

РЕКОНСТРУКЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ ОДНОМОДОВЫХ ВОЛС ПЕРВИЧНОЙ СЕТИ

Основные направления реконструкции могут быть сформулированы следующим образом:

- перевод существующей магистрали с длины волны 1310 нм на длину волны 1550 нм; за счет уменьшения коэффициента затухания ОВ существует возможность увеличения скорости передачи волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) и (или) увеличения длины регенерационных участков;
- использование модулей-компенсаторов дисперсии, которые уменьшают дисперсионное расширение оптических импульсов в линейном тракте;
- использование оптических усилителей (ОУ) в линейном оптическом тракте; ОУ могут использоваться в качестве: усилителя мощности на выходе регенератора, предварительного усилителя на входе фотоприемного устройства (ФПУ) и линейного усилителя;
- использование систем спектрального уплотнения DWDM, которые позволяют по одному ОВ организовать несколько высокоскоростных потоков (до 100 и более);
- использования для связи оптических солитонов, которые позволяют резко увеличить скорости передачи и длины регенерационных участков.

Параметры современных одномодовых оптических волокон

Параметры оптических волокон рекомендуемые МСЭ		№ рекомендации МСЭ			
		G.652	G.653	G.654	G.655
Тип волокна		SSF	DSF	LMF	±NZDSF
Окна прозрачности, нм		1300/1550	1500-1600	1550	1530-1565
Затухание, дБ/км	1310 нм	<1.0/0.34	<1.0	н/н	н/н
	1383 нм (максимум ОН)	<2.0	<2.0	н/н	н/н
	1550 нм	<0.5/0.25	<0.5/0.25	<0.22/ 0.15-0.19	<0.35/ 0.19-0.25
Диаметр поля моды, мкм	1310	9.0-10.0	н/н	н/н	н/н
	1550	9.0-10.0	7.0-8.3	10.5	8-11
Длина волны отсечки (кабеля/волокна)		1260/1280	1270/-	1350/1530	<1480/ <1470
Длина волны нулевой дисперсии, нм		1310±10	1550±25	1310±10	н/н
Наклон кривой D при нулевой дисперсии, нс/нм ² /км		0.093	0.085	0.06	<0.169

- ◎ **SSF** – стандартное оптическое волокно с нулевой дисперсией на $\lambda_{0D} \approx 1310$ нм;
- ◎ **DSF** – оптическое волокно со смещенной нулевой дисперсией вблизи $\lambda_{0D} \approx 1550$ нм;
- ◎ **LMF** – оптическое волокно с минимизированными потерями на $\lambda \approx 1550$ нм;
- ◎ **±NZDSF** – оптическое волокно с расширенным окном прозрачности в районе $\lambda \approx 1550$ нм, для возможности эффективного спектрального уплотнения (DWDM), а также в качестве компенсатора дисперсии.

Стандарты, оптических волокон согласно

рекомендациям МСЭ-Т.

- ◎ Стандарт G.650 дает общие определения типов волокон, перечень основных характеристик и параметров одномодовых волокон, а также методов измерения и контроля этих параметров.*
- ◎ Стандарт G.651 распространяется на многомодовое оптическое волокно с диаметром световедущей жилы 50 мкм и оболочки 125 мкм и на ВОК на его основе. В нем содержатся рекомендации по основным параметрам этих волокон, контролируемым характеристикам и допустимым нормам. Этот тип волокна в настоящее время используется только в коротких, внутриобъектовых ВОЛС с рабочей длиной волны 0,85 и редко 1,31 мкм.*

- ◎ *Стандарт G.652 стандартное одномодовое волокно с несмещенной дисперсией классифицируется стандартом G.652 (получило широкое распространение с 1983 года). Его параметры оптимизированы для диапазона длин волн 1,31 мкм, в котором волокно имеет нулевую хроматическую дисперсию и минимальное затухание. Диаметр световедущей жилы волокна — G.652 равен 9 мкм, а оболочки — 125 ± 2 мкм. Это волокно используется для одноволновой и многоволновой передачи (спектральное уплотнение), в том числе в диапазоне длин волн 1,55 мкм и обеспечивает передачу информации со скоростями до 10 Гбит/с на средние расстояния (до 50 км). Использование волокна — G.652 при более высоких скоростях передачи требует усложнения оконечной аппаратуры, что, в свою очередь, приводит к значительным финансовым затратам.*

- ◎ *Стандарт G.653 распространяется на одномодовое волокно со смещенной нулевой дисперсией в области $\lambda=1,55$ мкм. Это волокно имеет нулевую дисперсию в области минимальных потерь волокна, что достигается за счет более сложной структуры световедущей жилы, а именно специально заданному распределению коэффициента преломления по диаметру жилы. Волокно типа G.653 используется в протяженных магистральных широкополосных линиях и сетях связи, оно обеспечивает передачу информации на несколько сотен километров со скоростями до 40 Гбит/с. Однако по нему можно передавать только один спектральный канал информации, то есть оно не может быть использовано в волоконно-оптических системах и сетях, в которых применяются волоконно-оптические усилители и плотное оптическое спектральное мультиплексирование (DWDM-технологии). Причина этого заключается в высоких уровнях световой мощности в волокне после усиления и высокой плотности спектрального уплотнения, т. е. необходимости одновременной передачи большого числа независимых спектральных каналов по одному волокну.*

- ◎ *Стандарт G.654 содержит описание характеристик одномодового волокна и кабеля, имеющих минимальные потери на $\lambda=1,55$ мкм. Это волокно было разработано для применения в подводных ВОЛС. За счет больших, чем у волокна стандарта G.653 размеров световедущей жилы, оно позволяет передавать более высокие уровни оптической мощности, но в то же время, обладает более высокой хроматической дисперсией в диапазоне $\lambda=1,55$ мкм. Волокно типа G.654 не предназначено для работы на какой-либо другой волне излучения кроме $\lambda=1,55$ мкм.*

- ◎ Стандарт G.655 относится к волокну со смещенной ненулевой дисперсией — NZDSF (Non-Zero Dispersion Shifted Fiber). Это волокно предназначено для применения в магистральных волоконно-оптических линиях и глобальных сетях связи, использующих DWDM-технологии в диапазоне длин волн 1,55 мкм. Волокно — G.655 имеет слабую, контролируемую дисперсию в C полосе ($\lambda=1,53-1,56$ мкм) и большой диаметр световедущей жилы по сравнению с волокном типа G.653. Это снижает проблему четырехволнового смешения и нелинейных эффектов и открывает возможности применения эффективных волоконно-оптических усилителей.

Системы DWDM

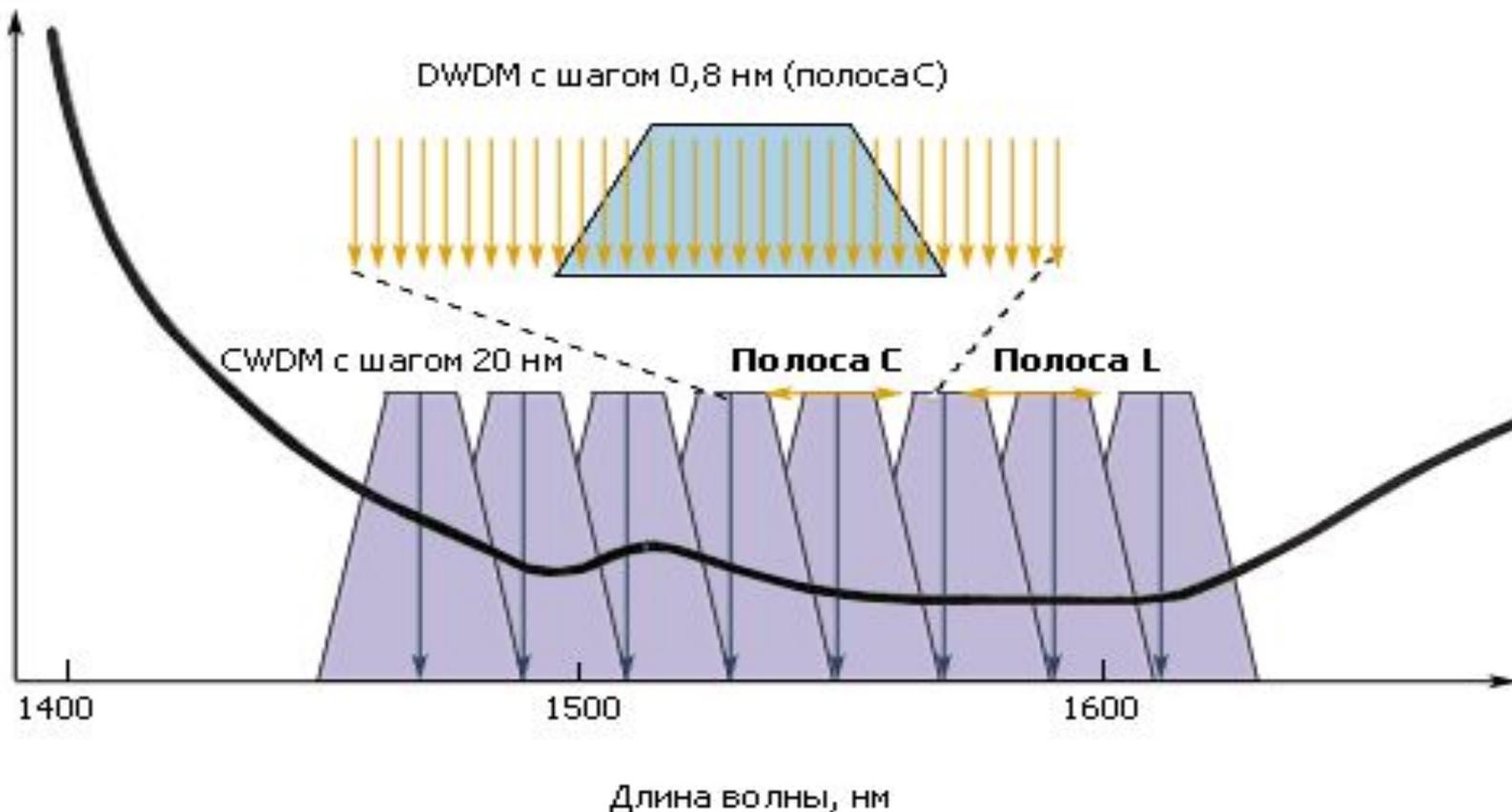
Развитие систем спектрального уплотнения - WDM (Wavelength Division Multiplexing), цель которых - увеличение суммарных скоростей передачи по ВОЛС для пользователя, основано на формировании оптических несущих с определенным шагом в диапазоне длин волн 1530-1560 нм.

Системы развивались в направлении DWDM (Dense WDM), HDWDM (High-Dense WDM), что вело не только к увеличению числа несущих, но и к существенному удорожанию плотных (шаг 0,8-0,4 нм) и сверхплотных (шаг 0,2-0,1 нм) систем WDM.

В результате появился новый класс решений - разреженные системы WDM, или CWDM (Coarse WDM), в которых используется очень большой шаг между несущими (20 нм) и дешевые средства их выделения - многослойные тонкопленочные оптические фильтры.

Системы CWDM быстро завоевали признание специалистов и стали широко применяться в городских сетях (MAN), получив название систем WDM класса Metro.

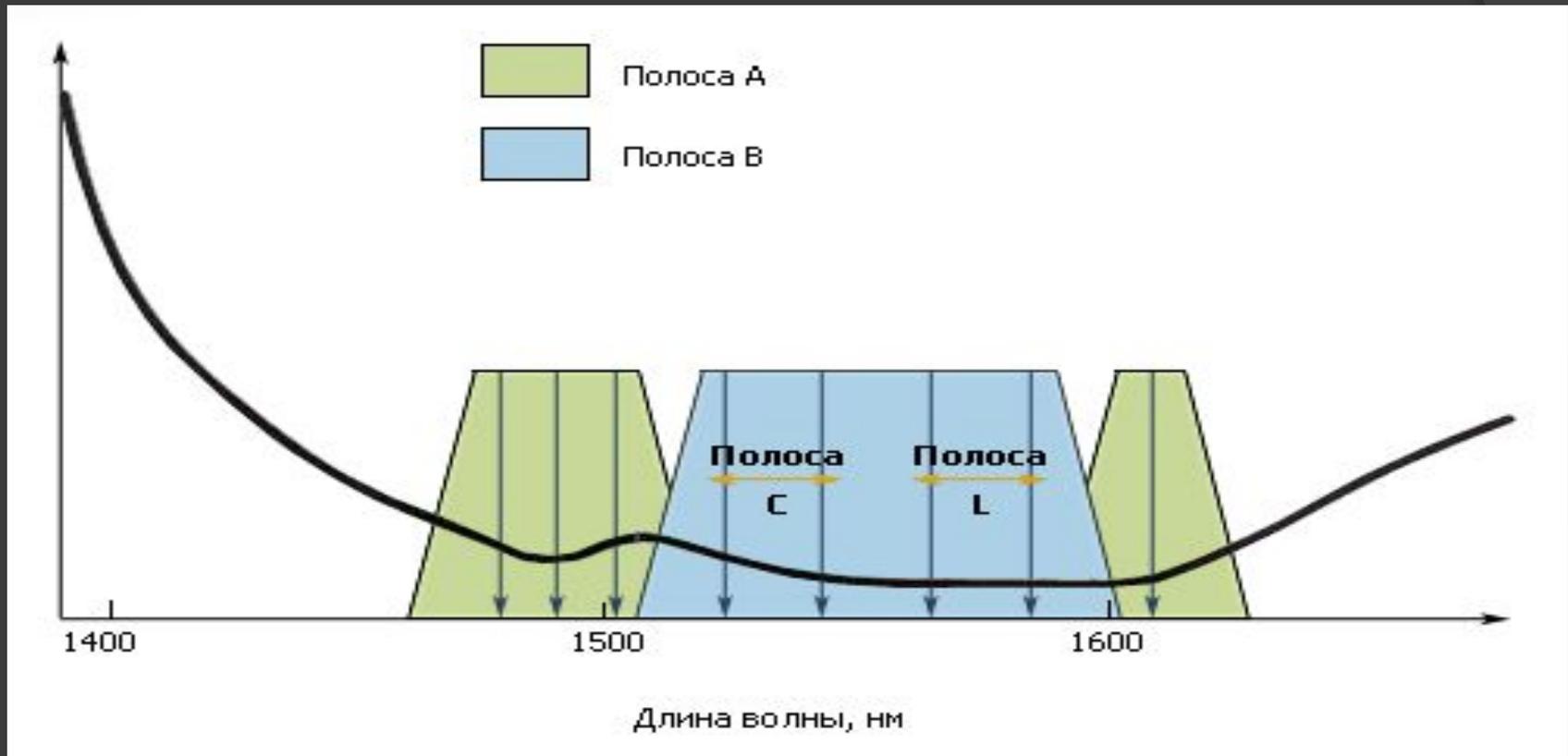
Гибридная модель частотного плана WDM



Простой метод формирования гибридного частотного плана состоит в следующем:

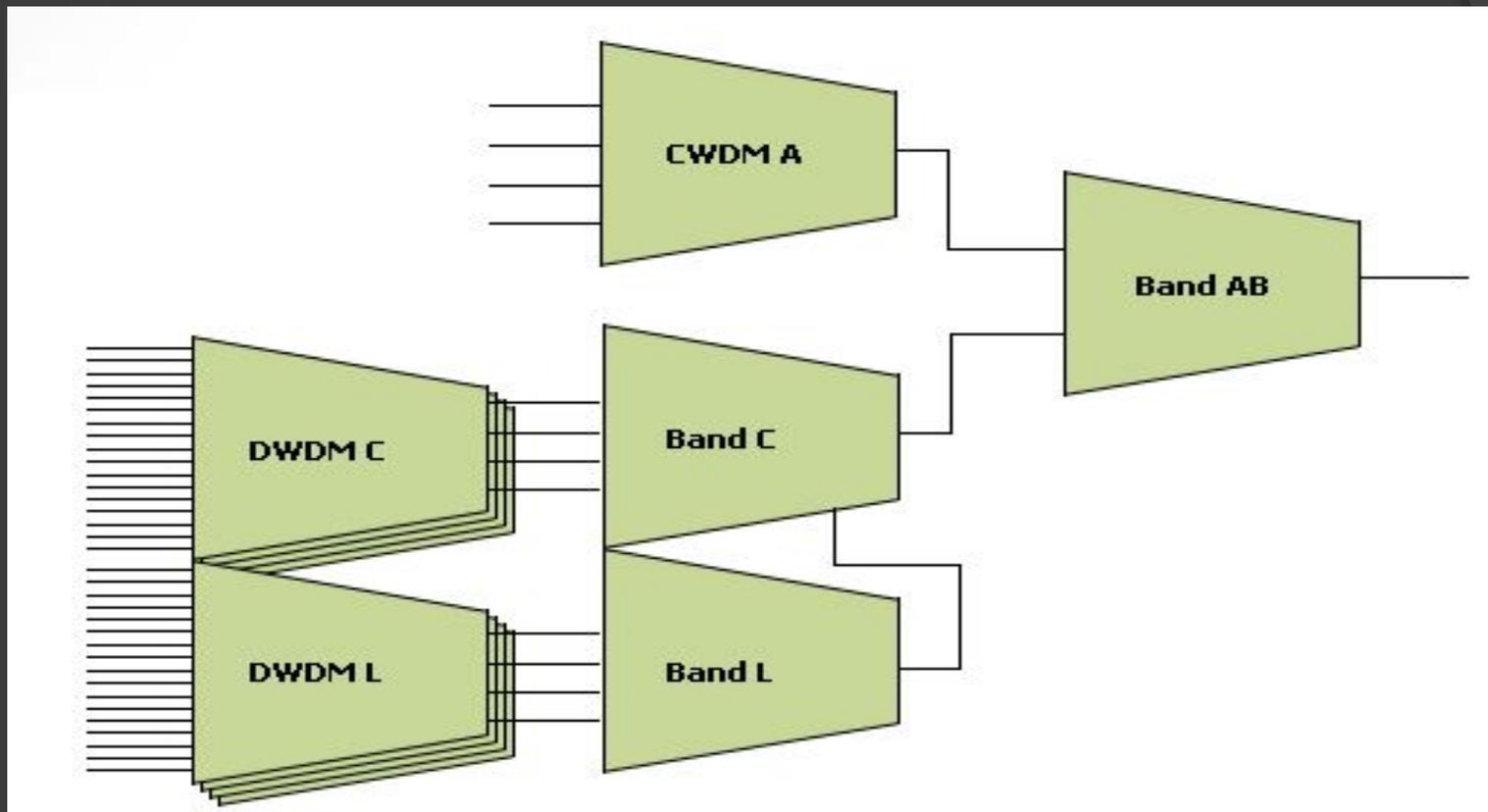
- используя план CWDM, разместить восемь основных каналов в полосе 1470-1610 нм.
- при необходимости увеличения числа каналов, заменить один из каналов CWDM на восемь каналов DWDM.

Схема гибридного несимметричного частотного плана



Наилучшей в этом случае является несимметричная схема, в которой незаменяемая полоса А состоит из трех расположенных слева каналов (несущие 1470, 1490 и 1510 нм) и одного канала справа (несущая 1610 нм), а заменяемая полоса В расположена внутри общей полосы А + В. Согласно расчетам максимально возможное число каналов в этом случае равно 32 (4 канала CWDM + 28 каналов DWDM). Таким образом, общее число каналов увеличивается в четыре раза: с 8 до 32

Схема мультиплексирования каналов CWDM + DWDM.



В результате оказывается возможным в полосе четырех заменяемых каналов сформировать 32 канала в полосе C и 32 канала в полосе L; таким образом, общее число каналов может достигать 68 (4 канала CWDM + 64 канала DWDM)

Использование CWDM.

В полную ширину области 1270—1610 нм входят 18 стандартных каналов с шагом 20 нм. Однако затухание в каналах различно

Характерные точки, нм	1270	1300	1310	1383	1550	1625
Затухание, дБ/км	0,36-0,38	0,35-0,36	0,33-0,35	0,31-0,35	0,19-0,20	0,20-0,23

Проблемы.

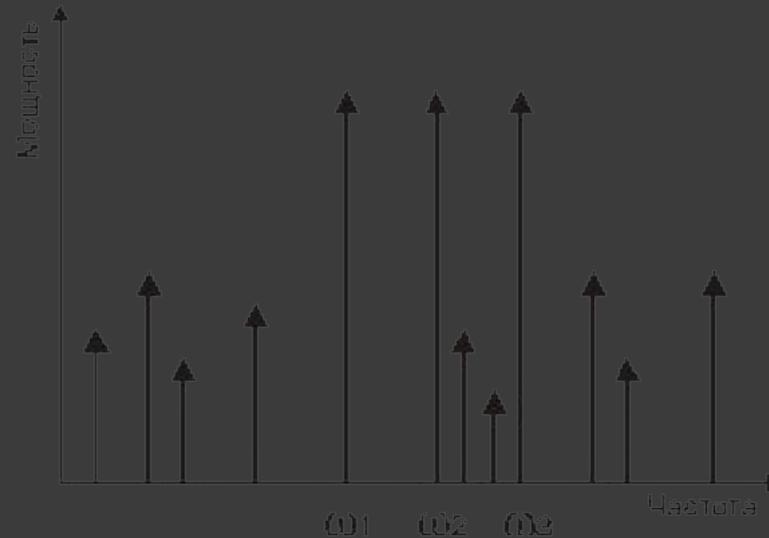
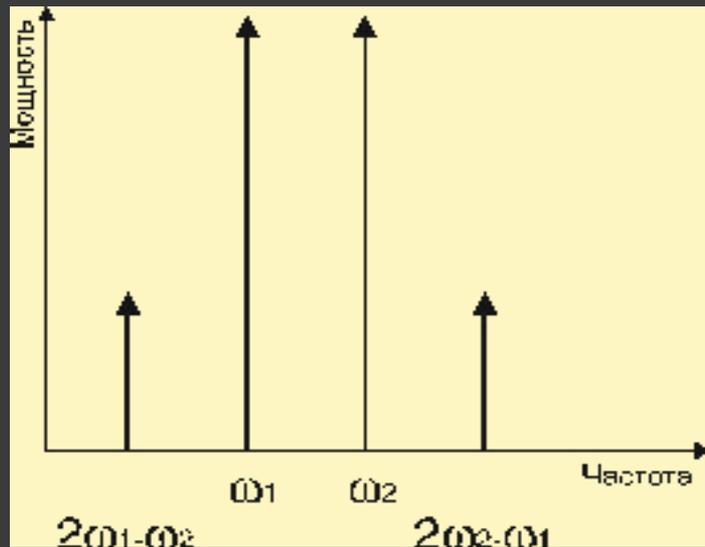
- влияния эффекта ЧВС (четырёхволнового смешения);
- воздействия помех от соседних каналов;
- ограничения суммарной мощности светового сигнала, вводимого в волокно.

Четырехволновое смешение.

Четырехволновое смешение FWM (Four-Wave Mixing) является одним из самых вредных нелинейных оптических явлений в системах WDM. При достижении критического уровня мощности излучения лазера нелинейность волокна приводит к взаимодействию трех волн с частотами ω_i , ω_j , ω_k , и появлению новой четвертой волны на частоте $\omega_i \pm \omega_j \pm \omega_k$. Некоторые частоты таких ложных сигналов могут попасть в рабочие полосы пропускания каналов. Число таких ложных сигналов определяется соотношением: $N^2(N-1)/2$, где N – число каналов.

Таким образом, в четырехканальной системе WDM возникает 24 ложных сигнала, а в 16-канальной уже 1920. Помехи такого типа могут стать катастрофическими для приемного устройства на конце линии.

Появление новых частот



Влияние четырехволнового смешения уменьшается при:

- увеличении эффективной площади волокна;
- увеличении абсолютного значения хроматической дисперсии.

Третий фактор

Влияние третьего фактора обусловлено тем, что максимальная мощность каждой оптической несущей $P_{\text{сmax}}$ (в дБм) зависит от полной оптической мощности, подаваемой с выхода транспондера на вход волокна P_{total} (оптическая мощность в дБм на выходе агрегатного канала WDM) и числа мультиплексированных длин волн n .

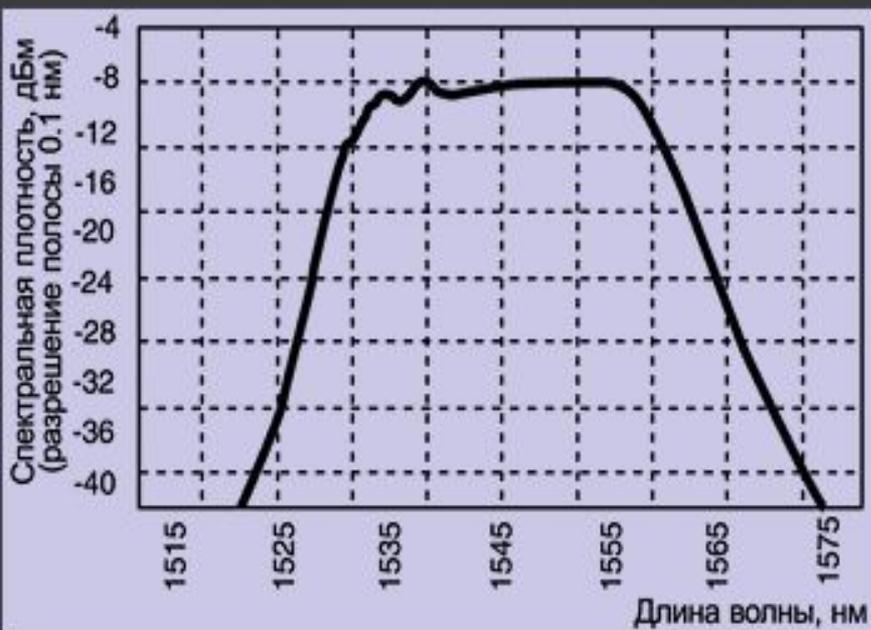
$$P_{\text{сmax}} = P_{\text{total}} - 10Lgn$$

Максимальная мощность на одну несущую WDM, дБм

Число несущих, n	2	4	8	16	32	64	128	256
$P_{total}=17$ дБм	14	11	8	5	2	-1	-4	-7
$P_{total}=30$ дБм	27	24	21	18	15	12	9	6

Оптические усилители в системах WDM.

В начале 1980-х годов Пэйн (Payne) и Ламинг (Laming) из Саутгэмптонского университета (University of Southampton) в Великобритании предложили усиливать оптические сигналы без оптоэлектронного преобразования с помощью волокна, легированного эрбием.



Усилитель EDFA состоит из отрезка волокна, легированного эрбием. В таком волокне сигналы определенных длин волн могут усиливаться за счет энергии внешнего излучения накачки. Особое значение усилители EDFA приобретают при построении сетей по технологиям PON, где требуется передача не только высоких уровней оптической мощности, но и значительных скоростей.

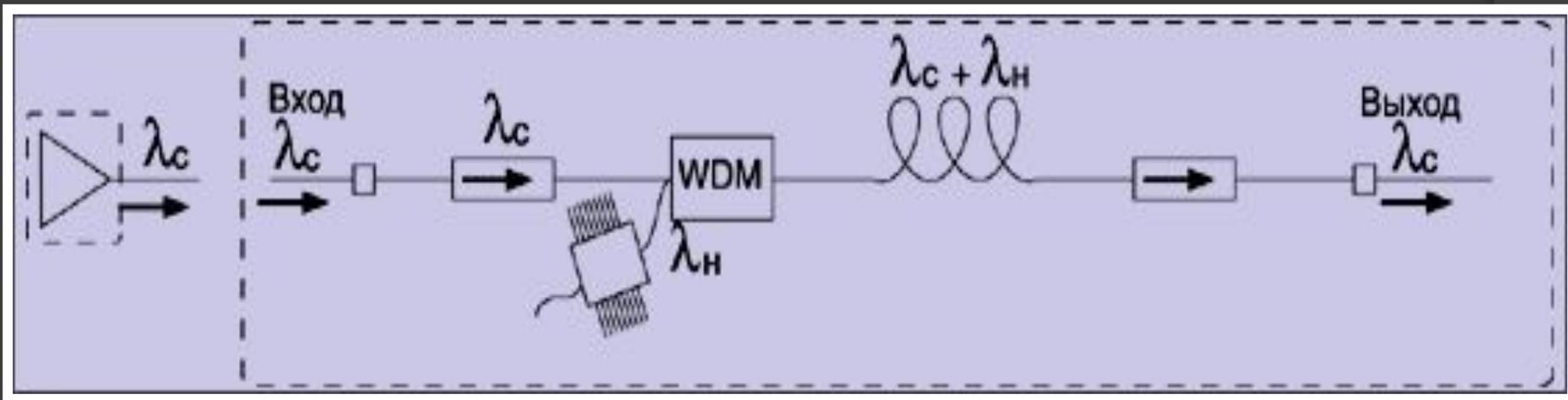
Лазеры накачки.

Важнейший компонент усилителя EDFA – лазер накачки.

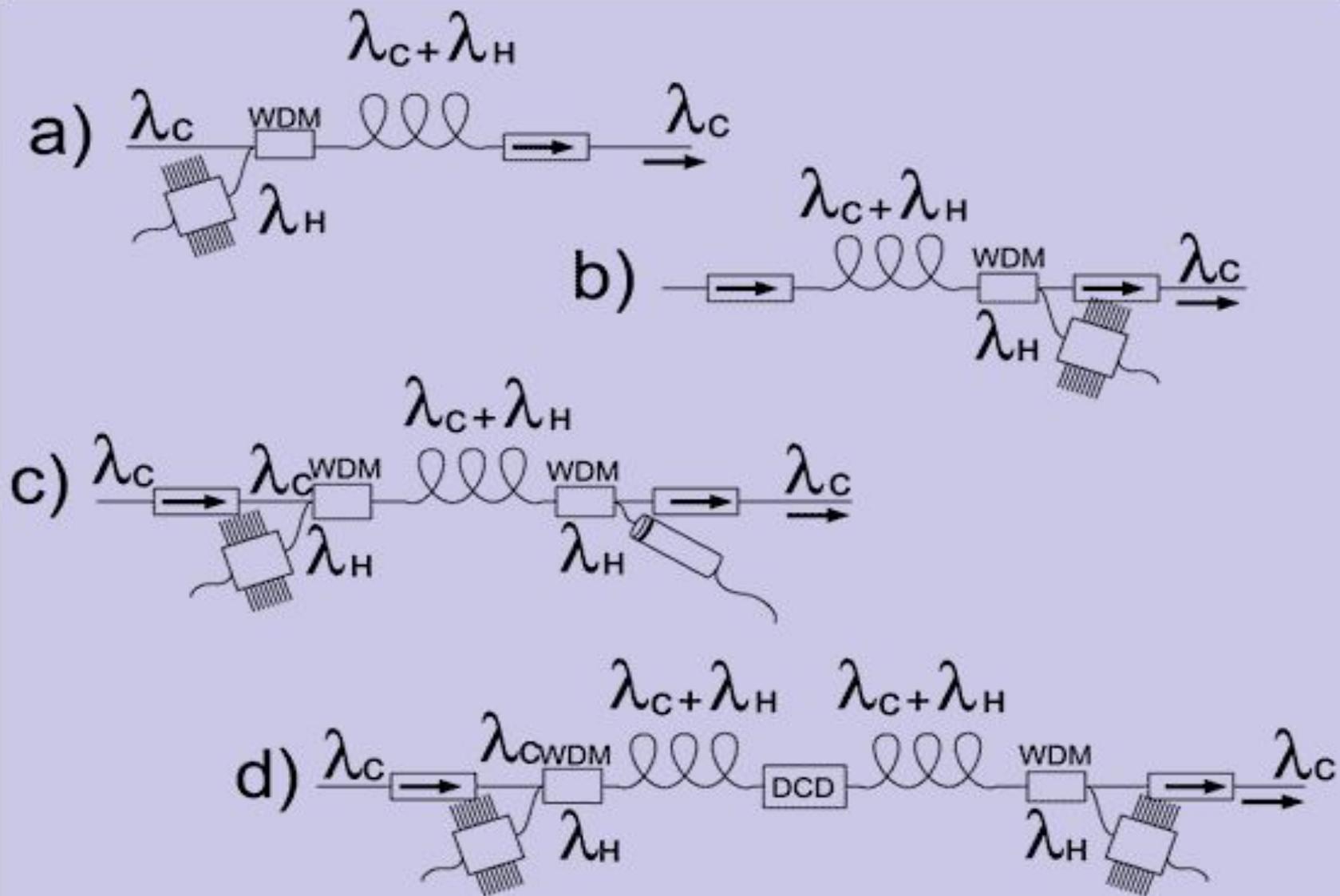
Он является источником энергии, за счет которой усиливается оптический сигнал.

Энергия лазера накачки распределяется в усилителе EDFA между всеми оптическими каналами. Чем больше число каналов, тем большая требуется мощность накачки.

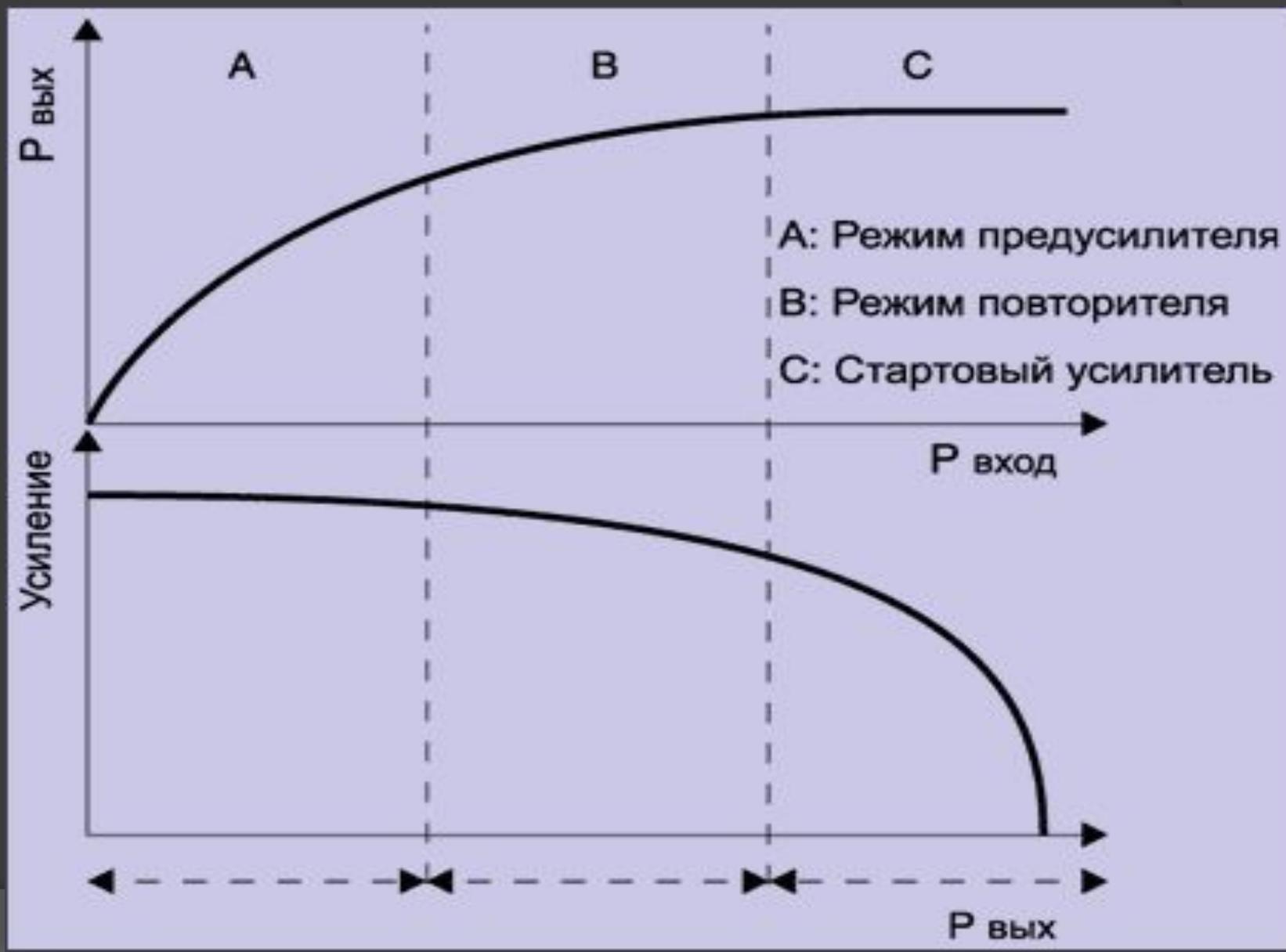
В усилителях EDFA, рассчитанных на большое количество каналов, часто используется несколько лазеров накачки.



Схемы накачки EDFA



Коэффициент усиления.

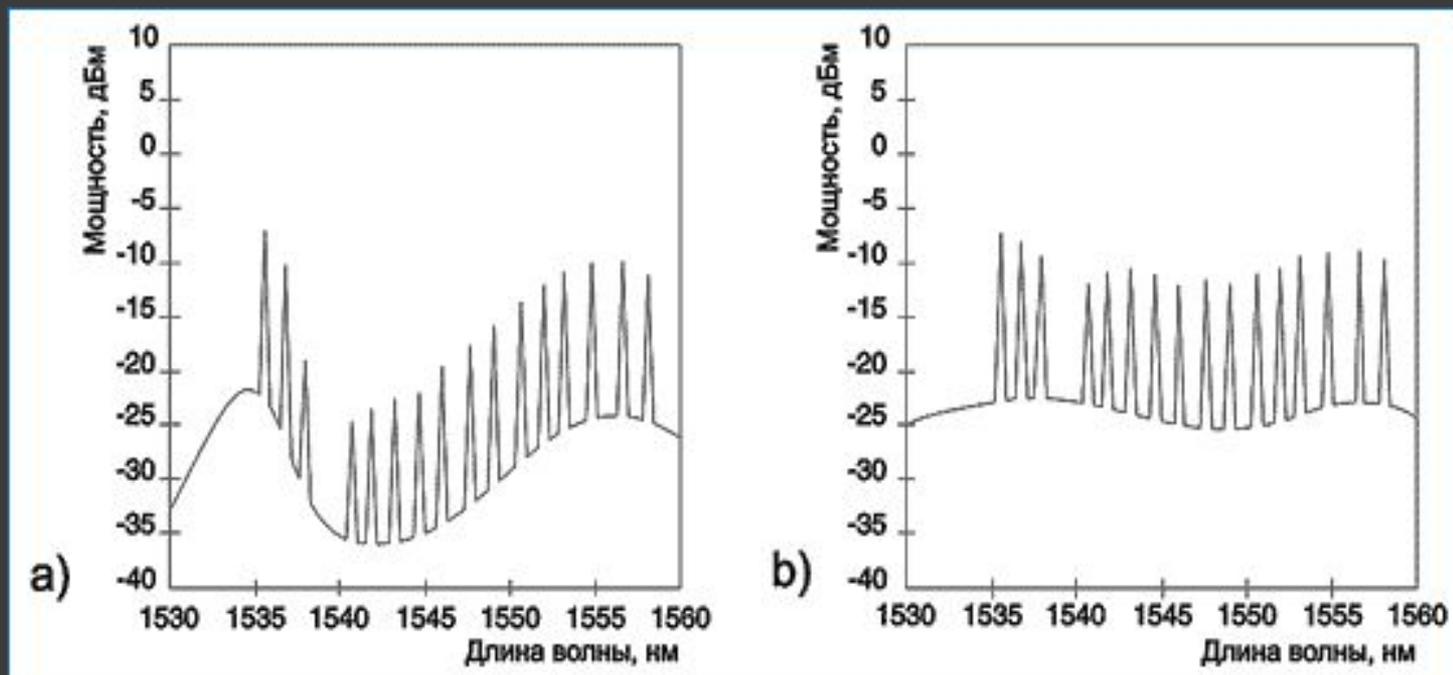


Усилитель EDFA имеет неравномерное спектральное распределение коэффициента усиления для слабых входных сигналов



Типовое спектральное распределение коэффициента усиления EDFA

В EDFA используется волокно на кварцевой или фторидной основе. Оба типа волокна имеют практически одинаковую внутреннюю структуру, но волокно на фторидной основе обеспечивает более высокий уровень легирования эрбием. Обе технологии обеспечивают приемлемое усиление в окне 1525-1560 нм, однако, спектральное распределение коэффициента усиления для усилителей EDFA на кварцевой основе менее однородное (а), чем для усилителей на фторидной основе (b).



Расчет длины регенерационного участка с использованием компенсаторов дисперсии

Исходными данными для расчета длины участка регенерации реконструируемой ВОЛС являются:

- ⊙ параметры существующей ВОЛС:
- ⊙ количество и длина всех участков регенерации;
- ⊙ марка и параметры, используемых ОВ;
- ⊙ вносимое затухание на всех существующих участках регенерации;
- ⊙ рефлектограммы всех ОВ, измеренные с двух сторон, для всех регенерационных участков;
- ⊙ параметры новой волоконно-оптической системы передачи:
 - длина волны излучения λ мкм;
 - ширина спектра излучения $\Delta\lambda$ мкм;
 - мощность излучателя P_0 мВт;
 - скорость передачи в линейном тракте C_T

Существующая методика расчета длины регенерационного участка состоит из двух независимых расчетов по затуханию и дисперсии. Она отличается простотой, но имеет ряд неточностей.

- ⊙ При расчете по затуханию не учитывается увеличение затухания для коротких оптических импульсов из-за дисперсионного уширения импульсов.
- ⊙ При расчете по дисперсии выбирается допустимое расширение импульса и не учитывается влияние скорости передачи на ширину спектра излучения источника и влияние амплитудно-частотной характеристики ФПУ на расширение регистрируемого импульса на входе решающего устройства.

Основные положения методики расчета максимальной длины регенерационного участка состоят в следующем:

- ⊙ определение уровня шума на входе решающего устройства регенератора;
- ⊙ выбор оптимального порога, отношения сигнал/шум и значения $BBER$ в зависимости от длины регенерационного участка;
- ⊙ определение максимального затухания на регенерационном участке;
- ⊙ определение длины регенерационного участка и длины компенсирующего ОВ.

Основными исходными данными для расчета являются:

- длительность такта линейного кода T_T ;
- дисперсия групповых скоростей β_2 или хроматическая дисперсия D_x , между которыми существует однозначная связь;
- коэффициент затухания на выбранной длине волны основного ОВ α и компенсационного ОВ $\alpha_{k'}$;
- ширина спектра излучения источника $\delta\omega$ или $\Delta\lambda$, между которыми существует однозначная связь.

В результате расчетов должны быть выбраны или рассчитаны:

- длительность импульса источника T_0 ;
- постоянная времени ФНЧ T_f ;
- коэффициент экстинкции;
- оптимальный относительный порог для решающего устройства $U_{пор}$;
- минимальное отношение сигнала к шуму SN_{min} .

Выражения для указанных расчетов приведены в литературе

*Результаты расчета длин участков
регенерации для различных
скоростей передачи*

Система передачи	STM-1	STM-4	STM-16	STM-64
Скорость передачи, Гбит/с	0.155	0.62	2.5	10
A_{\max} , дБ	46.3	40.7	31.3	23.1
$L_{ур}$, км	113	98.9	74	52.3
$L_{к0}$, км	7.6	6.6	5	3.5

Компенсаторы дисперсии типа DSM производитель Up Net

Параметры	DCM-10	DCM-20	DCM-40	DCM-60	DCM-80	DCM-100
Диапазон рабочих длин волн, нм	1525-1565	1525-1565	1525-1565	1525-1565	1525-1565	1525-1565
Максимальная входная мощность, дБ	30	30	30	30	30	30
Обратные потери, дБ	45	45	45	45	45	45
Эквивалентная длина ОВ, км	10	20	40	60	80	100
Хроматическая дисперсия, пс/км	-170	-337	-673	-1009	-1340	-1671
ПМД, пс/км	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3
Вносимое затухание, дБ	1,2	1,8	3,2	4,5	6,0	7,4



Основной составляющей частью этих устройств является волокно DCF (Dispersion Compensation Fiber) с отрицательным значением хроматической дисперсии в диапазоне длин волн 1525 нм - 1565 нм.

Оптические усилители

- ① усилителя мощности на выходе регенератора;
- ② предварительного усилителя на входе фотоприемного устройства (ФПУ)
- ③ усилитель мощности на выходе регенератора и предварительный ОУ на входе ФПУ;
- ④ усилитель мощности на выходе регенератора, предварительный ОУ на входе ФПУ и каскадное включение линейных ОУ.