

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра космического приборостроения и систем связи



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г.Локтионова

02 2018 г.

**АППАРАТУРА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ
ПЕРЕДАЧИ СО СПЕКТРАЛЬНЫМ РАЗДЕЛЕНИЕМ
КАНАЛОВ**

Методические указания,
по выполнению практической работы
для студентов, обучающихся по направлению подготовки
11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»
по дисциплине «Волоконная оптика в телекоммуникациях»

Курск 2018

УДК 004.716

Составители: А. А. Гуламов, А.А. Чуев

Рецензент

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник,
профессор кафедры *В.Г. Андронов*

Аппаратура волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением каналов: методические указания по выполнению практической работы / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: А.А. Гуламов, А.А.Чуев. - Курск, 2018. – 15 с.: ил. 1, табл. 8. – Библиогр.: с. 15.

Методические указания по выполнению практической работы содержат теоретические сведения и практические рекомендации, необходимые для освоения принципов и методов расчёта волоконно-оптических систем передач со спектральным разделением каналов.

Методические указания соответствуют требованиям рабочей программы дисциплины «Волоконная оптика в телекоммуникациях», утверждённой методическими комиссиями по направлению подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

Предназначены для студентов, обучающихся по направлению подготовки 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» по дисциплине «Волоконная оптика в телекоммуникациях», а также для студентов других направлений подготовки в области информационных технологий в системе высшего образования.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано печать ^{14.02.18} . Формат 60x841/16.

Усл. печ. л. ^{0,8} Уч.-изд. л. ^{0,8} . Тираж ¹⁰⁰ экз. Заказ. ¹⁰⁰⁴ Бесплатно

Юго-Западный государственный университет.

305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94

Содержание

1	Цели работы	4
2	Общие сведения о ВОСП со спектральным разделением	4
3	Аппаратная реализация ВОСП-СР	8
3.1	Технология <i>WDM</i> в сетях связи	8
3.2	Отношение сигнал/шум в оптоволоконном тракте	10
3.3	Расчёт числа оптических усилителей на регенерационном участке	11
4	Контрольные вопросы	15
5	Список рекомендуемой литературы для подготовки к практическому занятию	15

1 Цели работы

- изучение принципов построения телекоммуникационных систем со спектральным разделением оптических каналов;
- освоение методики расчета числа оптических усилителей на регенерационном участке.

2 Общие сведения о ВОСП со спектральным разделением

Волоконно-оптические системы передачи со спектральным разделением (ВОСП-СП) работают по волоконно-оптическим кабелям с кварцевыми одномодовыми оптическими волокнами (ОВ), соответствующими Рекомендациям МСЭ-Т G.652 и G.655. Основными характеристиками ОВ как линейной системы являются частотные характеристики потерь передачи и дисперсии. Используют оптические диапазоны *S*, *C* и *L* с наименьшими значениями потерь передачи в «окне прозрачности» с длиной волны $\lambda \approx 1,55$ мкм, показанные на рисунке 1.

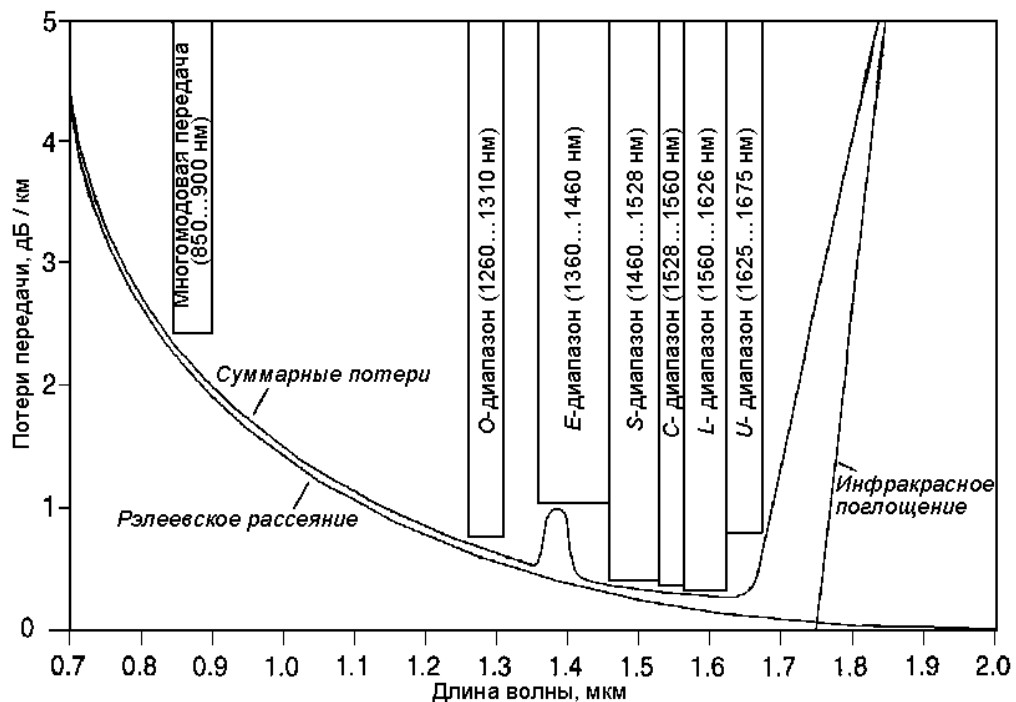


Рисунок 1 – «Окна прозрачности» и диапазоны передачи по оптическому волокну

В одном окне прозрачности организуют большое количество высокоскоростных оптических каналов, каждый из которых имеет собственную оптическую поднесущую частоту, рисунок 2. Иногда, по аналогии с радиорелейными системами, говорят о «стволах» и частотном плане аппаратуры, т.е. о распределении номинальных частот, величине шага и т.д.

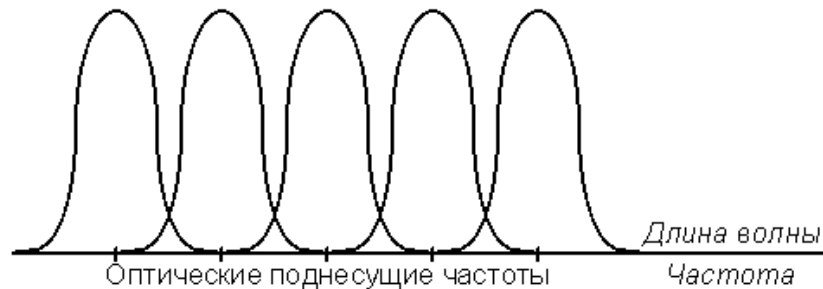


Рисунок 2 – Спектральное разделение оптических каналов

Структурная схема аппаратуры ВОСП-СР, реализующей технологию DWDM, представлена на рисунке 3.

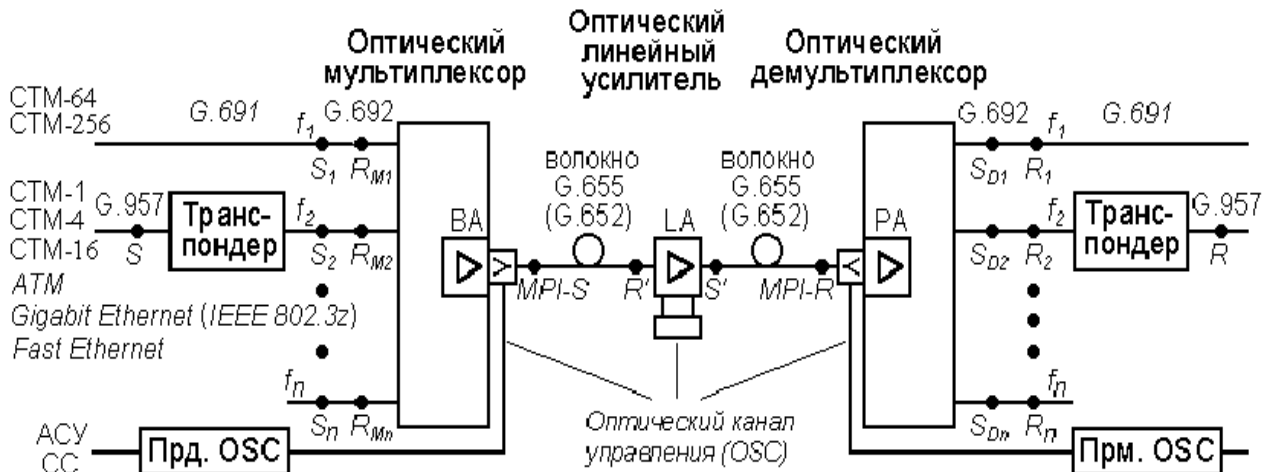


Рисунок 3 – Структурная схема аппаратуры ВОСП-СР

Аппаратура ВОСП-СР предназначена для передачи в одном или двух противоположных направлениях нескольких сигналов по одному волокну оптического кабеля с использованием источников излучения с различными длинами волн для передачи каждого сигнала.

Основными функциональными узлами аппаратуры являются оптические мультиплексоры и демультимплексоры, обеспечивающие объединение и разделение оптических каналов на передаче и приеме соответственно.

Повышение уровня группового сигнала осуществляется оптическими усилителями: на передаче – мощности (booster amplifier, BA), на приеме – предварительного усиления (preamplifier, PA) и в транзитных пунктах – промежуточными или линейными (line amplifier, LA).

В конечном пункте на входы оптического мультиплексора R_{mi} могут быть направлены оптические сигналы, отвечающие требованиям технологии DWDM Рек. G.692, в частности, цифровые потоки STM-64 и STM-256 СЦИ (SDH). В транспондере осуществляется преобразование длины волны оптического сигнала с переводом его в электрическую форму, регенерацией и излучением на требуемой длине волны с заданными характеристиками.

По месту размещения в оптическом тракте различают конечные, усилительные и транзитные пункты. Аппаратура усилительного пункта может включать оптические промежуточные усилители и компенсаторы дисперсии. Аппаратура транзитного пункта может быть выполнена в виде установленных «спина к спине» конечных пунктов или оптических мультиплексоров ввода/вывода для выделения сигналов оптических каналов.

Особенностью ВОСП-СР является наличие вынесенного за рабочий диапазон частот служебного оптического канала (OSC), что позволяет сохранять управляемость системой при выходе из строя элементов главного тракта. Техническая эксплуатация осуществляется с применением автоматизированных систем управления (АСУ) аппаратурой электросвязи. Аппаратура контролируется и управляется с помощью местного служебного терминала и/или с помощью рабочей станции сетевой системы управления и контроля оператора.

Система автоматизированного контроля и управления с соответствующим программным обеспечением обеспечивает следующие режимы управления и контроля: конфигурирование; обслуживание аварийных событий; контроль рабочих характеристик; выполнение функций автоматического выключения выходной оптической мощности при отсутствии входного оптического сигнала.

Функции контроля и управления должны осуществляться с помощью контроллера сетевого элемента и контроллеров блоков сетевых элементов, которые обрабатывают информацию об авариях с указанием степени срочности устранения аварии и статусе каждого блока. Контроллер каждого блока должен быть снабжен встроенным программным обеспечением, загрузка которого обеспечивается рабочей станцией или местным служебным терминалом. Процесс загрузки программного обеспечения не должен влиять на процесс передачи цифровых сигналов в оптических каналах. Должно быть обеспечено автоматическое опознавание версии программного обеспечения, а также типа и серийного номера каждого блока. Максимальное время между появлением неисправности и отображением информации об этой неисправности должно быть не более 3,0 с.

В аппаратуре предусматривают организацию служебной связи (СС) и телеобслуживания с использованием оптического служебного канала (*OSC*).

3 Аппаратная реализация ВОСП-СР

3.1 Технология WDM в сетях связи

В настоящее время основной технологией передачи по линиям ВОК цифровой транспортной сети является технология синхронного режима переноса, обеспечивающая высокую живучесть сетей, образованных на её базе. При организации широкополосных сетей интегрального обслуживания используются также технологии АТМ и IP. Технологии WDM, STM, АТМ, IP могут применяться самостоятельно или в виде цепочек: STM-WDM, АТМ-STM-WDM, АТМ-WDM, IP-АТМ-STM-WDM, IP-STM-WDM, IP-WDM.

Основным структурным элементом технологии STM является синхронный транспортный модуль n -го порядка (СТМ- n) с использованием временного разделения каналов (ВРК). Поскольку ВОК содержит несколько оптических волокон, можно говорить также о пространственном разделении сигналов различных систем передачи с образованием по каждому волокну оптического канала передачи. Использование технологии WDM позволяет расширить возможности построения сетей связи за счёт оптических каналов, образуемых с помощью аппаратуры ВОСП-СР методом спектрального разделения.

Накоплен достаточный опыт работы с аналоговыми системами передачи с частотным разделением каналов (АСП-ЧРК) по кабелю с медными жилами. При применении технологии WDM возникает ряд аналогичных задач. В обоих случаях групповой тракт содержит N каналов с различными несущими частотами, каждый из которых занимает определённую, выделяемую фильтром на приёме, полосу частот; полоса частот группового тракта ограничена. Качество передачи определяется отношением сигнал/шум (ОСШ), причём шум на выходе канала складывается из флуктуационной и переходной составляющих. ОСШ в канале зависит от уровня сигнала в канале, поэтому необходима коррекция (выравнивание) амплитудно-частотной характеристики (АЧХ)

тракта. Важной является проблема определения мощности группового сигнала, если известны мощности и структура канальных сигналов. Существует оптимальный уровень группового сигнала, превышение которого ведёт к возникновению переходов между каналами из-за нелинейности и прекращению связи. Поэтому в системе передачи имеется система автоматической регулировки уровня (АРУ) сигнала.

Технические решения перечисленных проблем, известные в АСП-ЧРК, внедрены в аппаратуре ВОСП-СР. Полосы частот каналов передачи Δf_k в ГГц, как правило, принимают численно равными скоростям передачи из ряда СТМ-*n*: 2,5 Гбит/с (СТМ-16), 10 Гбит/с (СТМ-64) или 40 Гбит/с (СТМ-256). Полоса частот оптического канала $\Delta \nu_k$ определяется селективностью фильтра демультиплексора. При DWDM используются шаги сетки частот Δ : 100 ГГц, 50 ГГц, 25 ГГц и 12,5 ГГц. Стоит отметить, что шаг сетки частот Δ должен превышать (с некоторым запасом на расфилтровку) полосу частот оптического канала $\Delta \nu_k$, $\Delta \nu_k > \Delta f_k$.

Проблема коррекции АЧХ в аппаратуре ВОСП-СР связана с последовательным включением на участке регенерации большого числа оптических усилителей (*Optical amplifier – OA*). В настоящее время в основном применяются усилители на основе волокна, легированного эрбием, имеющие неравномерную АЧХ усиления в рабочей полосе частот. Результирующая неравномерность, пропорциональная числу усилителей, эквивалентна снижению оптического ОСШ в канале.

Подсистема АРУ группового оптического сигнала на выходе ОА основана на измерении уровня выходного оптического сигнала, изменяющегося при включении или выключении отдельных оптических каналов. Регулирующим элементом служит переменный оптический аттенюатор. Время установления заданного уровня составляет обычно менее десяти миллисекунд.

3.2 Отношение сигнал/шум в оптоволоконном тракте

В ВОСП принято так называемое оптическое отношение сигнал/шум (ООСШ), равное отношению мощности полезного сигнала P_c к мощности шума $P_{ш}$ в спектральном интервале $\Delta\nu_k$, определяемом полосой пропускания оптического фильтра или демультиплексора. При распространении сигнала по линии ООСШ может только убывать.

Оптические усилители характеризуются коэффициентом шума (1) (шум-фактором NF), определяемым как отношение ООСШ на входе и выходе.

$$NF = \frac{P_{c,вх} / P_{ш,вх}}{P_{c,вых} / P_{ш,вых}} = \frac{ООСШ_{вх}}{ООСШ_{вых}} . \quad (1)$$

При определении коэффициента шума исходят из того, что на вход подаётся идеальный когерентный сигнал частоты ν , имеющий минимальную, определяемую квантовыми флуктуациями, мощность шума, $P_{ш.вх} = h \nu \Delta\nu_k$, где $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$ Ватт·с². У такого идеального сигнала оптическое отношение сигнал/шум максимально возможное, но не бесконечное:

$$ООСШ_{вх} = P_{c.вх} / h \cdot \nu \cdot \Delta\nu_k . \quad (2)$$

Мощность шума $P_{ш.вых}$ на выходе оптического усилителя состоит из мощности шума $h \cdot \nu \cdot \Delta\nu_k$, связанной в квантовыми флуктуациями, и мощности P_{ASE} усиленного спонтанного излучения:

$$P_{ш.вых} = h \cdot \nu \cdot \Delta\nu_k + P_{ASE} . \quad (3)$$

Мощность усиленного спонтанного излучения P_{ASE} определяется соотношением:

$$P_{ASE} = 2 \cdot n_{sp} \cdot (G - 1) \cdot h\nu \Delta\nu_k, \quad (4)$$

где n_{sp} – коэффициент спонтанной эмиссии, равный для идеального усилителя единице.

Учитывая, что $G = P_{с.в.ых} / P_{с.в.х}$, выразим коэффициент шума через коэффициент усиления и коэффициент спонтанной эмиссии:

$$NF = \frac{1}{G} \left[1 + 2n_{sp} (G - 1) \right] \quad (5)$$

при этом мощность усиленного спонтанного излучения будет равна:

$$P_{ASE} = (NF \cdot G - 1) h\nu \Delta\nu_k. \quad (6)$$

При $G \gg 1$ получим: $NF \approx 2n_{sp}$. Значение коэффициента шума обычно выражают в логарифмическом масштабе: $nf = 10 \cdot \lg(NF)$. В идеальном усилителе ($n_{sp} = 1$), а с большим усилением теоретический предел коэффициента шума равен 2 ($nf = 3$ дБ).

3.3 Расчёт числа оптических усилителей на регенерационном участке

Между оптическими усилителями i -того регенерационного участка имеется существенное затухание усилительного участка a_i , поэтому необходимо учитывать снижение защищённости сигнала от квантовых шумов и ASE в каждом из них.

Рассмотрим методику нахождения результирующей помехозащищённости на участке регенерации, содержащем N_{yy} усилительных участков. На рисунке 4 приведён фрагмент диаграммы уровней с N оптическими усилителями.

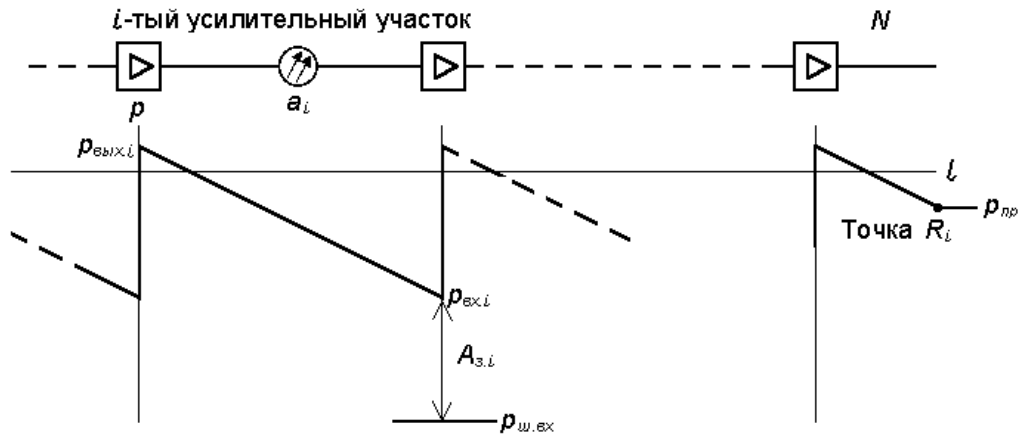


Рисунок 4 – К расчёту ООСШ участка регенерации с N оптическими усилителями

Помехозащищённость на i -м усилительном участке $A_{з.i}$ равна разности уровня сигнала на входе оптического усилителя $P_{вх.i}$ и приведённого ко входу усилителя уровня шума $P_{ш.вх}$:

$$A_{з.i} = P_{вх.i} - P_{ш.вх}. \quad (7)$$

Уровень сигнала на входе усилителя $P_{вх.i}$ ниже уровня на выходе предыдущего усилителя $P_{вых.i-1}$ на величину затухания i -го усилительного участка a_i : $P_{вх.i} = P_{вых.i-1} - a_i$.

Таким образом:

$$A_{з.i} = P_{вх.i} - P_{ш.вх} = P_{вых.i-1} - a_i - P_{ш.вх}. \quad (8)$$

На выходе цепочки оптических усилителей, образующих регенерационный участок, в точке R_i с уровнем приёма $P_{пр}$ помехозащищённость от i -го усилительного участка $A'_{з.i}$ не изменится и составит:

$$A'_{з.i} = P_{пр} - P_{ш.i}, \quad (9)$$

где $P_{ш.i}$ – уровень шума от i -го усилительного участка.

Приравнивая $A_{з.i}$ и $A'_{з.i}$, получим:

$$P_{\text{ВЫХ.}i} - a_i - P_{\text{Ш.ВХ}} = P_{\text{пр}} - P_{\text{Ш.}i}, \quad (10)$$

откуда

$$P_{\text{Ш.}i} = P_{\text{пр}} - P_{\text{ВЫХ.}i} + a_i + P_{\text{Ш.ВХ}}. \quad (11)$$

Мощность помехи в точке R_i от i -го усилительного участка составит:

$$P_{\text{Ш.}i} = 10^{0,1 \cdot P_{\text{Ш.}i}}. \quad (12)$$

Шумы, возникающие на отдельных усилительных участках, имеют независимый характер, поэтому суммарная мощность шума в точке R_i составит:

$$P_{\text{Ш.}\Sigma} = \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot P_{\text{Ш.}i}} = \sum_{i=1}^N 10^{0,1 \cdot P_{\text{пр}} + P_{\text{Ш.ВХ}} - P_{\text{ВЫХ.}i} + a_i}. \quad (13)$$

Для оценки максимальной длины регенерационного участка по затуханию можно принять, что все усилительные участки имеют одинаковые параметры (затухание a и уровни оптического сигнала на выходе $P_{\text{ВЫХ}}$ и входе $P_{\text{ВХ}}$ усилителей).

В этом случае:

$$P_{\text{Ш.}i} = N_{\text{yy}} \cdot 10^{0,1 \cdot P_{\text{пр}} + P_{\text{Ш.ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}} + a}; \quad (14)$$

$$P_{\text{Ш.}\Sigma} = 10 \cdot \lg N_{\text{yy}} + P_{\text{пр}} + P_{\text{Ш.ВХ}} - P_{\text{ВЫХ}} + a, \text{ дБ}. \quad (15)$$

Помехозащищённость в точке R_i составляет:

$$\begin{aligned} A_{3,R} &= P_{\text{пр}} - P_{\text{Ш.}\Sigma} = P_{\text{пр}} - 10 \cdot \lg N_{\text{yy}} - P_{\text{пр}} - P_{\text{Ш.ВХ}} + P_{\text{ВЫХ}} - a = \\ &= P_{\text{ВЫХ}} - 10 \cdot \lg N_{\text{yy}} - P_{\text{Ш.ВХ}} - a. \end{aligned} \quad (16)$$

С учётом

$$N_{\text{yy}} = L_{\text{рег}} / L_{\text{yc}} : A_{3,R} = P_{\text{ВЫХ}} - P_{\text{Ш.ВХ}} - a - 10 \cdot \lg (L_{\text{рег}} / L_{\text{yc}}), \quad (17)$$

где $L_{\text{рег}}$ и $L_{\text{ус}}$ – соответственно длина регенерационного и усилительного участков.

Длина усилительного участка пропорциональна усилению g EDFA (за вычетом затуханий A_p разъёмных соединителей, число которых обозначим n_p) и обратно пропорциональна коэффициенту затухания ВОК α_k с учётом добавки за счёт затухания $A_{\text{св}}$ сварных соединений в местах сращивания строительных длин $l_{\text{стр}}$. Эквивалентное значение коэффициента затухания $\alpha_{\text{экв.к}}$ можно положить равным: $\alpha_{\text{экв.к}} = \alpha_k + A_{\text{св}}/l_{\text{стр}}$. Отсюда:

$$L_{\text{ус}} = g - A_p \cdot n_p \cdot \left(\alpha_k + \frac{A_{\text{св}}}{l_{\text{стр}}} \right)^{-1}. \quad (18)$$

Считая в (16) параметры $A_{3,R}$, $P_{\text{вых}}$, $P_{\text{ш.вх}}$, a и $L_{\text{ус}}$ известными, можно дать оценку максимальной длины регенерационного участка по усилению. Поскольку OA располагают, как правило, в населённых пунктах, то реальные значения a_i существенно различаются, и необходимо пользоваться формулой (13).

Снижение величины шума на усилительном участке позволяет пропорционально увеличить их число без изменения качества передачи. Например, сокращение затухания участков на 3 дБ даёт возможность увеличить длину регенерационного участка вдвое. Так, для оптического канала для скорости 2,5 Гбит/с приводятся значения: 8 участков с затуханием по 22 дБ или 5×30 или 3×33 (общее затухание 176, 150 или 99 дБ).

Эквивалентное повышение ОСШ позволяет получить упреждающую коррекцию ошибок (*Forward Error Correction – FEC*). За счёт введения избыточности в цифровой сигнал (обычно с применением кода Рида-Соломона, ценой прироста скорости передачи от 7 до 23%) происходит исправление одиночных битовых ошибок, что позволяет снизить требования к ООСШ до 7 дБ (эквивалентно увеличению длины регенерационного участка в 5 раз!).

4 Контрольные вопросы

1. Какие оптические диапазоны с наименьшими значениями потерь передачи в «окнах прозрачности» используют с длиной волны $\lambda \approx 1,55$ мкм?

2. Какие виды пунктов различают по месту размещения в оптическом тракте? Что включает в себя аппаратура каждого из видов?

3. Что такое ООСШ? Чему оно равно? Что такое шум-фактор?

4. Каким образом можно существенно увеличить длину регенерационного участка без изменения качества передачи?

5 Список рекомендуемой литературы для подготовки к практическому занятию

1. Павлов И.П., Снегов А.Д. Волоконно-оптические системы передачи со спектральным разделением. Часть 1. Принципы построения аппаратуры: Учебное пособие. – М.: МТУСИ, 2013.– 31 с.

2. РД 45.286-2002 Аппаратура волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением. Технические требования.

3. Султанов А.Х., Акульшин В.Н. Сетевые аспекты многоканальных телекоммуникационных систем: принцип построения и расчёт: Учебное пособие. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – 200 с.

4. Убайдуллаев Р.Р. Протяжённые ВОЛС на основе EDFA.– Lightwave Russian edition.– №1–2013.–С. 22-28.