

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО
ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ»
(МИИТ)

**О П Т И Ч Е С К И Е
Т Е Л Е К О М М У Н И К А Ц И О Н Н Ы Е
С И С Т Е М Ы**
**“ П р о е к т и р о в а н и е с е т и с в я з и п о
т е х н о л о г и W D M »**

**Задания на курсовой проект с
методическими указаниями для
студентов III курса**
Направления подготовки:
Инфокоммуникационные системы и сети связи
Профиль:
Оптические сети и системы связи

1 ЗАДАНИЕ НА КУРСОВОЙ ПРОЕКТ

1.1 Выбор участка проектирования

Исходные данные выбираются по двум последним цифрам учебного шифра студента.

Участок проектирования и станция с количеством выделяемых волн выбирается студентом по последней цифре учебного шифра из таблицы 1.1. Полная схема сети связи представлена в Приложении 1.

Таблица 1.1 – Участок проектирования

Последняя цифра шифра	Проектируемый участок	Станция / количество выделяемых волн
0	Мармыж - Орел	Поныри / 4
1	Поныри - Ясногорск	Мценск / 5
2	Орел - Столбовая	Тула / 4
3	Щигры - Мценск	Еропкино / 5
4	Курск - Горбачево	Орел / 4
5	Еропкино - Тула	Горбачево / 5
6	Подольск - Орехово-Зуево	Панки / 4
7	Лазарево - Люблино	Серпухов / 5
8	Серпухов - Орехово-Зуево	УМЖД* / 4
9	Ясногорск - Куровская	Столбовая / 5

* - Управление московской железной дороги

По предпоследней цифре учебного шифра выбирается количество мультиплексоров ввода-вывода (МВВ). Если предпоследняя цифра шифра четная – то один МВВ на проектируемый участок, не четная – два МВВ на проектируемый участок.

1.2 Выбор оптического кабеля и характеристик ОВ

Выбор оптического кабеля производится по сумме двух последних цифр учебного шифра. Если сумма четная – то выбирается ОКЛ

если не четна – то выбирается ОКБ-М

Кроме основных параметров кабелей, в таблицах 1.2 и 1.3 приведены значения хроматической дисперсии и строительной длины по вариантам.

Таблица 1.2 – Характеристики ОВ для кабеля ОКБ-М8Т

Параметр	Предпоследняя цифра учебного шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Хроматическая дисперсия:										
На $\lambda=1,31$ мкм	1,32	1,35	1,4	1,43	1,3	1,34	5,6	5,5	5,21	4,9
На $\lambda=1,55$ мкм	-5,5	-4,5	-0,35	-2,05	-1,31	-4,05	-4,21	-5,05	-3,3	-5,7
Строительная длина, км	2	2,5	3	3,5	4	4,5	3	5	2	4

Таблица 1.3 – Характеристики ОВ для кабеля ОКЛ

Параметр	Предпоследняя цифра учебного шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Хроматическая дисперсия:										
На $\lambda=1,31$ мкм	1,3	1,25	1,38	1,41	1,33	1,29	5,58	5,8	5,11	3,8
На $\lambda=1,55$ мкм	-5,7	-3,3	-0,55	-4,21	-4,05	-1,31	-2,05	-0,35	-4,5	-5,5
Строительная длина, км	4	2	5	3	4,5	4	3,5	3	2,5	2

2 РАСЧЕТЫ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ СЕТИ СВЯЗИ WDM

2.1 Оценка технологии WDM и типа оптического кабеля

Проектирование волоконно-оптических линий передачи с использованием технологии WDM и аппаратуры волоконно-оптических систем передачи со спектральным разделением оптических каналов ведется на основе исходных данных, заложенных в проектном задании, а также на основе предварительной оценки технологий WDM по числу оптических каналов и типу применяемого оптического кабеля.

Основным каналобразующим оборудованием для ВОСП-СР являются терминалы STM-16 и STM-64, используемые для передачи различного трафика: сигналов СЦИ и ПЦИ, ячеек ATM, пакетов IP, передачи и распределения сигналов цифрового телевидения и др. При этом предусматривается реализация различных цепочек передачи: ПЦИ-СЦИ-ВОСП-СР, ATM-СЦИ-ВОСП-СР, IP-ATM-СЦИ-ВОСП-СР и IP-СЦИ-ВОСП-СР. Параметры, ограничивающие применение в оптических каналах STM-16 и STM-64, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры применения в оптических каналах STM-16 и STM-64

Параметр	STM-16 (2,5 Гбит/с)	STM-64 (10 Гбит/с)
Минимальная защищенность от шумов, дБ	18...21	27...31
Допустимая дисперсия в оптическом кабеле, пс/нм	10500	1600
Ограничения из-за поляризационной модовой дисперсии, км	нет	<400

На основе ВОСП-СР может выполняться как реконструкция существующих ВОЛП с целью повышения их пропускной способности, так и строительство новых, являющихся частью оптической транспортной сети (Optical Transport Network – OTN).

Выбор числа оптических каналов определяется необходимостью удовлетворения потребностей в передаче различного трафика и, как правило, увязывается с ростом пропускной способности проектируемой ВОЛП от 10

до 100 Гбит/с и выше на ближайшую и отдаленную перспективу. В случае реконструкции ВОЛП число оптических каналов может быть ограничено возможностями проложенного кабеля, например, с волокном G.652.

Исходя из назначения проектируемой ВОСП-СП, схемы организации связи, пропускной способности, дальности передачи на основе технико-экономических расчетов выбирается одна из технологий WDM, таблица 2.2.

Таблица 2.2 – Технология спектрального разделения (СП)

Параметр	CWDM (Course WDM) неплотное СП	DWDM (Dense WDM) плотное СП	HDWDM (Higher WDM) высокоплотное СП
Расстояние между каналами, нм	20	Не менее 0,8	Менее 0,8
Диапазон длин волн	O,E,S,C,L	S,C,L	C,L,U
Типичное число каналов	Не более 16	Десятки	Сотни
Стоимость	Низкая	Высокая	Высокая

Лучшим для передачи сигналов ВОСП-СП является волокно G.655 с ненулевой смещенной дисперсией (NZDSF). Это волокно в пределах рабочего диапазона (1550... 1565 нм) имеет небольшую, хорошо контролируемую хроматическую дисперсию от 3 пс/нм-км на длине волны 1530 нм до 0,7 пс/нм-км на длине волны 1560 нм. Такого значения дисперсии достаточно, чтобы подавить четырехволновое смешение.

Ограничение общей протяженности из-за влияния хроматической дисперсии приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Ограничения общей протяженности, км, из-за влияния хроматической дисперсии

Тип оптического волокна	STM-16	STM-256
Стандартное одномодовое волокно ОВ Рек. G652 - SF	525	80
Одномодовое ОВ Рек. G.655 - NZDSF	1909	291

После выбора типа технологии WDM и типа ОВ осуществляют выбор аппаратуры и приступают к разработке схемы организации связи. Выбор аппаратуры первоначально сводится к определению оптических интерфейсов (стыков) на основе рекомендации МСЭ-Т G.692. После этого выбираются

аппаратура и её производитель, а затем тип оптического кабеля и его производитель. Отметим, что на территории Российской Федерации применительно к аппаратуре ВОСП-СР действуют нормативные документы РД 45.286 и ОСТ 45.178, а наиболее применяемым является ОВ рекомендации G.652.

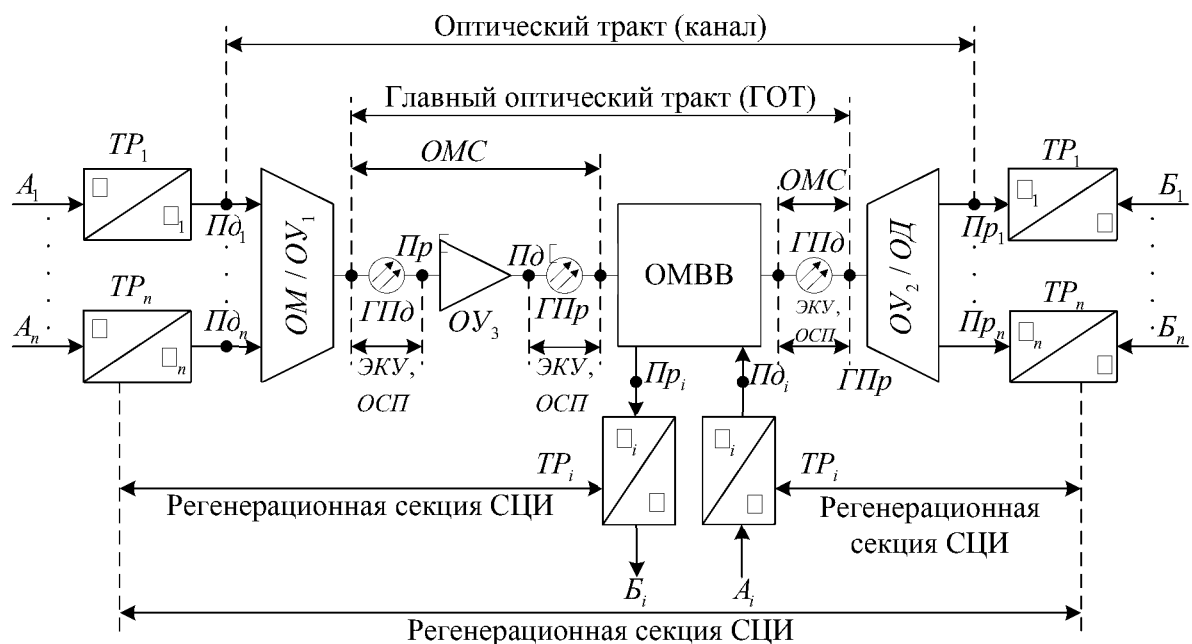
2.2 Схема организации связи на основе технологии WDM

Выбор той или иной конфигурации проектируемой ВОЛП определяется сетевой конфигурацией — топологией сети. На ЕСЭ РФ для технологии WDM основными топологиями являются: линейная цепь с вводом/выводом, кольцевая структура и смешанные структуры, включающие в себя связанные кольца и линейные цепи с вводом/выводом. В зависимости от технико-экономических требований на ВОЛП могут использоваться как однонаправленные, так и двунаправленные ВОСП-СР.

Сетевая конфигурация проектируемой ВОЛП должны быть выбраны с учетом перспективного развития, в частности увеличения пропускной способности, возможности установки дополнительных устройств ввода/вывода и компенсации хроматической дисперсии.

Упрощенная схема линейной сетевой структуры с указанием основных точек нормирования (интерфейсов) параметров ВОСП-СР приведена на рисунке 2.1.

Напомним, что в составе аппаратуры ВОСП-СР помимо транспондеров допускается применение волновых конверторов для передачи и приема сигналов различных форматов (STM-N, IP, ATM, Ethernet и др.). Основное требование к транспондеру — обеспечение стабильности центральной длины волны конкретного оптического канала. Кроме того, транспондер осуществляет регенерацию сигналов. По осуществлению регенерации сигналов различают два типа транспондеров:



ТР – транспондер;

ОМ/ОУ₁ – оптический мультиплексор (мультиплексор WDM) с оптическим усилителем мощности ОУ₁ на передаче;

ОМС – оптическая мультиплексная секция;

ЭКУ – элементарный кабельный участок;

ОСП – оптическая секция передачи;

ОУ₃ – линейный оптический усилитель;

ОУ₂/ОД – оптический демультиплексор (демультиплексор WDM) с оптическим усилителем на входе ОУ₂ (предусилитель на приеме);

ОМБВ – оптический мультиплексор ввода/вывода.

Рисунок 2.1 – Линейная сетевая структура ВОСП-СР с вводом/выводом

- транспондер типа ТР-2R, осуществляющий регенерацию сигнала по амплитуде и по форме;

- транспондер типа ТР-3R, осуществляющий регенерацию сигнала по амплитуде, по форме и положению относительно тактовых точек, т.е. в структуре такого транспондера имеется выделитель тактовой частоты.

Для ТР-2R определен диапазон скоростей цифрового потока, а ТР-3R предназначен для работы на одной (определенной) скорости передачи цифрового потока.

Упрощенная схема кольцевой структуры с вводом/выводом оптических каналов ВОСП-СР приведена на рисунке 2.2.

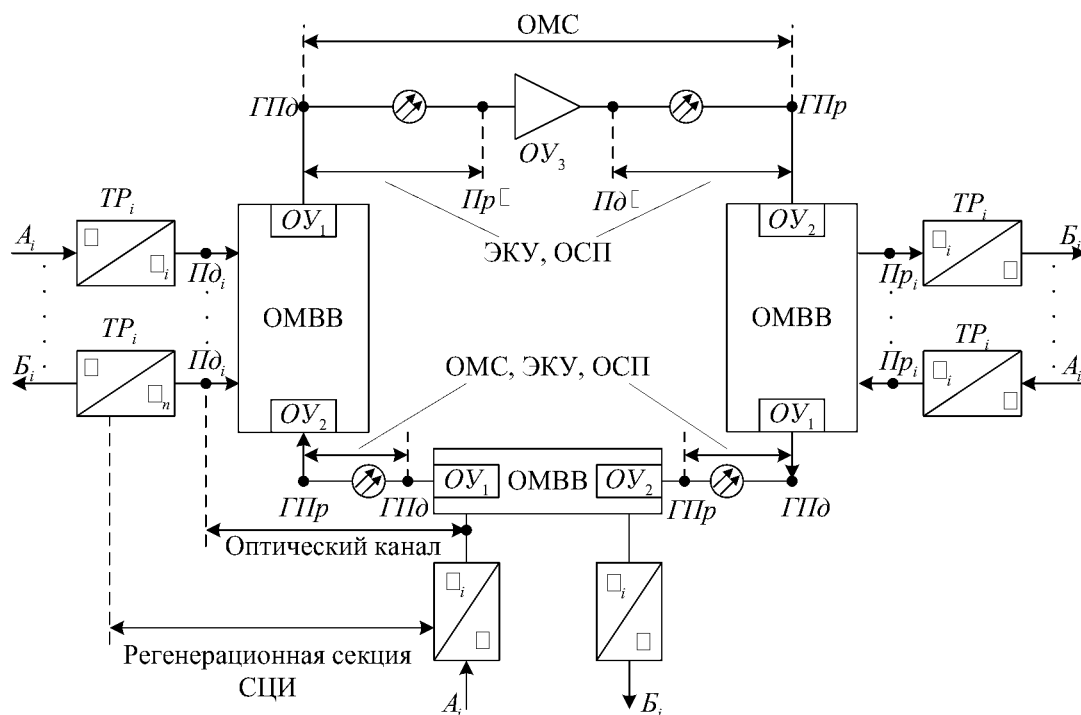


Рисунок 2.2 – Кольцевая сетевая структура ВОСП-СР с вводом/выводом

Параметры оптических стыков в точках нормирования $П\partial_i$ и $Пр_i$ для скоростей передачи цифровых потоков СЦИ приведены в таблице 2.4.

Параметры оптических стыков в точках нормирования главного оптического тракта (ГОТ) $ГП\partial$, $П\partial$ и $ГПр$ приведены в таблице 2.5.

Обеспечение дальности передачи требует применения оптических усилителей, выбора их типа и размещения на регенерационной секции, состоящей из одной или нескольких оптических секций передачи (ОСП). Число таких секций на единицу больше числа линейных усилителей $ОУ_3$. В зависимости от длины ОСП, которую по аналогии с системами передачи с ЧРК можно назвать длиной усилительного участка на входе и выходе ОМВВ возможна установка соответственно предварительного ($ОУ_2$) и мощного ($ОУ_1$) оптических усилителей. В составе аппаратуры ВОСП-СР допускается использование любых типов ОУ с параметрами, соответствующими установленным стандартам.

Основные параметры ОУПд (оптический усилитель передающий – ОУ₁),

Таблица 2.4 – Параметры оптических стыков для различных скоростей передачи

Параметр	Скорость передачи цифрового потока Мбит/с		
	≤622	2500	10000
Точки нормирования P_{di} (S_i)			
Уровень выходной мощности, дБм			
максимальный	3,0	3,0	3,0
минимальный	-5,0	-5,0	-5,0
Ширина спектра на уровне -20 дБ при расстоянии между каналами, ГГц			
≥200	14,0	20,0	40,0
100	14,0	20,0	40,0
50	14,0	20,0	40,0
Коэффициент гашения, не менее, дБ	8,2	8,2	8,2
Коэффициент подавления боковой моды, не менее, дБ	30,0	30,0	30,0
Отклонение центральной частоты оптического канала при расстоянии между каналами, ГГц			
≥200	±20	±20	±20
100	±10	±10	±10
50	±10	±10	±5
Затухание отражения, не менее, дБ	24,0	24,0	24,0
Точки нормирования P_{ri} (R_i)			
Уровень чувствительности при $K_{ош} \leq 10^{-12}$ дБ, не более	-23	-15	-12
Уровень перегрузки при $K_{ош} \leq 10^{-12}$ дБ, не более	-8	0	0
Коэффициент отражения приемника, дБ, не более	-27	-27	-27

Таблица 2.5 – Параметры оптических стыков в точках нормирования

Параметр	Точка нормирования			
	ГПд	Пд	ГПр	Пд
Уровень суммарной мощности, дБм, не более	27,0		1,0	10,0
Уровень мощности на один оптический канал, дБм				
максимальный				-15,0
минимальный	20,0			-36,0
Максимум различия уровней мощности в оптических каналах, дБм, не более		2,0		
Оптическая переходная помеха между смежными оптическими каналами, дБ не более	-30,0	-		-27,0
Отношение оптических сигнал/шум в оптических каналах, дБ, не менее	20,0			18,0

ОУПр (оптический усилитель приемный – ОУ₂) и ОУЛ (оптический усилитель линейный – ОУ₃) приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Основные параметры оптических усилителей

Параметр ОУ	Тип оптического усилителя		
	ОУПд-ОУ ₁	ОУПр-ОУ ₂	ОУЛ-ОУ ₃
Уровень входной суммарной мощности, дБм			
минимальный	-17,5	-36,0	-36,0
максимальный	16,0	1,0	10,0
Уровень выходной суммарной мощности, дБм			
минимальный	3,5	-10,0	3,5
максимальный	27,0	17,0	27,0
Коэффициент усиления, дБ			
минимальный	14,0	10,0	15,0
максимальный	28,0	33,0	41,0
Неравномерность коэффициента усиления в заданном диапазоне рабочих длин волн, дБ, не более	2,0	3,0	2,0
Шум-фактор в заданном диапазоне длин волн (при минимальном уровне суммарной входной мощности), дБ, не более	7,0	6,0	7,0
Коэффициент отражения на входе и выходе, дБ, не более	-30,0		

Нормирование защищенности осуществляется исходя из того, чтобы вносимые в оптический тракт на секции регенерации ВОСП-СР шумы усилителей не уменьшали результирующую защищенность ниже 18 дБ, что позволяет обеспечить значение коэффициента ошибок на регенерационной секции не более 10^{-12} .

В ОСТ 45.178 не допускается превышение суммарной мощности $p_{\text{сум}}$ оптического излучения более +27 дБм. Это определяет и верхний предел уровня мощности сигнала, дБм, в каждом оптическом канале на выходе усилителя передачи и линейного усилителя (ОУ₁ и ОУ₃), который составляет:

$$p_{\text{ок}} = p_{\text{сум}} - 10 \lg n. \quad (1.1)$$

При разработке схемы организации связи на основе топологий «точка-точка» или линейной сетевой структуры с вводом/выводом следует выбрать оптические мультиплексоры/демультиплексоры (ОМ/ОД). К наиболее типовым технологическим решениям относятся два типа ОМ/ОД:

- многоканальные для объединения/разъединения оптических сигналов в пределах одного из спектральных диапазонов C, L, S или на отдельных их участках с числом каналов больше двух;

- двухканальные для объединения/разъединения групп оптических каналов, например различных спектральных диапазонов. При выборе ОМ/ОД следует руководствоваться их параметрами.

При организации связи по топологиям линейная цепь и кольцо, предусматривающих ввод/вывод оптических каналов, необходимо также выбрать тип оптических мультиплексоров ввода/вывода (ОМ-BB).

Схема организации связи является основой для расчета параметров качества передачи, как правило, определяемой самой длинной регенерационной секцией. Для разработки схемы организации связи необходимо выполнить расчеты по определению максимальной длины усилительного участка и предельной протяженности регенерационной секции. Кроме того, необходимо рассчитать дисперсию и определить необходимость её коррекции [16].

Определим основные показатели качества на примере ВОЛП между станциями Мармыж и Мценск, протяженностью 321 км для расчета высокоскоростной магистральной линии линейной сетевой структуры. На данном участке ВОЛП используется оптический кабель типа ОКЛ-02. Оптические волокна кабеля соответствуют Рекомендации МСЭ-Т G.652 и имеют следующие параметры:

- дисперсия на длине волны $\lambda = 1550 \text{ нм}$ равна $18 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$;
- коэффициент затухания $\alpha = 0,22 \text{ дБ}/\text{км}$.

В качестве аппаратуры ВОСП-СР предполагается использование отечественного оборудования «Пуск», выпускаемого НТО «ИРЭ-Полус».

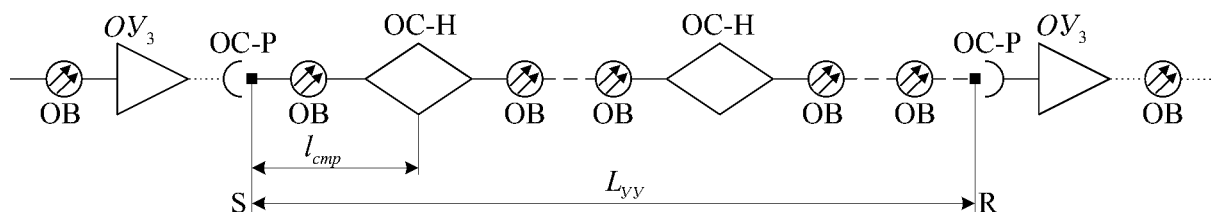
На первом этапе организуем 16 оптических каналов со скоростью передачи 2,5 Гбит/с в каждом с возможностью их последующего увеличения,

что обеспечивает в перспективе рост пропускной способности ВОЛП вплоть до 400 Гбит/с.

Так как влияние четырехволнового смешения (ЧВС – FWM) для волокна G.652 несущественно, то расстояние между каналами может быть выбрано равным 100 ГГц (0,8 нм) с базовой частотой Рекомендации МСЭ-Т G.694.1 равной 193,1 ГГц (1552,5 нм).

2.3 Расчет длины усилительного участка ВОСП-СР

Длина усилительного участка ВОСП-СР определяется по критерию перекрываемого затухания A_{yy} , которое численно равно усилению линейного усилителя ОУ₃. Расчетная схема для определения длины усилительного участка L_{yy} показана на рисунке 2.3. Под ЭКУ понимается пассивный кабельный участок (между опорными точками на передаче S и на приеме R), не содержащий оптических усилителей и регенераторов. Рекомендации МСЭ-Т определяют точку S как точку ОВ сразу за оптическим разъемом ОС-Р, а точку R как точку ОВ перед оптическим разъемом ОС-Р.



ВОСП-СР: ОС-Р – оптическое соединение разъемное,

ОС-Н – оптическое соединение неразъемное

Рисунок 2.3 – Расчетная схема для определения длины усилительного участка

Согласно этой схеме затухание усилительного участка равно:

$$A_{yy} = \alpha L_{yy} + A_H (L_{yy} / l_{cnp}) \quad (1.2)$$

где A_H - затухание неразъемного соединителя ОС-Н, дБ; l_{cnp} - строительная длина оптического кабеля, км; α - коэффициент затухания ОК, дБ/км

Отсюда длина усилительного участка:

$$L_{yy} = \frac{A_{yy}}{a + \frac{A_H}{l_{стр}}}. \quad (1.3)$$

Для уменьшения числа оптических усилителей целесообразно использовать усилительные участки максимальной длины $L_{yy_{макс}}$, когда перекрываемое затухание максимально, т.е. $A_{yy} = A_{yy_{макс}}$.

Рассчитаем длину усилительного участка ВОЛП.

Согласно ОСТ 45.178 в коде применения тип усилительного участка W обозначается:

Д – для длинного ЭКУ (L – long haul) с максимальным затуханием не выше 22 дБ

О – для очень длинного ЭКУ (V – very long haul) с максимальным затуханием не выше 33 дБ

С – для сверхдлинного ЭКУ (U – ultra long haul) с максимальным затуханием не выше 44 дБ.

С учетом выше изложенного участок типа применения Д с промежуточными линейными усилителями максимальное перекрываемое затухание составит 22 дБ, т.е. $A_{yy_{макс}} = 22 \text{ дБ}$. Тогда для кабеля ОКЛ-02 с коэффициентом затухания $a = 0,22 \text{ дБ/км}$ при типовых значениях $A_H = 0,1 \text{ дБ}$, $l_{стр} = 2 \text{ км}$ получим:

$$L_{yy_{макс}} = \frac{A_{yy}}{a + \frac{A_H}{l_{стр}}} = \frac{22}{0,22 + \frac{0,1}{2}} = 81,48 \text{ км}.$$

Данный расчет показывает, что длина усилительного участка превышает расстояния между любыми смежными станциями ВОЛП. Следовательно, можно сделать вывод о том, что промежуточные линейные усилители могут быть размещены на станциях реконструируемой ВОЛП, обеспечивающих их гарантированное энергоснабжение.

Для усилительного участка типа применения О максимальное перекрываемое затухание составит 33 дБ, т.е. $A_{уу\max} = 33\text{дБ}$. В этом случае:

$$L_{уу\max} = \frac{A_{уу}}{a + \frac{A_H}{l_{\text{стр}}}} = \frac{33}{0,22 + \frac{0,1}{2}} = 122,22\text{км}.$$

Очевидно, что для данного примера такая длина усилительного участка не позволяет сократить число ЭКУ и уменьшить тем самым число промежуточных усилителей. Поэтому на реконструируемой ВОЛП целесообразно применить усилительные участки типа Д, так как по сравнению с типом применения О можно использовать более простые и дешевые оптические усилители, рассчитанные на компенсацию максимального затухания ЭКУ, равного 22 дБ.

2.4 Расчет защищенности и предельной протяженности регенерационной секции ВОСП-СР

В отличие от каскадов ОУ между оптическими усилителями усилительного участка имеется существенное затухание $A_{уу}$, поэтому на регенерационной секции ВОСП-СР необходимо учитывать снижение защищённости сигнала от квантовых шумов и шумов усиленной спонтанной эмиссии (ASE) в каждом усилительном участке.

Методику нахождения защищённости на регенерационной секции, содержащей i усилительных участков $i = (1...N)$, рассмотрим на основе внешней диаграммы уровней, построенной в одном из направлений передачи для одного из оптических каналов. Фрагмент такой диаграммы уровней приведен на рисунке 2.4.

Как видно из рисунка, защищенность A_{zi} на i -м усилительном участке равна разности уровня сигнала на входе оптического усилителя $p_{np\ i}$ и уровня шума, приведенного ко входу усилителя, $p_{ш\ вх\ i}$, т.е. $A_{zi} = p_{np\ i} - p_{ш\ вх\ i}$.

Уровень сигнала на входе усилителя (точка R ЭКУ):

$$p_{np\ i} = p_{nep\ i} - A_{yy\ i}, \quad (1.4)$$

где $p_{np\ i}$ - уровень сигнала на выходе линейного ОУ предшествующего

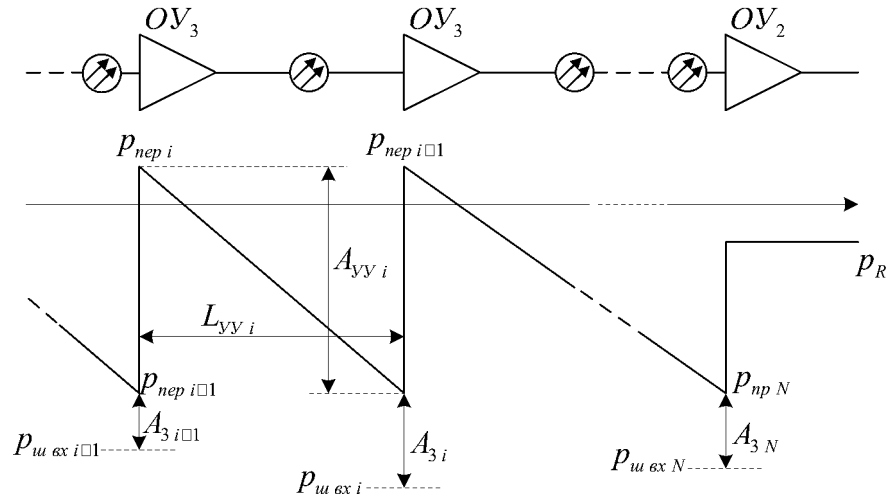


Рисунок 3.4 – Фрагмент диаграммы уровней ВОСП-СР

участка.

Шумы, возникающие на отдельных усилительных участках, имеют независимый характер, поэтому их суммарная мощность будет равна сумме мощностей, т.е. составит:

$$P_{ш} = \sum_{i=1}^N dec(0,1 p_{ш\ i}) = \sum_{i=1}^N dec(0,1 (p_R - A_{3\ i})) \quad (1.5)$$

Защищенность в точке с уровнем p_R :

$$A_{3R} = p_R - p_{ш} = A_3 - 10 \lg N. \quad (1.6)$$

Число усилительных участков может быть только целым. Поэтому их максимальное число:

$$N_{\max} = [dec(0,1 (A_3 - A_{3R}))] \quad (1.7)$$

Уровень шума, приведенного ко входу усилителя:

$$p_{ш\ вх} = p_{кв\ ш} + d, \quad (1.8)$$

где $p_{кв\ ш}$ - уровень квантового шума; d - логарифмический коэффициент шума.

Уровень квантового шума, дБм, в полосе частот оптического канала $Df_{ок}$ с центральной частотой находится по формуле:

$$p_{кв\ ш} \approx 10 \lg (hf \Delta f_{ок} \cdot 10^3) \quad (1.9)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{34} \text{ Дж} / \text{Гц}$ - постоянная Планка.

С учетом (3.9) можно записать:

$$N_{\text{макс}} = \left\lfloor \text{dec}(0,1(p_{\text{пер}} - A_{\text{УУ}} - p_{\text{квIII}} - d - A_{3R})) \right\rfloor \quad (1.10)$$

Отсюда можно найти предельную протяженность регенерационной секции:

$$L_{\text{рс пред}} = N_{\text{макс}} L_{\text{УУ макс}} \quad (1.11)$$

На проектируемой или реконструируемой ВОЛП протяженности регенерационных секций не могут превышать $L_{\text{рс пред}}$. Отметим, что с целью обеспечения гарантированного энергообеспечения линейные усилители (OU_3) располагают, как правило, на станциях.

Поэтому реальные значения протяженностей усилительных участков и, следовательно, их затуханий различаются друг от друга. В этом случае следует построить внешнюю диаграмму уровней и найти мощность накопленных на регенерационной секции шумов. Расчет мощности накопленных шумов выполняют по формуле (3.5). Далее находят уровень этих шумов, определяют ожидаемую защищенность, сравнивают её с допустимой величиной и делают соответствующий вывод.

2.5 Расчет дисперсии регенерационной секции

Дисперсия регенерационной секции рассчитывается по следующей методике.

1. По известной длине регенерационной секции $L_{\text{рс}}$, км, определяется ожидаемая (накапливаемая) дисперсия, пс:

$$\tau_{\text{ож}} = L_{\text{рс}} D_{\text{хр}}(\lambda) \Delta\lambda + D_{\text{пмд}} \sqrt{L_{\text{рс}}} \quad (2.12)$$

где $D_{\text{хр}}(\lambda)$ - удельная хроматическая дисперсия оптического волокна на длине волны λ , пс/(нм·км); $\Delta\lambda$ - результирующая ширина спектра оптического сигнала, распространяющегося по ОВ, нм; $D_{\text{пмд}}$ - коэффициент поляризованной модовой дисперсии, пс / км^{0,5}.

Удельная хроматическая дисперсия оптического волокна находится для оптического канала с длиной волны λ по формуле:

$$D_{xp}(\lambda) = D_{xp n} + S(\lambda - \lambda_n) \quad (2.13)$$

где $D_{xp n}$ - паспортное значение коэффициента хроматической дисперсии волокна, указываемое для $\lambda_n = 1550$ нм, S – коэффициент наклона дисперсионной характеристики ОВ, $пс / км^{0,5}$.

Величина D_1 определяется по формуле:

$$\Delta\lambda = \sqrt{(\Delta\lambda_{-20})^2 + (\Delta\lambda_{сигн})^2} \quad (2.14)$$

где $\Delta\lambda_{-20}$ - ширина спектра оптического излучения по уровню -20 дБ, нм;

$\Delta\lambda_{сигн}$ - ширина спектра цифрового сигнала, нм.

Ширина спектра цифрового сигнала:

$$\Delta\lambda_{сигн} = \frac{\lambda^2 B}{c x} \quad (2.15)$$

где λ - центральная длина волны модулируемого источника излучения, нм;

B – скорость передачи, Гбит/с;

c – скорость света в вакууме, которая здесь принимается равной $2,99792458 \cdot 10^8$ нм/нс ;

x - коэффициент, равный 1 для сигнала в коде NRZ и 0,5 для сигналов в коде RZ.

Поляризационная модовая дисперсия рассчитывается только для скорости передачи в оптическом канале более 10 Гбит/с.

2. Определяется допустимая дисперсия (уширение импульса), пс:

$$\tau_{доп} = 10^3 \beta / B \quad (2.16)$$

где β - коэффициент, зависящий от типа кода линейного цифрового сигнала (для кода NRZ $\beta=0,7$ и для кода RZ $\beta=0,5$),

B - скорость передачи, Гбит/с.

3. Ожидаемая вносимая дисперсия сравнивается с допустимой. Если выполняется условие $\tau_{\text{ож}} \leq \tau_{\text{доп}}$, то компенсация дисперсии не требуется. В противном случае необходима компенсация дисперсии.

Традиционным решением является компенсация дисперсии при помощи пассивных модулей компенсации дисперсии (МКД), равномерно устанавливаемых на линии передачи. По сути это включение в оптический тракт отрезков компенсирующего волокна (Dispersion Compensating Fiber – DCF) с отрицательной дисперсией. Как правило, МКД включают между каскадами линейного усилителя, так что его повышенное затухание не приводит к снижению защищенности.

4. Если компенсация дисперсия необходима, то определяется разность:

$$\Delta\tau = \tau_{\text{ож}} - \tau_{\text{доп}} \quad (2.17)$$

Исходя из полученной величины $\Delta\tau$, определяется подходящий тип компенсирующего волокна и его параметры: коэффициент затухания a_K , дБ/км, и коэффициент дисперсии D_K , пс/(нм·км). После чего находится длина этого волокна:

$$L_K = \Delta\tau / (|D_K| \Delta\lambda) \quad (2.18)$$

и его затухание:

$$A_K = a_K L_K. \quad (2.19)$$

Типовые значения параметров компенсирующего волокна следующие:

$$D_K = -340 \text{ пс} / (\text{нм} \cdot \text{км}) \text{ и } a_K = 1,56 \text{ дБ} / \text{км}.$$

Если затухание компенсирующего волокна DCF соизмеримо с затуханием усилительного участка, то оно распределяется на количество линейных усилителей k и находится затухание МКД, дБ.

$$A_{\text{МКД}} = \frac{A_K}{k}. \quad (2.20)$$

При небольшом значении A_K (порядка 3...6 дБ) можно ограничиться применением МКД на одном из усилительных участков. В этом случае принимают $A_{МКД} = A_K$.

Значение $A_{МКД}$ должно удовлетворять условию:

$$S_{ОУЗ \text{ макс}} - A_{уу} \geq A_{МКД} \quad (2.21)$$

где $S_{ОУЗ \text{ макс}}$ - максимальное усиление линейного усилителя;

$A_{уу}$ - затухание усилительного участка, дБ.

Если условие (2.21) выполняется, то уменьшение длины усилительного участка не требуется, в противном случае необходимо уменьшить длину ЭКУ.

Рассчитаем защищенность и дисперсию для ВОЛП.

Найдем предельную протяженность регенерационной секции.

Сначала определим уровень передачи по одному каналу на выходе усилителя мощности ОУ₁ и линейного усилителя ОУ₃. Уровень суммарной мощности оптического излучения на выходе усилителя мощности (усилителя передачи) и линейного усилителя примем равным, таблицы 3.5 и 3.6, максимально допустимому значению, т.е. $p_{\text{сум}} = +27 \text{ дБм}$. Оборудование «Пуск» позволяет организовать до 160 оптических каналов, следовательно, максимальный уровень сигнала в одном оптическом канале на выходе ОУ₁ и ОУ₃ согласно формуле 3.1 составит:

$$p_{\text{ок}} = p_{\text{сум}} - 10 \lg n = 27 - 10 \lg 160 = 4,96 \text{ дБм}.$$

Примем $p_{\text{пер}} = 5 \text{ дБм}$. Это позволяет в последующем наращивать число каналов. При этом уровень суммарной мощности не превысит максимально допустимого значения.

Далее найдем уровень квантового шума. Полоса частот оптического канала (Приложение 6) для скорости передачи 2,5 Гбит/с составляет 80 ГГц. Центральную частоту примем равной базовой частоте сетки частот G.694.1, т.е. $f = 193,1 \text{ ГГц}$. Подставляя эти величины в формулу (3.9), получим:

$$P_{KB III} = 10 \lg(6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 193,1 \cdot 10^{12} \cdot 80 \cdot 10^9 \cdot 10^3) = -49,9 \text{ дБм}$$

Примем, что входящий в формулу логарифмический коэффициент шума d и допустимая защищенность $A_{зР}$ имеют значения, удовлетворяющие нормативным требованиям таблицы 3.5 и 3.6, и составляют: допустимая защищенность $A_{зР} = 18 \text{ дБ}$, логарифмический коэффициент шума $d = 7 \text{ дБ}$

По формуле (3.10) найдем максимальное число усилительных участков типа применения Д на регенерационной секции. Принимая $A_{УУ} = A_{УУ\text{макс}} = 22 \text{ дБ}$ получим:

$$N_{\text{макс}} = [\text{dec}(0,1(5 - 22 + 49,9 - 7 - 18))] = 6$$

Так как для типа применения Д в нашем случае $L_{УУ\text{макс}} = 81,48 \text{ км}$, то согласно (3.11) имеем:

$$L_{\text{рс пред}} = N_{\text{макс}} L_{УУ\text{макс}} = 6 \cdot 81,48 \approx 488,88 \text{ км}.$$

Как видно, величина $L_{\text{рс пред}}$ превосходит протяженность реконструируемой линии, которая равна 321 км. Следовательно, можно сделать вывод о возможности применения на реконструируемой ВОЛП регенерационной секции с максимальной длиной 321 км и усилительными участками типа Д.

Далее выполним предварительное размещение оборудования линейного тракта.

Линейные усилители (ОУ₃) расположим на станциях Щигры, Поныри, Еропкино и Орел. На станции Курск, находящемся между ст. Щигры и Поныри, предусмотрим установку оптического мультиплексора ввода/вывода (ОМВВ). ОМВВ вносит в оптический тракт дополнительные потери. Учитывая, что расстояние между пунктами Щигры и Поныри существенно превышает максимальную длину усилительного участка ($133 > 81,48$), для компенсации потерь в каждом из направлений передачи на входе и выходе ОМВВ необходимо установить соответственно предварительный (ОУ₂) и мощный (ОУ₁) оптические усилители с усилениями $S_{\text{ОУ}_2}$ и $S_{\text{ОУ}_1}$. Сумма

усиления этих усилителей $S = S_{OY2} + S_{OY1}$ должна равняться сумме затухания предшествующего участка $A_{УУ}$ и затухания, вносимого мультиплексором ввода/вывода в каналы прямого прохождения $A_{OMBВ}$.

Определим величину затухания усилительного участка между станциями Курск и Поньри, которое имеет большее расстояние, по сравнению с участком Щигры - Курск.

Величина этого затухания:

$$A_{УУ \text{ Курск-Поньри}} = 71(0,22 + 0,1 / 2) = 19,17 \text{ дБ}$$

По данным таблицы Приложения 7 при максимальном числе каналов ввода/вывода до 16, которое предполагается использовать в перспективе, ОМВВ может вносить в каналы прямого прохождения затухание до 16 дБ. Примем $A_{OMBВ} = 16 \text{ дБ}$. Тогда суммарное затухание A усилительного участка и ОМВВ:

$$A = A_{УУ \text{ Курск-Поньри}} + A_{OMBВ} = 19,17 + 16 = 35,17 \text{ дБ}.$$

На основании данных таблицы 3.6 получаем:

- минимальная сумма усиления

$$S_{\text{мин}} = S_{OY2\text{мин}} + S_{OY1\text{мин}} = 10 + 14 = 24 \text{ дБ}$$

- максимальная сумма усиления

$$S_{\text{макс}} = S_{OY2\text{макс}} + S_{OY1\text{макс}} = 33 + 28 = 61$$

Видим, что $S_{\text{макс}} \geq A \geq S_{\text{мин}}$. Следовательно, $A = S_{OY2} + S_{OY1}$. Отсюда следует, что установка ОУ₂ и ОУ₁ позволит полностью компенсировать потери на участке между станциями Курск – Поньри как в прямом, так и в обратном направлении.

Порядок расчета дисперсии

1. По формуле (2.12) найдем ожидаемую дисперсию для канала с максимальной центральной длиной волны, где дисперсия для ОВ G.652 максимальна. Согласно сетке частот ОСТ 45.178 величина максимальной

длины волны составляет 1560,61 нм. Для ее нахождения необходимо предварительно выполнить вычисления по формулам (2.13-2.15).

Сначала вычислим удельную хроматическую дисперсию для канала с центральной длиной волны 1560,61 нм. Для оптического кабеля ОКЛ-2 паспортное значение коэффициента хроматической дисперсии волокна $D_{xp \Pi} = 18 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$, а для ОВ G.652 коэффициент наклона дисперсионной характеристики $S = 0,0677 \text{ пс}/(\text{нм}^2 \cdot \text{км})$. По формуле (2.13) находим удельную хроматическую дисперсию на длине волны 1560,61 нм. Получим:

$$\begin{aligned} D_{xp}(\lambda) &= D_{xp \Pi} + S(\lambda - \lambda_{\Pi}) = 18 + 0,0677(1560,61 - 1550) \\ &= 18,72 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км}) \end{aligned}$$

Далее по формуле (2.15) найдем ширину спектра цифрового сигнала в коде NRZ, используемом в нашем расчете. Подставляя в формулу $\lambda = 1560,61 \text{ нм}$, $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ нм}/\text{нс}$, $B = 2,5 \text{ Гбит}/\text{с}$ и $x = 1$ имеем:

$$\Delta\lambda_{\text{сигн}} = \frac{\lambda^2 B}{cx} = \frac{1560,1^2 \cdot 2,5}{2,99792458 \cdot 10^8 \cdot 1} = 0,02 \text{ нм}$$

Ширина спектра источника оптического излучения $\Delta\lambda_{-20}$, входящая в (2.14), находится из соотношения $\Delta\lambda = (\lambda^2/c)\Delta f$, где Δf берется из таблицы (2.4) для соответствующей скорости и частотного расстояния между каналами. Для нашего расчета ширина спектра излучения в частотной области на уровне 20 дБ составляет 20 ГГц.

Тогда:

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_{-20} &= \left(\frac{1560,1^2}{2,99792458} \cdot 10^8 \right) \cdot 20 = 0,16 \text{ нм} \\ \Delta\lambda &= \sqrt{(0,16)^2 + (0,02)^2} = 0,16 \text{ нм} \end{aligned}$$

Ожидаемая дисперсия (2.12) будет равна:

$$\tau_{\text{ож}} = 321 \cdot 18,72 \cdot 0,16 = 961,46 \text{ пс}$$

2. Допустимую дисперсию определяем по формуле (2.16), в которой для кода NRZ следует принять $\beta = 0,7$. Получим:

$$\tau_{\text{доп}} = 10^3 \cdot 0,7/2,5 = 280 \text{ пс}$$

В данном случае скорость передачи в оптическом канале не превышает 10 Гбит/с, поэтому поляризованной модовой дисперсией можно пренебречь.

3. Сравнивая ожидаемую дисперсию 961,46 пс с допустимой 280 пс, видим, что условие $\tau_{\text{ож}} \leq \tau_{\text{доп}}$ не выполняется. Приходим к выводу о необходимости компенсации дисперсии.

4. По формуле (2.17) находим:

$$\Delta\tau = 961,46 - 280 = 681,46 \text{ пс}$$

Далее для типовых параметров $D_K = -340 \text{ пс}/(\text{нм} \cdot \text{км})$ и $\alpha_K = 1,56 \text{ дБ}/\text{км}$ по формуле (2.18) находим длину компенсирующего волокна:

$$L_K = 681,46 / (340 \cdot 0,16) = 12,53 \text{ км}$$

и по формуле (2.19) его затухание:

$$A_K = 1,56 \cdot 12,53 = 19,55 \text{ дБ}$$

Поскольку это затухание весьма существенно, то его необходимо распределить по линейным усилителям, число которых $k=4$ и затухание модуля компенсации дисперсии тогда согласно (3.20) составит

$$A_{\text{МКД}} = \frac{19,55}{4} = 4,89 \text{ дБ}.$$

Так как участок Курск – Поныри является самым протяженным на проектируемой ВОЛП, то проверка выполнения условия (2.21) для остальных усилительных участков не требуется.

Рассчитаем ожидаемую защищенность.

Для расчета ожидаемой защищенности необходимо построить внешнюю диаграмму уровней. Основой для построения диаграммы уровней является схема организации связи, которую можно составить исходя из структуры применяемого оборудования и размещения конечных пунктов,

промежуточных усилительных пунктов, а также пунктов ввода/вывода оптических каналов [17].

Упрощенная схема организации связи для направления передачи Мармыж – Мценск имеет вид, представленный на рисунке (3.5). Здесь конечными пунктами Мармыж и Мценск являются соответственно ОП – Мармыж и ОП – Мценск. Пункты Щигры, Понеры, Еропкино, Орел – усилительные пункты; обозначены УП–Щигры, УП–Понеры, УП–Еропкино, УП–Орел соответственно. Пункт Курск является пунктом ввода/вывода оптических каналов ПВВ–Курск.

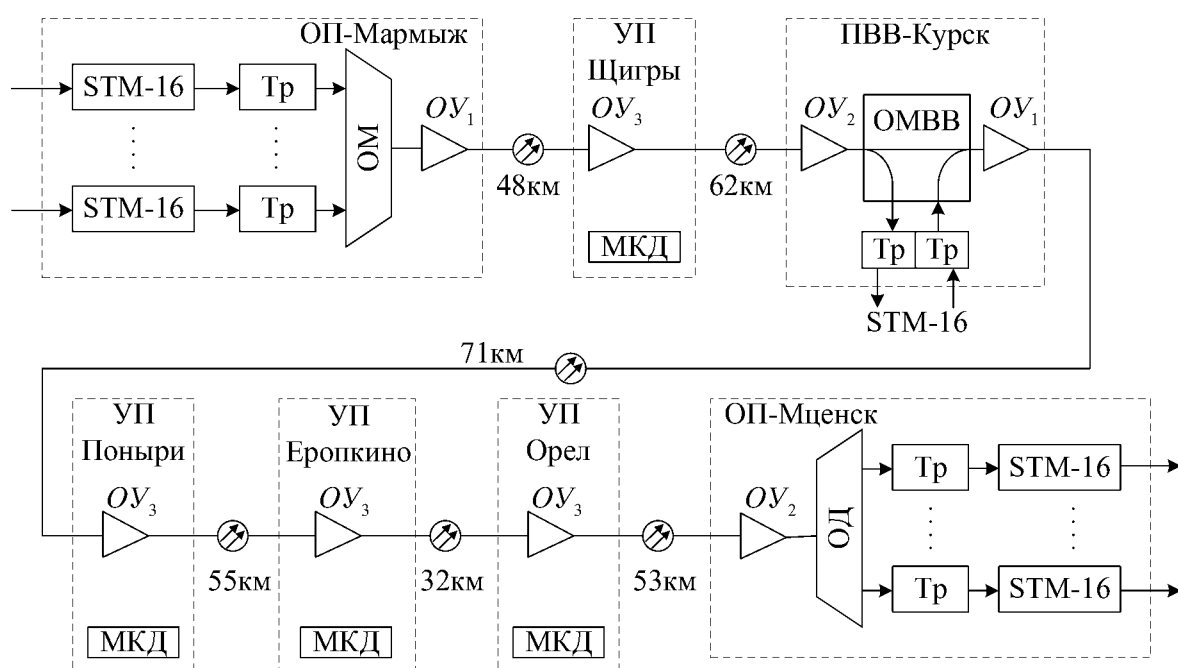


Рисунок 3.5 – Схема организации связи ВОЛП Мармыж–Мценск на основе ВОСП-СР

На конечных станциях, как следует из схемы организации связи, установлены: мультиплексоры (каналообразующее оборудование) STM-16, транспондеры (Tr), оптические мультиплексоры (OM) и оптические демультиплексоры (OD), а также оптические усилители (OY₁ – усилитель мощности и OY₂ – предварительный усилитель). Усилительные пункты оборудованы линейными оптическими усилителями (OY₃) с модулями компенсации дисперсии (МКД), включенными между каскадами линейных усилителей. На станции Курск располагается оптический мультиплексор

ввода/вывода (ОМВВ) с установленными на входе и выходе усилителями ОУ₂ и ОУ₁, а также транспондеры каналов ввода/вывода. Все усилители выполнены на основе оптического волокна легированного эрбием (EDFA).

Исходными параметрами для построения внешней диаграммы уровней для направления Мармыж – Мценск являются:

- уровни передачи по оптическому каналу $p_{пер\ i}$ на выходах: усилители мощности ОУ₁ пунктов ОП-Мармыж, ПВВ-Курск; линейных усилителей ОУ₃ пунктов УП-Щигры, УП-Поныри, УП-Еропкино и предусилителя ОУ₂ пункта ОП-Орел;

- уровня оптических усилителей $S_{OY\ i}$ на станциях УП-Щигры, ПВВ-Щигры, УП-Поныри, УП-Еропкино, УП-Орел, ОП-Мценск;

- уровни приема $p_{пр}$ на входе ОУ₃ пунктов УП-Щигры, УП-Поныри, УП-Еропкино, УП-Орел и уровни приема $p_{пр}$ на входе ОУ₂ пунктов ПВВ-Курск и ОП-Мценск;

- уровни приведенных шумов на входах ОУ₃ пунктов УП-Щигры, УП-Поныри, УП-Еропкино и УП-Орел ОУ₂ пунктов ПВВ-Курск и ОП-Мценск;

- защищенности от шумов на усилительных участках.

Примем уровни передачи по оптическому каналу на выходах всех ОУ₁ и ОУ₃ одинаковыми и равными $p_{пер} = 5\text{дБм}$, что обеспечивается регулировкой коэффициентов усиления оптических усилителей. Уровень передачи на выходе ОУ₂ пункта ОП-Мценск необходимо установить таким, чтобы не было перегрузки приемного транспондера. Согласно нормам таблицы 3.4 уровень перегрузки для расчета не должен превышать 0 дБм. При этом следует учесть, что между ОУ₂ и транспондером включен оптический демультиплексор ОД, затухание которого составляет при организации 16 оптических каналов 7,5 дБ, Приложение 6.

Очевидно, что во избежание перегрузки транспондера уровень на выходе ОУ₂ пункта ОП-Мценск не должен превышать +7,5 дБм. Поэтому

этот уровень, который на диаграмме уровней обозначен p_R , можно также принять равным +5дБм.

Целесообразно усиления $S_{OY i}$ принять равными затуханиям прилегающих усилительных участков, которые рассчитаем по формуле:

$$A_{yY i} = L_{yY i} (\alpha + A_H / l_{cnp})$$

$$A_{уу \text{ Щигры}} = 48 \left(0,22 + \frac{0,1}{2} \right) = 12,96 \text{ дБ}$$

$$A_{уу \text{ Курск}} = 62 \left(0,22 + \frac{0,1}{2} \right) = 16,17 \text{ дБ}$$

$$A_{уу \text{ Поньри}} = 71 \left(0,22 + \frac{0,1}{2} \right) = 19,17 \text{ дБ}$$

$$A_{уу \text{ Еропкино}} = 55 \left(0,22 + \frac{0,1}{2} \right) = 14,85 \text{ дБ}$$

$$A_{уу \text{ Орел}} = 32 \left(0,22 + \frac{0,1}{2} \right) = 8,64 \text{ дБ}$$

$$A_{уу \text{ Мценск}} = 53 \left(0,22 + \frac{0,1}{2} \right) = 14,31 \text{ дБ}$$

Уровни приема на входах усилителей:

$$P_{np i} = P_{пер} - A_{yY i}$$

$$P_{np \text{ Щигры}} = 5 - 12,96 = - 7,96 \text{ дБм};$$

$$P_{np \text{ Курск}} = 5 - 16,17 = - 11,17 \text{ дБм};$$

$$P_{np \text{ Поньри}} = 5 - 19,17 = - 14,17 \text{ дБм};$$

$$P_{np \text{ Еропкино}} = 5 - 14,85 = - 9,85 \text{ дБм};$$

$$P_{np \text{ Орел}} = 5 - 8,64 = - 3,64 \text{ дБм};$$

$$P_{np \text{ Мценск}} = 5 - 14,31 = - 9,31 \text{ дБм}.$$

Уровни приведенных шумов $p_{Шex i}$ на входах усилителей рассчитаем по формуле (3.18):

$$p_{Шex i} = p_{KB \text{ Ш}} + d .$$

При этом логарифмический коэффициент шума примем равным 7 дБ для ОУ₃ и 6 дБ для ОУ₂, что соответствует нормативным параметрам. Уровень квантового шума $p_{KB\ III} = -49,9\text{дБм}$.

$$p_{Шех\ Щигры} = -49,9 + 7 = -42,9\text{дБм};$$

$$p_{Шех\ Курск} = -49,9 + 6 = -43,9\text{дБм};$$

$$p_{Шех\ Поныри} = -49,9 + 7 = -42,9\text{дБм};$$

$$p_{Шех\ Еропкино} = -49,9 + 7 = -42,9\text{дБм};$$

$$p_{Шех\ Орел} = -49,9 + 7 = -42,9\text{дБм}.$$

$$p_{Шех\ Мценск} = -49,9 + 7 = -43,9\text{дБм}$$

Защищенность от шумов на усилительных участках рассчитаем по формуле: $A_{3\ i} = p_{пер\ i} - A_{УУi} - p_{шех\ i}$.

$$A_{3\ Щигры} = 5 - 12,96 - (-42,9) = 34,94\text{дБ};$$

$$A_{3\ Курск} = 5 - 16,17 - (-43,9) = 32,73\text{дБм};$$

$$A_{3\ Поныри} = 5 - 19,17 - (-42,9) = 28,73\text{дБм};$$

$$A_{3\ Еропкино} = 5 - 14,85 - (-42,9) = 33,05\text{дБм};$$

$$A_{3\ Орел} = 5 - 8,64 - (-42,9) = 39,26\text{дБм};$$

$$A_{3\ Мценск} = 5 - 14,31 - (-43,9) = 34,59\text{дБм}.$$

Результаты расчетов параметров диаграммы уровней сведены в таблицу 3.7.

Таблица 3.7 – Параметры диаграммы уровней направления Мармыж-Мценск

Пункт ВОЛП	$p_{пер}, \text{дБм}$	$S_{ОУ}, \text{дБ}$	$p_{пр}, \text{дБм}$	$p_{шех}, \text{дБм}$	$A_3, \text{дБ}$
ОП-Мармыж	5	-	-	-	-
УП-Щигры	5	12,96	-7,96	-42,9	34,94
ПВВ-Курск	5	16,17	-11,17	-43,9	32,73
УП-Поныри	5	19,74	-14,14	-42,9	28,73
УП-Еропкино	5	14,85	-9,85	-42,9	33,05
УП-Орел	5	8,64	-3,64	-42,9	39,26
ОП-Мценск	5	14,31	-9,31	-43,9	34,59

Диаграмма уровней, построенная на основании данных таблица 3.7, показана на рисунке 3.6.

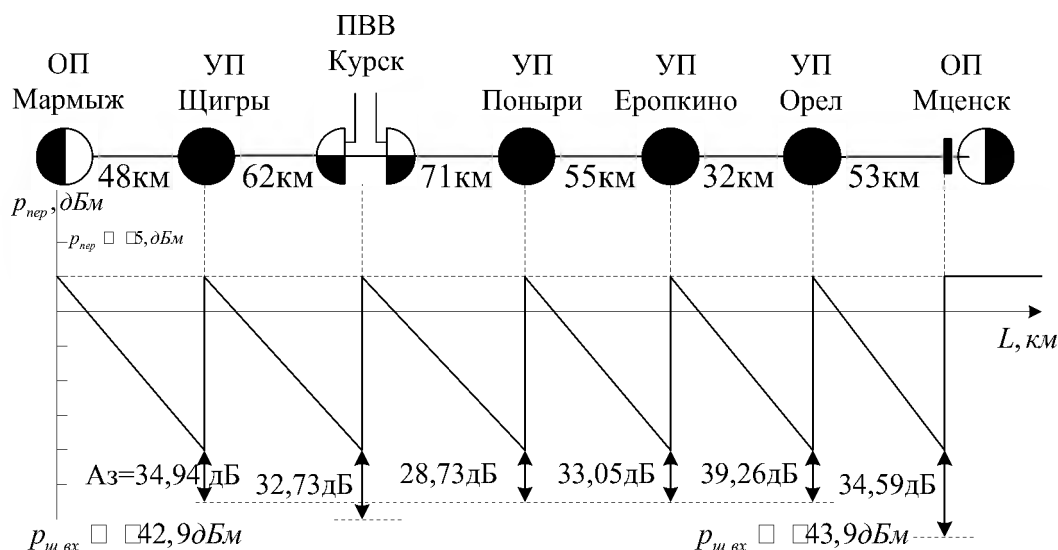


Рисунок 3.6 – Диаграмма уровней оптического канала ВОЛП направления Мармыж – Мценск.

Теперь можно рассчитать ожидаемую защищенность от накопленных на регенерационной секции шумов. Мощность накопленных шумов рассчитаем по формуле (3.9). Расчеты мощности шумов в точке с уровнем p_R от отдельных усилительных участков для удобства сведем в таблицу 3.8.

Таблица 3.8 – Расчеты мощности шумов усилительных участков

№ усилительного участка	$p_R \square A_z, \text{дБм}$	$p_{ш} \square 10^{0,1(p_R \square A_z)}, \text{мВт}$
1	-29,94	0,001013911
2	-27,73	0,001686553
3	-23,73	0,00423643
4	-28,05	0,001566751
5	-34,26	0,000374973
6	-29,59	0,001099006

Суммируя мощности шумов от отдельных усилительных участков, получаем мощность накопленных шумов:

$$P_{ш} = 99,8 \cdot 10^{-4} \text{ мВт}$$

Этой мощности шумов соответствует уровень:

$$p_{\text{ш}} = 10 \lg \left(\frac{P_{\text{ш}}}{1} \right) = 10 \lg(99,8 \cdot 10^{-4}) = -20 \text{ дБм}$$

Ожидаемая защищенность на регенерационной секции максимальной протяженности будет равна:

$$A_{3 \text{ ож}} = P_R - p_{\text{ш}} = 5 - (-20) = 25 \text{ дБ}.$$

Видим, что ожидаемая защищенность превышает допустимую на 7 дБ. Следовательно, требования на качественные показатели будут выполнены: $A_{3 \text{ ож}}$ и $A_{\text{дон}}$, а коэффициент ошибок $K_{\text{ош}}$ не превысит 10^{-12} . Можно сделать вывод о правильности принятых решений по выбору оборудования ВОСП-СР и размещению усилительных пунктов на реконструируемой ВОЛП.

3.6 Расчет надежности проектируемой ВОЛП

Волоконно-оптическая линия передачи представляет сложную динамическую систему, т.е. совокупность технических устройств или элементов, взаимодействующих в процессе выполнения производственных задач на основе определенной функциональной зависимости. Особенность систем передачи как сложных динамических систем состоит в рассредоточенности их оборудования и аппаратуры на больших территориях, отделенных большими расстояниями.

В теории надежности и эксплуатации сложных систем важным понятием является объект — изделие определенного целевого назначения, рассматриваемое в периоды проектирования, производства, испытаний и эксплуатации. В процессе эксплуатации сложная система и ее компоненты являются объектом технической эксплуатации (ОТЭ).

Комплексным свойством ВОЛП как ОТЭ является надежность, т.е. свойство ОТЭ сохранять во времени значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения: использования по назначению,

технического обслуживания и ремонта, хранения и транспортирования. Надежность ВОЛП будем рассматривать в режимах использования по назначению, технического обслуживания и ремонта.

Иногда для большей определенности и конкретизации различают следующие разновидности надежности: эксплуатационную и техническую (номинальную).

Под эксплуатационной надежностью понимается надежность, определяемая в реальных условиях эксплуатации с учетом комплексного воздействия внешних и внутренних факторов, связанных с климатическими и географическими особенностями эксплуатации, реальными режимами работы ОТЭ и условиями его обслуживания.

Под технической надежностью понимается надежность, определяемая путем испытания в заводских условиях при функционировании ОТЭ в соответствии с типовыми режимами, регламентированными техническими условиями. Далее будем вести речь об эксплуатационной надежности.

Важнейшим понятием в теории надежности является отказ — событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния ОТЭ, т.е. состояния, при котором значения всех параметров, характеризующих способность ОТЭ выполнять заданные функции, соответствуют требованиям нормативно-технической документации (НТД). Классификация отказов самая разнообразная, но на стадии технической эксплуатации ОТЭ основными являются эксплуатационные отказы, обусловленные нарушениями установленных правил и/или условий эксплуатации. По характеру изменения отказы как случайные события, подразделяются на внезапные отказы, характеризующиеся скачкообразным изменением одного или нескольких параметров ОТЭ и постепенные отказы, возникающие в результате постепенного изменения значений одного или нескольких параметров ОТЭ.

Отличительный признак или совокупность признаков нарушения работоспособного состояния, согласно которым устанавливается факт возникновения отказа, называется критерием отказа. Критерий отказа

устанавливается НТД. Например, под критерием отказа типового канала понимается перерыв связи (снижение уровня более чем на 18 дБ) длительностью более 300 мс.

Процесс обнаружения и устранения отказа, т.е. перевод ОТЭ из неработоспособного состояния в работоспособное, называется восстановлением. По способности к восстановлению ОТЭ подразделяются на восстанавливаемые ОТЭ, использование которых возможно после восстановления, и на невозстанавливаемые ОТЭ, восстановление которых после отказа считается нецелесообразным или невозможным. ВОЛП являются восстанавливаемыми ОТЭ, показатели надежности которых определяются рядом эксплуатационно-технических характеристик, основные из которых:

- параметр потока отказов (интенсивность отказов λ), представляющий собой отношение числа отказов объекта за определенный интервал времени к длительности этого интервала времени при ординарном потоке отказов;

- среднее время наработки на отказ T_o , представляющее собой среднее время между отказами оборудования в часах; параметр потока отказов связан со средним временем безотказной работы соотношением:

$$T_o = \frac{1}{\lambda} \quad (3.22)$$

- вероятность безотказной работы $P(t)$ — вероятность того, что в заданном интервале времени t объект будет находиться в работоспособном состоянии;

- среднее время восстановления T_b , характеризующее среднее время, затраченное на восстановление объекта при возникновении отказа; это время складывается из времени поиска и устранения отказа, времени проведения регулировочно-настроечных работ и др.; величина T_b измеряется в часах; величина, обратная времени восстановления, называется интенсивностью восстановления, $1/\tau$,

$$\mu = \frac{1}{T_B} \quad (3.23)$$

- коэффициент готовности K_Γ — вероятность того, что объект будет работоспособен в любой момент времени;

- коэффициент простоя K_Π — вероятность того, что объект окажется в неработоспособном состоянии в произвольный момент времени.

$$P(t) = \exp(-\lambda t). \quad (3.24)$$

Коэффициент готовности связан со средним временем безотказной работы T_O и средним временем восстановления T_B соотношением:

$$K_\Gamma = \frac{T_O}{(T_O + T_B)}. \quad (3.25)$$

Между собой показатели надежности связаны определенными соотношениями:

$$K_\Gamma = \frac{T_O}{(T_O + T_B)}. \quad (3.26)$$

В связи с высокими требованиями на коэффициент готовности при расчете показателей надежности систем передачи на основе СЦИ в качестве расчетного показателя наиболее удобно выбрать коэффициент простоя:

$$K_\Pi = 1 - K_\Gamma = \frac{T_B}{T_O + T_B}. \quad (3.27)$$

Отметим, что при оценке реальной готовности следует учитывать среднее время ремонта:

$$T_{\text{рем}} = T_O + T_{\text{зад } TO}, \quad (3.28)$$

где $T_{\text{зад } TO}$ - среднее время задержки технического обслуживания, определяемое простоями оборудования из-за потерь времени на доставку запчастей.

Требуемые показатели качества и надежности для местной первичной сети (МСП), внутризоновой первичной сети (ВЗПС) и магистральной

первичной сети (СМП) ЕСЭ РФ с максимальной протяженностью L_M без резервирования являются строго регламентированными, таблица 3.9.

Таблица 3.9 – Показатели качества и надежности сетей связи

Показатель	Канал ТЧ или ОЦК независимо от применяемой ЦСП	ОЦК на перспективной цифровой сети	Оборудование линейного тракта
МСП $L_M = 200\text{км}$			
Коэффициент готовности, Кг	>0,997	>0,9994	0,9987
Среднее время между отказами, То,ч	>400	>7000	>2500
Время восстановления, Тв, ч	<1,1	<4,24	*
ВЗПС $L_M = 1400\text{км}$			
Коэффициент готовности, Кг	>0,99	>0,998	0,99
Среднее время между отказами, То,ч	>111,4	>2050	>350
Время восстановления, Тв, ч	<1,1	<4,24	*
СМП $L_M = 12500\text{км}$			
Коэффициент готовности, Кг	>0,92	>0,982	0,92
Среднее время между отказами, То,ч	>12,54	>230	>40
Время восстановления, Тв, ч	<1,1	<4,24	*
*Для оборудования линейных трактов на МСП, ВЗПС и СМП должно быть: время восстановления необслуживаемого регенерационного участка (НРП) $T_{внрп} < 2,5\text{ч}$ (в том числе время подъезда - 2 часа) время восстановления оконечного и обслуживаемого регенерационного пункта $T_{вон,орп} < 0,5\text{ч}$ Арремя восстановления оптического кабеля (ОК) $T_{в ок} < 10\text{ч}$ (в том числе время подъезда не более 3,5ч)			

Среднее число (плотность) отказов ОК за счет внешних повреждений на 100 км в год $M=0,34$. Тогда интенсивность отказов ОК за 1 час на длине трассы ВОЛП L :

$$\lambda_{ок} = \frac{ML}{8760 \cdot 100}. \quad (3.29)$$

При длине канала L , не равной L_M , среднее время между отказами определяется как:

$$T_o(L) = T_o \frac{L_M}{L}. \quad (3.30)$$

На первом этапе определим допустимые показатели надежности.

По формуле (3.30) определим среднее время между отказами $T_O(L)$. Подставив в нее значения $L_M = 12500$ км, $T_O = 40$ ч и длину проектируемой ВОЛП $L = 321$ км, получим:

$$T_O(L) = 40 \cdot \frac{12500}{321} = 1557,6 \text{ ч}.$$

По формуле (3.25) определим допустимый коэффициент готовности K_G , подставив в нее значение $T_O = 1557,6$ ч и значение $T_B = 4,5$ ч:

$$K_{G \text{ доп}} = \frac{1557,6}{(1557,6 + 4,5)} = 0,997.$$

Допустимый коэффициент простоя $K_{П \text{ доп}}$ получим из формулы (3.27), подставив в нее значение $K_{G \text{ доп}} = 0,997$:

$$K_{П \text{ доп}} = 1 - 0,997 = 0,003.$$

Для определения показателей надежности оборудования линейного тракта, включающего в себя $L_{OK} = 321$ км оптического кабеля с интенсивностью отказов λ_{OK} , числом мультиплексоров ввода/вывода $n_{\text{мин}} = 7$, с интенсивностью отказов каждого $1/T_{\text{мин}} = \lambda_{\text{мин}} = 2,3 \cdot 10^{-5}$ 1/ч следует рассчитать суммарную интенсивность отказов по формуле:

$$\lambda = \lambda_{OK} + \lambda_{\text{мин}} n_{\text{мин}}. \quad (3.31)$$

Величину λ_{OK} найдем по формуле (3.29), подставив в нее значение $M = 0,34$ и $L_{OK} = 321$ км:

$$\lambda_{OK} = \frac{0,34 \cdot 321}{876000} = 0,12 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}.$$

Подставив в формулу (3.31) значения $\lambda_{OK} = 0,12 \cdot 10^{-5}$ 1/ч, $\lambda_{\text{мин}} = 2,3 \cdot 10^{-5}$ 1/ч, и $n_{\text{мин}} = 7$, найдем интенсивность отказов линейного тракта:

$$\lambda = 0,12 \cdot 10^{-5} + 2,3 \cdot 10^{-5} \cdot 7 = 16,9 \cdot 10^{-5} \text{ 1/ч}.$$

Среднее время безотказной работы линейного тракта:

$$T_o = \frac{1}{\lambda} = \frac{1}{16,4 \cdot 10^{-5}} = 6 \cdot 10^3 \text{ ч}.$$

Максимум среднего времени восстановления определяется временем восстановления оптического кабеля, т.е. $T_B = 10 \text{ ч}$.

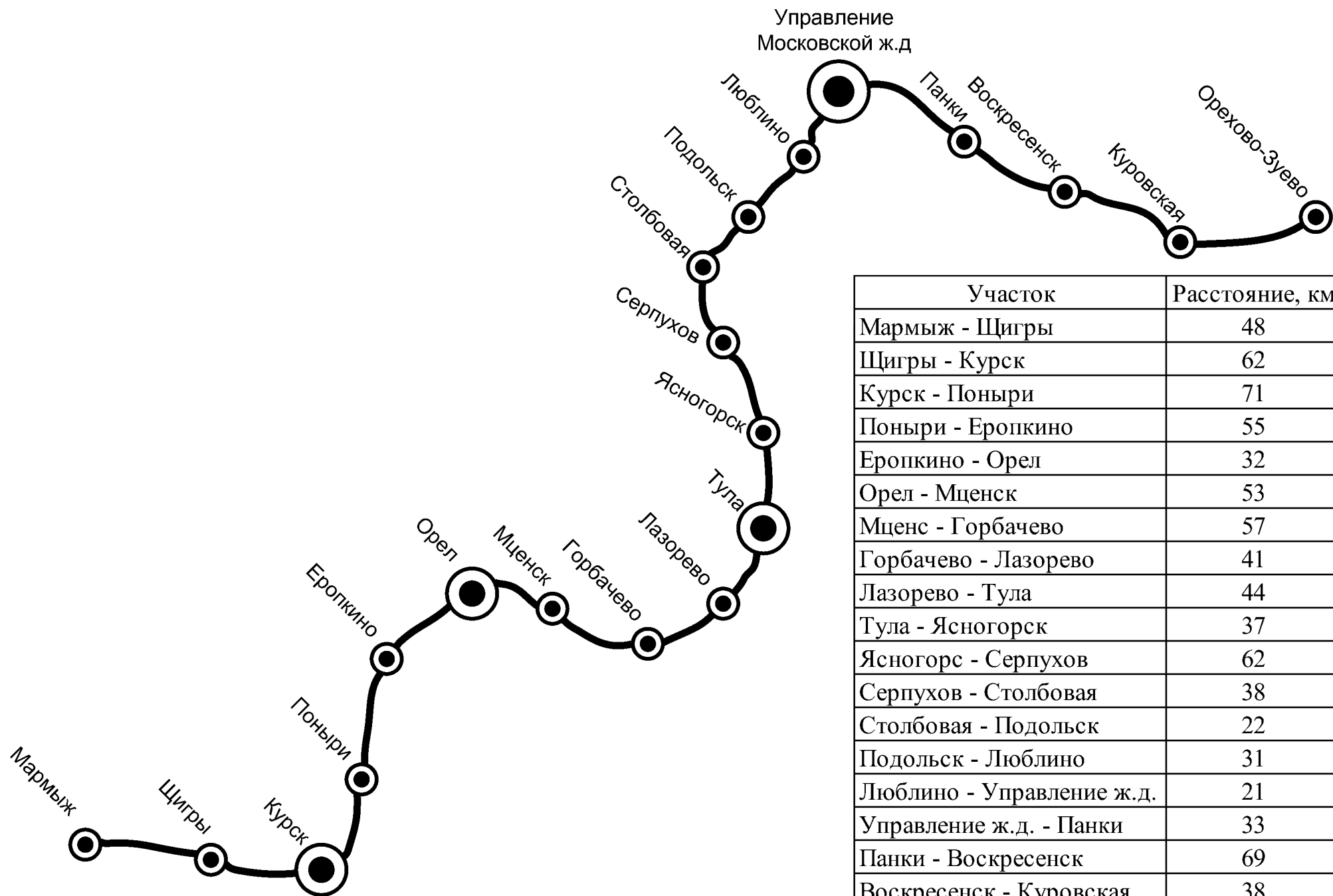
Ожидаемый коэффициент простоя:

$$K_{\text{ЛТ ож}} = \frac{T_B}{(T_o + T_B)} = \frac{10}{(6 \cdot 10^3 + 10)} = 166 \cdot 10^{-5}.$$

Ожидаемый коэффициент простоя намного больше допустимого, т.е. $166 \cdot 10^{-5} < 3 \cdot 10^{-3}$, следовательно, необходимо провести мероприятия по повышению надежности.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

СХЕМАТИЧЕСКИЙ ПЛАН СЕТИ WDM



Участок	Расстояние, км
Мармыж - Щигры	48
Щигры - Курск	62
Курск - Поныри	71
Поныри - Еропкино	55
Еропкино - Орел	32
Орел - Мценск	53
Мценск - Горбачево	57
Горбачево - Лазорево	41
Лазорево - Тула	44
Тула - Ясногорск	37
Ясногорск - Серпухов	62
Серпухов - Столбовая	38
Столбовая - Подольск	22
Подольск - Люблино	31
Люблино - Управление ж.д.	21
Управление ж.д. - Панки	33
Панки - Воскресенск	69
Воскресенск - Куrowsкая	38
Куrowsкая - Орехово-Зуево	33