)$$

где  $S_0$  - наклон дисперсионной кривой в точке нулевой дисперсии, пс/(нм<sup>2</sup>·км);  
 $\lambda_0$  - точка нулевой дисперсии, нм.

Выполните расчет для рабочих длин волн в С-диапазоне (1530 – 1565 нм). Приведите результаты расчета для длины волны 1550 нм и крайних длин волн диапазона. Постройте график зависимости коэффициента хроматической дисперсии от длины волны.

2.4. Поляризационная модовая дисперсия оптического волокна на ЭКУ:

$$D_{ПМД} \leq 0.1 + 0.01 \cdot (m - n), \text{ пс}/\sqrt{\text{км}} \quad (2.6)$$



### 3. Выбор и размещение модулей компенсации хроматической дисперсии

3.1. Произведите расчет накопленной хроматической дисперсии на рабочей длине волны, соответствующей максимальному коэффициенту хроматической дисперсии, на каждом ЭКУ и суммарную дисперсию на ВОЛП по формулам

$$\sigma_{\text{ЭКУ},i} = D_{\text{ХД}} L_{\text{ЭКУ},i}; \quad (3.1)$$

$$\sigma_{\text{ВОЛП}} = \sum_i^{N_{\text{ЭКУ}}} \sigma_{\text{ЭКУ},i} \quad (3.2)$$

где  $D_{\text{ХД}}$  - коэффициент хроматической дисперсии, пс/нм/км;  $L_{\text{ЭКУ},i}$  - протяженность  $i$ -го ЭКУ,  $N_{\text{ЭКУ}}$  – количество ЭКУ на ВОЛП.

Результаты занесите в таблицу, общий вид которой приведен в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Накопленная хроматическая дисперсия

ВОЛП	Количество ЭКУ	$\sigma_{\text{ЭКУ}}$ , пс/нм	$\sigma_{\text{ВОЛП}}$ , пс/нм
	1		
	2		

Определите суммарную накопленную хроматическую дисперсию на рассматриваемом участке ОТС, определяемую суммой  $\sigma_{\text{ВОЛП}}$ .

$$\sigma_{\text{max}} = \sum_k^{N_{\text{ВОЛП}}} \sigma_{\text{ВОЛП},k} \quad (3.3)$$

3.2. Определите необходимость компенсации хроматической дисперсии, сравнив полученное значение с максимально-допустимым значением хроматической дисперсии для выбранного оборудования  $\sigma_{\text{дон}}$  (см. табл. 1.4-1.6).

Если условие  $\sigma_{\text{max}} < \sigma_{\text{дон}}$  не выполняется, то требуется выбор и размещение модулей компенсации дисперсии.

При этом ориентируйтесь на оборудование, имеющее наименьшие допуски по дисперсии.

3.3. Основные критерии по выбору типа устройства компенсации хроматической дисперсии:

- компенсация дисперсии в заданном диапазоне длин волн;
- компенсация наклона дисперсионной характеристики;
- минимальные вносимые потери;
- минимальный уровень вносимой поляризационной модовой дисперсии;
- минимальный уровень нелинейных искажений.

Для компенсации хроматической дисперсии могут применяться различные методы, которые можно классифицировать по нескольким признакам: оптические и электронные; узкополосные и широкополосные; фиксированные и перестраиваемые. Как правило, для систем передачи со скоростью передачи 10 Гбит/с достаточно применения оптических широкополосных методов, в то время как для скоростей 40 Гбит/с, как правило, дополнительно требуется узкополосная перестраиваемая компенсация, реализуемая на приемной стороне. Применение технологии когерентного приема для систем передачи 40, 100 и 400 Гбит/с позволяет эффективно реализовать узкополосную электронную компенсацию на приемной стороне, подстраиваемую под параметры оптического тракта, и практически полностью удовлетворяющую требованиям для наземных сетей. В этом случае нет необходимости в размещении промежуточных оптических компенсаторов для работы когерентных ВОСП. Однако, поскольку на переходных этапах зачастую на оптических транспортных сетях в одном волокне могут передаваться сигналы с различной символьной скоростью передачи, применение оптических компенсаторов может потребоваться для обеспечения работоспособности всех каналов.

В данной работе предлагается использовать оптические широкополосные методы компенсации на основе оптического волокна компенсации дисперсии или на основе чирпированных волоконных брэгговских решеток.

Как правило, модуль компенсации размещается между двумя каскадами оптического усилителя, что позволяет скомпенсировать собственное затухание модуля и в тоже время не вызвать увеличения нелинейных эффектов.

На рис. 3.1 изображены различные варианты промышленных модулей компенсации дисперсии на основе компенсирующего волокна, а в таблице 3.2 приведены типовые параметры.



Рис. 3.1 – Модули компенсации хроматической дисперсии на основе компенсирующего волокна

Таблица 3.2 – Параметры модулей компенсации дисперсии на основе компенсирующего волокна

Параметр	DCM-20	DCM-40	DCM-60	DCM-80	DCM-100
Компенсируемая длина ОВ, км	20	40	60	80	100
Рабочий диапазон, нм	1525 – 1565 нм				
Дисперсия на длине волны 1545 нм, пс/нм	-330	-660	-990	-1320	-1650

Наклон дисперсионной характеристики, пс/нм <sup>2</sup>	-0.876	-1.753	-2.603	-3.471	-4.252
Коэффициент компенсации наклона дисперсии	90% - 110%				
Вносимое затухание	<4	<5	<7	<8	<10
Поляризационная модовая дисперсия, пс	0.5	0.7	0.8	1.0	1.2
Потери, зависящие от поляризации, дБ	0.1				
Максимально-допустимая мощность на входе, дБм	20				

На рис. 3.2 изображены различные варианты промышленных модулей компенсации дисперсии на основе компенсирующего волокна, а в таблице 3.3 приведены типовые параметры.



Рис. 3.2 – Модули компенсации хроматической дисперсии

Таблица 3.3 – Параметры модулей компенсации дисперсии на основе chirпированных брэгговских решеток

Параметр	FBG-DCU-20	FBG-DCU-40	FBG-DCU-60	FBG-DCU-80	FBG-DCU-100	FBG-DCU-120
Компенсируемая длина ОВ, км	20	40	60	80	100	120
Тип компенсируемого волокна	G.652 SMF					
Рабочий диапазон	1527.22 - 1567.12 нм (193.3 - 191.3 ТГц)					
Выделенный диапазон для служебного канала (OSC)	1510 нм (1503 – 1518 нм)					
Интервал между каналами	0.8 нм (100 ГГц)					
Полоса пропускания	Частота МСЭ-Т ± 17.5 ГГц					
Вносимые потери, дБ	≤ 3.5					
Дисперсия (первый канал 1527.33 нм), пс/нм	-310	-619	-929	-1238	-1548	-1857
Дисперсия (последний канал 1567.13 нм), пс/нм	-365	-712	-1068	-1423	-1779	-2135
Поляризационная модовая дисперсия, пс	<0.5	<0.5	<0.5	<0.7	<0.7	<0.7
Потери, зависящие от поляризации, дБ	< 0.3					
Затухание отражения, дБ	>40					

Места возможного размещения модулей компенсации указаны на примере рис. 1.2 (отмечены пунктиром).

При выборе номиналов модулей компенсации дисперсии можно ориентироваться на протяженность ЭКУ, выбирая модуль с меньшим значением компенсации дисперсии.

3.4. После выбора и размещения модулей компенсации выполните расчет остаточной дисперсии на каждом узле и промежуточном усилителе. Расчет производите для рабочей длины волны, соответствующей максимальному коэффициенту хроматической дисперсии.

Формула для расчета остаточной дисперсии в  $k$ -ой точке:

$$\sigma_{ост,k} = \sum_{i=1}^k (\sigma_{ЭКУ,i} + \sigma_{DCM,i}), \text{ пс/нм} \quad (3.4)$$

где  $\sigma_{ЭКУ,i}$  - накопленная хроматическая дисперсия на  $i$ -м ЭКУ;  $\sigma_{DCM,i}$  - дисперсия  $i$ -го модуля.

Проверьте, чтобы в узлах остаточная дисперсия не превышала допустимых значений для оконечного оборудования (транспондеров) (см. табл. 1.4 – 1.6). Если условие не выполняется, скорректируйте выбор модулей компенсации. Полученные значения занесите в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 - Размещение модулей компенсации дисперсии

Пункт	Тип модуля	$\sigma_{ост}$ , пс/нм
...	...	...

Постройте график зависимости остаточной дисперсии по длине рассматриваемого участка. Укажите на графике максимальное допустимое значение остаточной хроматической дисперсии для аппаратуры.

В качестве примера на рис. 3.3 приведен график изменения накопленной хроматической дисперсии для схемы, изображенной на рис. 1.2.

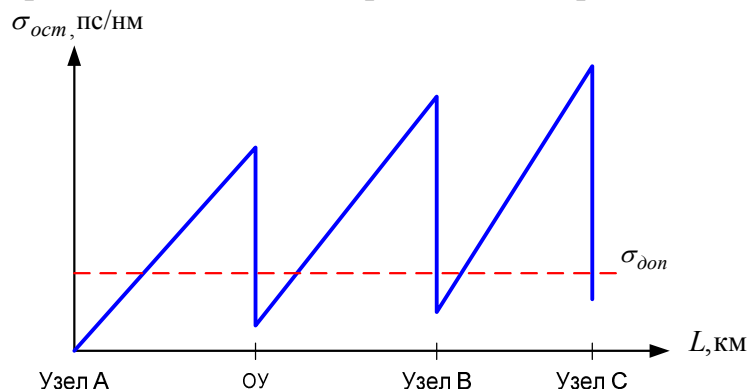


Рис. 3.3 – Пример графика накопленной хроматической дисперсии на участке ОТС

#### 4. Расчет затухания на элементарном кабельном участке

Для определения параметров оптических усилителей и настройке их в процессе инсталляции необходимо рассчитать затухание на элементарных кабельных участках.

Произведите расчет суммарного затухания для всех ЭКУ по формуле:

$$A_{\text{эку}}(\lambda) = \alpha(\lambda)L_{\text{эку}} + a_c n_c + a_p n_p, \quad (4.1)$$

где  $\alpha(\lambda)$  - коэффициент затухания оптического волокна на длине волны  $\lambda$ , дБ/км;  $L_{\text{эку}}$  - протяженность ЭКУ, км;  $a_c$  - затухание на сварных соединениях, дБ;  $n_c$  - количество оптических муфт;  $a_p$  - затухание на оптических разъемных соединениях, дБ;  $n_p$  - количество оптических разъемных соединений, дБ.

Затухание сварных соединений в оптических муфтах на магистральных сетях связи РФ нормируется следующим образом:

Таблица 4.1- Нормы на затухание сварных соединений

Длина волны, нм	Затухание, дБ	Примечание
1550	$\leq 0.1$	в 100 % случаев
	$\leq 0.05$	в 50 % случаев

В расчетах будем использовать максимально допустимое значение затухания для всех длин волн.

Расчет количества оптических муфт на ЭКУ производится по формуле:

$$n_c = \text{int} \left( \frac{L_{\text{эку}}}{L_{\text{сд}}} \right) - 1, \quad (4.2)$$

где  $L_{\text{сд}}$  - строительная длина оптического кабеля, км; int - округление до большего целого.

В качестве типовой протяженности строительной длины можно принимать 4-6 км.

Норма затухания разъемных соединителей составляет  $a_p \leq 0.5$  дБ. Количество разъемных соединителей можно полагать равным 4 на каждом ЭКУ, что соответствует точкам подключения ВОСП-СР или оптического усилителя к кроссовому оборудованию.

Произведите расчет затухания на ЭКУ для максимального значения коэффициента затухания и занесите результаты в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты расчета суммарного затухания ЭКУ

ВОЛП	Количество ЭКУ	$A_{\text{эку}}$ , дБ
...	...	...
...	...	...

## 5. Реконфигурируемый оптический мультиплексор ввода-вывода (ROADM)

Реконфигурируемые оптические мультиплексоры ввода-вывода (ROADM) являются ключевыми элементами для построения полноценных оптических транспортных сетей. ROADM позволяют удаленно обеспечивать добавление, выделение и перенаправление оптических каналов без преобразования в электрический вид. Современные ROADM позволяют обеспечить коммутацию оптических каналов во всем рабочем диапазоне длин волн и для любых направлений. Применение ROADM позволяет гибко и быстро производить переконфигурирование сети, повысить эффективность использования рабочих длин волн, снизить эксплуатационные расходы.

В общем виде конструкция ROADM для двух направлений (2 Degree) представлена на рис. 5.1.

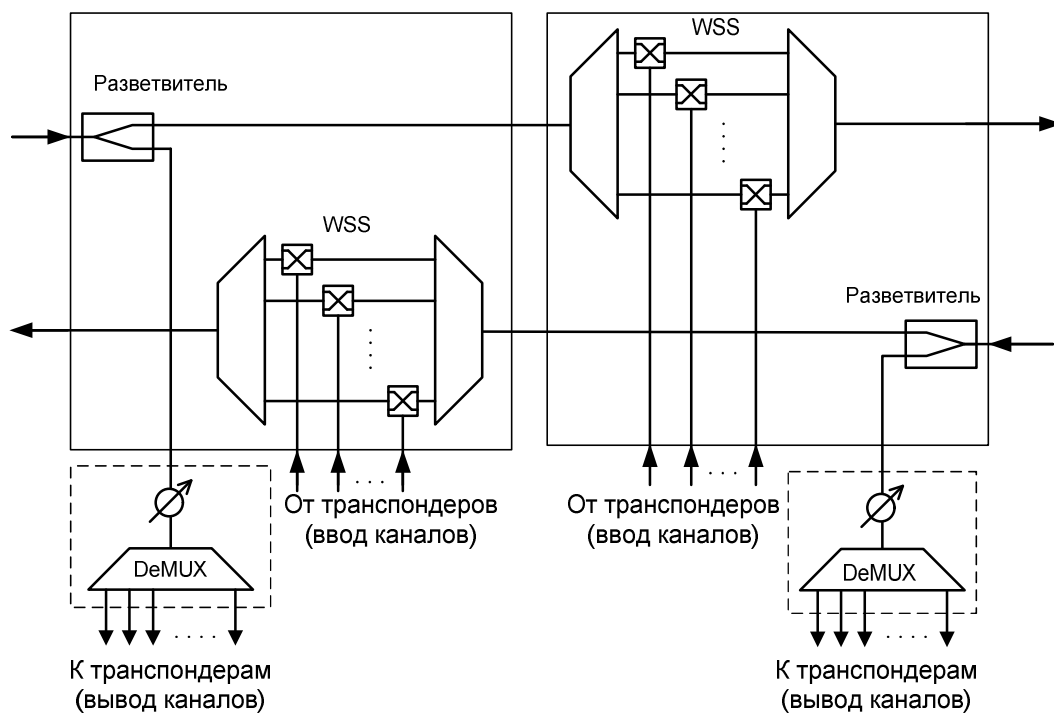


Рис. 5.1 - Схема ROADM на основе WSS

Оптический сигнал DWDM поступает на входной порт и на разветвителе разделяется на два направления (типичные соотношения 80/20 и 70/30). Часть мощности сигнала поступает оптический демультиплексор (DeMUX), выделяющий из группового сигнала отдельные оптические каналы. Другая часть поступает на модуль спектрально-селективного коммутатора (Wavelength Selective Switch – WSS). В данном устройстве оптический сигнал DWDM разделяется на отдельные каналы, которые поступают на оптические переключатели. На второй входной порт оптических переключателей поступают сигналы от оконечного оборудования в узле транспортной сети. Выходные порты переключателей подключены к портам оптического

волнового мультиплексора. Таким образом, управляемый оптический переключатель позволяет коммутировать транзитные и добавляемые каналы.

Таким образом, узел ROADM формируется из набора плат (таких как оптический демультиплексор, спектрально-селективный коммутатор, оптический кросс-коммутатор, оптические патч-панели), состав и количество которых определяется его конфигурацией.

В общем виде ROADM можно представить в виде 4-х портового устройства (показано одно направление) (см. рис. 5.2).

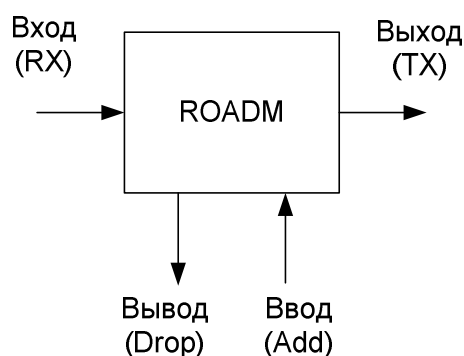


Рис. 5.3 - Общий вид ROADM (показано одно направление)

На рис. 5.4 изображены платы ROADM коммерческих систем.



Рис. 5.4 – Внешний вид плат ROADM

В таблице 5.1 приведены параметры скомплектованных ROADM, которые следует использовать при расчетах.

Таблица 5.1 – Параметры ROADM

Параметр	2 Degree ROADM	3 Degree ROADM
Вносимое затухание		
- для транзитного канала (RX-TX EXP)	10 дБ	18
- для вывода канала (RX-Drop)	12 дБ	18
- для ввода канала (Add-TX)	7 дБ	18

## **6. Выбор и размещение оптических усилителей**

### **6.1. Общие положения**

Оптические усилители (ОУ) предназначены для компенсации потерь в оптическом тракте и пассивных элементах и являются важным элементом оптических транспортных сетей. ОУ обеспечивают усиление оптических сигналов без их преобразования в электрические сигналы и обратно. Оптические усилители работают на физическом уровне независимо от формата оптического сигнала.

В настоящее время на оптических транспортных сетях в основном применяются два типа ОУ: оптические усилители на основе волокна, легированного эрбием (Erbium Doped Fiber Amplifier - EDFA) и оптические усилители на основе вынужденного комбинационного рассеяния (ВКР-усилители), также известные как рамановские усилители (Raman Amplifier).

В настоящее время EDFA являются наиболее коммерчески эффективным решением и получили наибольшее распространение.

Распределенные рамановские усилители позволяют добиться самого низкого уровня собственных шумов и по этой причине получили применение на протяженных и сверхпротяженных ВОЛП.

На практике получили применение гибридные ОУ, построенные по двухкаскадной схеме: распределенный рамановский усилитель выступает в качестве малошумящего предусилителя, а EDFA выполняет роль усилителя мощности.

В зависимости от местоположения на регенерационном участке оптический усилитель может быть классифицирован на усилитель передачи (бустер), линейный усилитель и предварительный усилитель.

К основным параметрам оптического усилителя, которые необходимо учитывать при проектировании, относятся:

- рабочий диапазон длин волн;
- коэффициент усиления;
- шум-фактор;
- минимальный уровень мощности на входе;
- максимальный уровень мощности на входе;
- максимальный уровень сигнала на выходе.

Также для систем спектрального уплотнения важными характеристиками являются: равномерность спектра усиления, время реакции на ввод/вывод оптических каналов.

Внешний вид EDFA различных реализаций приведен на рис. 6.1.





Рис. 6.1 – Оптические усилители EDFA: а) модульное исполнение; б) плата EDFA; в) стоечное исполнение

Типовые характеристики эрбиевых оптических усилителей приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры оптических усилителей EDFA

Параметр	Значение	
	Бустер	Линейный/ Пред-усилитель
Рабочий диапазон	1529.0 ÷ 1562.5 нм	
Допустимый уровень мощности на входе: - суммарная мощность всех каналов, дБм - один канал, дБм	-6 ÷ 12 -26 ÷ -8	-15 ÷ 8 -40 ÷ -17
Выходная мощность, дБм		-5 ÷ 20
Максимальная суммарная выходная мощность, дБм	20,5	20
Коэффициент усиления канала (G), дБ	8 ÷ 23	12 ÷ 35
Шум-фактор (NF), дБ	6.5	5.5
Время реакции на ввод/вывод каналов (установившийся режим)		от 5 мс до 1 с
Неравномерность усиления в рабочем диапазоне максимальная, дБ	1.8	1.2
Наклон характеристики усиления DWDM сигнала		< 1 дБ

## 6.2. Диаграмма уровней сигнала

В данной работе оптические усилители размещаются на каждом узле в конфигурации “предусилитель – ROADM – бустер”. Предусилитель обеспечивает требуемый уровень сигнала для выводимых каналов на ROADM и усиливает транзитные каналы. При необходимости между каскадами предусилителя может быть установлен оптический модуль компенсации хроматической дисперсии. Усилитель на передаче (бустер) компенсирует вносимое ROADM затухание при вводе оптических каналов и при транзитном прохождении, обеспечивает требуемый уровень сигнала, вводимого в оптический тракт.

Для компенсации затухания на ЭКУ для многопролетных ВОЛП применяются линейные оптические усилители. При необходимости между каскадами линейного усилителя может быть установлен оптический модуль компенсации хроматической дисперсии.

При выборе и размещении ОУ должны соблюдаться следующие правила:

а) Уровень сигнала на входе ОУ должен укладываться в допустимый диапазон, указанный в паспортных данных. При этом должны оцениваться как уровни индивидуального канала, так и суммарная мощность всех передаваемых каналов.

При превышении допустимого уровня входного сигнала должны применяться аттенюаторы. Как правило, в ROADM на плате WSS имеются встроенные аттенюаторы для каждого канала, позволяющие регулировать уровень сигналов.

Если уровень сигнала на входе усилителя окажется ниже предельно-допустимого значения, собственные шумы усиленного спонтанного излучения будут превышать уровень полезного сигнала.

б) Уровень сигнала на выходе оптического усилителя не должен превышать максимально допустимого паспортного значения. Как правило, это чаще касается суммарной мощности сигнала DWDM.

в) Коэффициент усиления ОУ выбран таким образом, чтобы скомпенсировать затухание на ЭКУ и пассивных оптических элементах, и в тоже время, чтобы соблюдались требования к максимальному уровню на выходе усилителя и минимальному и максимальному уровню на входе следующего усилителя. Диапазон значений коэффициента усиления указывается в паспортных данных.

г) Итоговый уровень оптического сигнала на приемном порту оконечного оборудования (транспондера) должен быть выше уровня чувствительности и не превышать уровня перегрузки (см. табл. 1.4 – 1.6). Как правило, при этом должен быть обеспечен эксплуатационный запас по мощности.

В данной работе на первом этапе при выборе коэффициента усиления линейного ОУ рекомендуется ориентироваться на значения расчетного затухания ЭКУ, учитывая диапазон изменения коэффициента усиления из технических характеристик (см. табл. 6.1).

При выборе коэффициента усиления предусилителя следует ориентироваться на значения затухания при выводе оптических каналов и на уровень чувствительности приемника транспондера.

Для ОУ с включением модулей компенсации DCM следует указывать итоговый коэффициент усиления, полагая полную компенсацию потерь DCM.

Для каждого ОУ производите расчет суммарной мощности оптических сигналов на входе/выходе и не допускайте превышения максимального значения.

Суммарная мощность DWDM сигнала в предположении, что все каналы имеют одинаковый уровень, может быть рассчитана по формуле

$$P_{\text{сумм}} = P_{\text{кан}} + 10 \cdot \log_{10} N_{\text{кан}}, \text{ дБм} \quad (6.1)$$

где  $P_{\text{кан}}$  - мощность в одном оптическом канале, дБм;  $N_{\text{кан}}$  - количество оптических каналов.

Расчеты произведите для участков максимальной и минимальной протяженности. При этом учитывайте, что вносимое затухания ROADM зависит от количества реализуемых направлений (см. табл. 5.1)

На схеме связи укажите уровень сигнала каждого канала и суммарного уровня сигнала DWDM в контрольных точках, требуемые значения коэффициента усиления для каждого ОУ и уровень сигнала на приемном порту транспондеров.

Сравните полученные значения уровня сигнала на приеме с уровнем чувствительности транспондера и определите эксплуатационный запас по мощности:

$$A_{\text{эз}} = P_{\text{кан}} - P_{\text{чувств}} \quad (6.2)$$

На рис. 6.2 приведен пример диаграммы уровней оптического сигнала для участка сети А-В-С. В данном примере для организации связи используется 10 каналов, в узлах А и С используется ROADM на два направления, а в пункте С – на три направления.

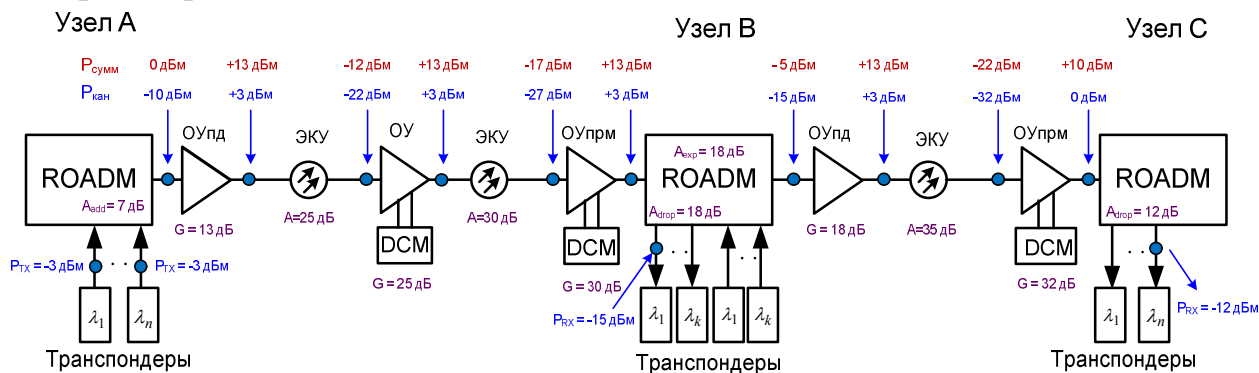


Рис. 6.3 – Диаграмма уровней оптического сигнала

### Пример расчета.

Уровень сигнала в канале на выходе ROADM (вход ОУ<sub>ПД</sub>) (узел А):

$$P_{\text{ОУПД,вх}} = P_{\text{ТХ}} - A_{\text{add}} = -3 - 7 = -10 \text{ дБм}$$

Суммарный уровень сигнала DWDM на входе ОУ<sub>ПД</sub> (узел А):

$$P_{\text{ОУПД,вх сумм}} = P_{\text{ОУПД,вх}} + 10 \cdot \log_{10}(N_{\text{кан}}) = -10 + 10 = 0 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала в канале на выходе ОУ<sub>ПД</sub> (узел А):

$$P_{\text{ОУПД,вых}} = P_{\text{ТХ}} - A_{\text{add}} + G = -3 - 7 + 13 = +3 \text{ дБм}$$

Суммарный уровень сигнала DWDM на выходе ОУ<sub>ПД</sub> (узел А):

$$P_{\text{ОУПД,вых сумм}} = P_{\text{ОУПД,вых}} + 10 \cdot \log_{10}(N_{\text{кан}}) = 3 + 10 = +13 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала в канале на выходе первого ЭКУ (вход линейного усилителя):

$$P_{\text{ОУ,вх}} = P_{\text{ТХ}} - A_{\text{add}} + G - A = -3 - 7 + 13 - 25 = -22 \text{ дБм}$$

$$P_{\text{ОУ,вх сумм}} = -12 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала в канале на выходе линейного усилителя:

$$P_{\text{ОУ,вых}} = P_{\text{ОУ,вх}} + G = -22 + 25 = +3 \text{ дБм}$$

$$P_{\text{ОУ,вых сумм}} = +13 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала в канале на входе ОУ<sub>прм</sub> (узел В):

$$P_{\text{ОУпрм,вх}} = P_{\text{ОУ,вых}} - A = +3 - 30 = -27 \text{ дБм}$$

$$P_{\text{ОУпрм,вх сумм}} = -17 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала в канале на выходе ОУ<sub>прм</sub> (узел В):

$$P_{\text{ОУпрм,вых}} = P_{\text{ОУпрм,вх}} + G = -27 + 30 = +3 \text{ дБм}$$

$$P_{\text{ОУпрм,вых сумм}} = +13 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала выводимого канала на приемном порту транспондера (узел В):

$$P_{\text{RX}} = P_{\text{ОУпрм,вых}} - A_{\text{drop}} = +3 - 18 = -15 \text{ дБм}$$

Если уровень чувствительности транспондера  $P_{\text{чувств}} = -18 \text{ дБ}$ , то эксплуатационный запас составит

$$A_{\text{ЭЗ}} = P_{\text{RX}} - P_{\text{чувств}} = -15 - (-18) = 3 \text{ дБ}$$

## 7. Расчет отношения оптический сигнал/шум (OSNR)

Важным фактором деградации оптического сигнала в транспортных сетях является шум спонтанного усиленного излучения, вносимый оптическими усилителями. В результате прохождения через каждый оптический усилитель к полезному сигналу добавляются шумы. Для ВОЛП, состоящих из нескольких усилительных участков, шумы накапливаются, тем самым ограничивая протяженность участка регенерации.

Показателем качества принимаемого сигнала может служить отношение оптический сигнал/шум (Optical Signal Noise Ratio - OSNR). В процессе усиления OSNR снижается из-за собственных шумов усилителя. Для описания шумовых характеристик оптического усилителя используется понятие шум-фактор (Noise Figure - NF)

$$NF_{\text{дБ}} = 10 \cdot \log_{10} \left( \frac{OSNR_{\text{вх}}}{OSNR_{\text{вых}}} \right) \quad (7.1)$$

где  $OSNR_{\text{вх}}$  - отношение оптический сигнал-шум на входе ОУ;  $OSNR_{\text{вых}}$  - отношение оптический сигнал-шум на выходе ОУ.

Итоговое значение отношения оптический сигнал/шум для ВОЛП, состоящей из каскада  $N$  усилительных участков определяется в виде

$$\frac{1}{OSNR_{\Sigma}} = \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2} + \dots + \frac{1}{OSNR_N} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{OSNR_i} \quad (7.2)$$

где  $OSNR_i$  - отношение оптический сигнал/шум для  $i$ -го оптического усилителя (в линейных единицах).

Отношение оптический сигнал/шум (в линейных единицах) на выходе  $i$ -го оптического усилителя будет определяться выражением

$$OSNR_i = \frac{P_{OY, \text{вх}}}{NF_{\text{лин}} \cdot h \cdot f \cdot \Delta f}, \quad (7.3)$$

где  $P_{OY, \text{вх}}$  - уровень сигнала в оптическом канале на входе оптического усилителя, Вт;

$NF_{\text{лин}}$  - шум-фактор оптического усилителя в линейных единицах;

$h$  - постоянная Планка ( $h = 6,628 \cdot 10^{-34}$  Дж·с);

$f$  - частота оптической несущей, Гц;

$\Delta f$  - оптическая полоса частот, Гц.

Частота оптической несущей связана с длиной волны соотношением

$$f = \frac{c}{\lambda}, \quad (7.4)$$

где  $c$  - скорость света в вакууме, м/с;  $\lambda$  - длина волны оптического излучения, м

В паспортных данных современных волоконно-оптических систем передачи может указываться минимально-допустимое значение OSNR, и при каком разрешении оптического анализатора спектра (RBW) оно должно измеряться.

Если не указывается особо, обычно используется разрешение 0,1 нм, что соответствует полосе  $\Delta f = 12,5$  ГГц.

Формулы для пересчета из логарифмических единиц в линейные единицы

$$P = 10^{-3} \cdot 10^{0.1 \cdot P_{\text{дБм}}}, \text{ Вт} \quad (7.4)$$

$$NF_{\text{лин}} = 10^{0.1 \cdot NF_{\text{дБ}}} \quad (7.5)$$

Для перевода OSNR в логарифмические единицы используется формула

$$OSNR_{\text{дБ}} = 10 \cdot \log_{10}(OSNR) \quad (7.6)$$

Выполните расчет изменения OSNR на заданном участке для выхода каждого усилителя, заполните табл. 7.1 и постройте график измерения OSNR.

Для расчета значения  $P_{OY, \text{вх}}$  берутся из раздела 6.2; значения шум-фактора определяются из табл. 6.1 с учетом используемого типа ОУ; для расчета частоты оптической несущей можно использовать рабочую длину волны 1550 нм.

Таблица 7.1 – Результаты расчета OSNR

Контрольная точка	OSNR, дБ

Сравните итоговое значение OSNR с минимально-допустимым значением для используемого транспондера.

Сделайте итоговые выводы о работоспособности оборудования.

### **Пример расчета.**

Исходные данные:

- уровни сигнала на входе ОУ выбираются согласно рис. 6.2
- шум-фактор ОУ<sub>пд</sub> равен 6.5 дБ; ОУ<sub>прм</sub> и ОУ равен 5.5 дБ
- $\Delta f = 12,5$  ГГц.
- $f = 193.55$  ТГц

OSNR на выходе ОУ<sub>пд</sub> (узел А):

$$P_{OY, \text{вх}} = -10 \text{ дБм} \Rightarrow P_{OY, \text{вх}} = 10^{-4} \text{ Вт}$$

$$NF = 6.5 \text{ дБ} \Rightarrow NF_{\text{лин}} = 10^{0.1 \cdot 6.5} \approx 4.47$$

$$\Delta f = 12,5 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

$$f = 193.55 \cdot 10^{12} \text{ Гц}$$

$$OSNR_1 = \frac{10^{-4}}{4.47 \cdot 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 193.55 \cdot 10^{12} \cdot 12.5 \cdot 10^9} = 13968$$

$$\frac{1}{OSNR_{\Sigma}} = \frac{1}{OSNR_0} + \frac{1}{OSNR_1}$$

Принимая исходный сигнал с выхода транспондера без шумов ( $1/OSNR_0 \rightarrow 0$ ) получим, что на выходе первого усилителя в тракте

$$OSNR_{\Sigma} = OSNR_1$$

Тогда на выходе ОУ<sub>пд</sub> узла А

$$OSNR_{\Sigma}^{\text{дБ}} = 10 \log_{10}(13968) = 41.45 \text{ дБ}$$

OSNR на выходе ОУ (линейный усилитель):

$$P_{OY,ex} = -22 \text{ дБм} \Rightarrow P_{OY,ex} = 6.3 \cdot 10^{-6} \text{ Вт}$$

$$NF = 5.5 \text{ дБ} \Rightarrow NF_{\text{лин}} = 10^{0.1 \cdot 5.5} \approx 3.55$$

$$OSNR_2 = \frac{6.3 \cdot 10^{-4}}{3.55 \cdot 6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 193.55 \cdot 10^{12} \cdot 12.5 \cdot 10^9} = 1108$$

$$\frac{1}{OSNR_{\Sigma}} = \frac{1}{OSNR_1} + \frac{1}{OSNR_2}$$

$$\frac{1}{OSNR_{\Sigma}} = \frac{1}{13968} + \frac{1}{1108} = 9.74 \cdot 10^{-4} \Rightarrow OSNR_{\Sigma} \approx 1027$$

Тогда итоговое OSNR на выходе ОУ (линейный усилитель):

$$OSNR_{\Sigma}^{\text{дБ}} = 10 \log_{10}(1027) = 30.12 \text{ дБ}$$

Выполняя аналогичным образом расчеты для всех усилителей получим результат

Контрольная точка	OSNR, дБ
ОУ <sub>пд</sub> (узел А)	41.45
ОУ (линейный усилитель на участке А-В)	30.12
ОУ <sub>прм</sub> (узел В)	24.18
ОУ <sub>пд</sub> (узел В)	23.93
ОУ <sub>прм</sub> (узел С)	18.84

## Список литературы

1. Направляющие системы электросвязи: Учебник для вузов. В 2-х томах. Том 2 – Проектирование, строительство и техническая эксплуатация / В.А. Андреев, А.В. Бурдин, Л.Н. Кочановский и др.; Под ред. В.А. Андреева. – 7-е изд., перераб. и доп. – М.: Горячая линия – Телеком, 2010. – 424 с.
2. Фокин В.Г. Когерентные оптические сети, СибГУТИ, 2015. Эл. доступ: <http://www.bibliocomplectator.ru/book/?&id=40534>
3. Листвин В.Н., Трещиков В.Н. DWDM системы. – Москва.: Издательский дом “Наука”, 2013. – 300 с.
4. Фокин В. Г., Оптические системы передачи и транспортные сети, - М.: ЭкоТрендз, 2008. - 288 с
5. Берлин А.Н., Высокоскоростные сети связи, ИНТУИТ, 2016, Эл. доступ: <http://www.bibliocomplectator.ru/book/?&id=57378>
6. Цуканов В.Н., Яковлев М.Я., Волоконно-оптическая техника, Инфра-Инженерия, 2015, Эл. доступ: <http://www.bibliocomplectator.ru/book/?&id=23310>
7. Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы. Сборник статей / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – 3-е изд. – М.: Техносфера, 2010. – 608 с.
8. Жирар А. Руководство по технологии и тестированию систем WDM. – М.: EXFO, 2001. – 251с.
9. Андреев В.А., Дашков М.В. Рамановские усилители на волоконно— оптических линиях передачи. – М.: Ириас, 2008
10. Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети, Москва, ЭкоТрендз, 1998
11. Иванов А.Б. Волоконная оптика. Компоненты, системы передачи, измерения. – М.: Изд-во Syrus Systems, 1999.
12. Складов О. К. Современные волоконно-оптические системы передачи, аппаратура и элементы. – М.: СОЛОН-Р, 2001. – 240с.
13. ГОСТ 26599-85 Системы передачи волоконно-оптические. Термины и определения.
14. ОСТ 45.104-97 Стыки оптические систем передачи синхронной цифровой иерархии. Классификация и основные параметры.
15. ОСТ 45.178-2001 Системы передачи с оптическими усилителями и спектральным уплотнением. Стыки оптические. Классификация и основные параметры.
16. ОСТ 45.190-2001 Системы передачи волоконно-оптические. Стыки оптические. Термины и определения.
17. Сектор стандартизации электросвязи (МСЭ-Т), <http://www.itu.int/rec/T-REC-G>
18. Официальный сайт Cisco, <https://www.cisco.com>
19. Официальный сайт T8 , <http://t8.ru>