

МИНИСТЕРСТВО ЦИФРОВОГО РАЗВИТИЯ, СВЯЗИ
И МАССОВЫХ КОММУНИКАЦИЙ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Северо-Кавказский филиал
ордена Трудового Красного Знамени федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский технический университет связи и информатики»

Кафедра «Инфокоммуникационные технологии и системы связи»

Методические указания по практическим занятиям
по дисциплине: «Проектирование и эксплуатация систем передачи»

для студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения

Направление подготовки – 11.03.02 Инфокоммуникационные технологии и системы
связи
Профиль - Мобильная связь и интернет вещей

Ростов-на-Дону

2022

Методические указания по практическим занятиям
по дисциплине: ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ЭКСПЛУАТАЦИЯ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ

Составители: Борисов Б.П., к.т.н., доцент,

Рассмотрены и одобрены
на заседании кафедры ИТСС.
Протокол от «19» декабря 2022 г. № 5

I ОРГАНИЗАЦИЯ И ПРОВЕДЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ

1.1 Цели и задачи

Данный практикум является основополагающим звеном в изучении принципов построения цифровых систем передачи.

Основная цель практикума – научить:

1. Производить все виды инженерных расчетов, связанных с проектированием и эксплуатацией современных цифровых систем передачи;
2. Работать с основными характеристиками и параметрами цифровых сигналов связи и передачи данных.
3. Эксплуатировать телекоммуникационные средства.
- 4.

1.2 Общие правила работы в лаборатории

Поскольку все практические занятия рассчитаны на применение компьютеров или технических устройств связи, то при работе в лаборатории студенты должны:

1. Строго соблюдать установленные правила внутреннего распорядка и техники безопасности.
2. Неукоснительно выполнять требования инженерно-технического состава лаборатории.
3. Начало любых видов работ начинать с приема исходного состояния комплекса технических средств на рабочем месте и заканчивать приведением комплекса технических средств в исходное состояние.
- 4.

1.3 Подготовка к практическим занятиям

1. Повторить теоретический материал, относящийся к работе, пользуясь конспектом лекций и указанной литературой;
2. Хорошо уяснить цели работы, программу работы, порядок выполнения работы.

1.4. Порядок проведения практических занятий

1. Уяснение цели и темы практического занятия.
2. Краткое ознакомление с теоретическим материалом по теме занятия с помощью компьютера.
3. Получение от преподавателя индивидуальных исходных данных для расчета.
4. Выполнение заданий, расчетов и составление отчета.
5. Верификация результатов.

II. ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1

Тема: Размещение регенерационных пунктов для ЦСП по электрическим кабелям.

1. Цели занятия:

Закрепить знания по структуре и особенностям построения линейного тракта ЦСП. Получить практические навыки расчетов регенерационных участков ЦСП по электрическим кабелям. Овладеть методикой построения диаграммы уровней передачи магистрали.

2. Рекомендации:

Изучить материал в [1]с.280-286, в [2]с.93-94, 97-107.

3. Порядок выполнения работы:

1. Опрос по теоретическому материалу занятия и изучение блока кратких теоретических сведений (с помощью компьютера).
2. Уяснение задачи, методики расчетов и индивидуальных исходных данных, полученных от преподавателя.
3. Расчеты: длины РУ, количества РУ внутри секции ДП, необходимого числа НРП, затухания регенерационных участков, величины усиления корректирующего усилителя.
4. Построение диаграммы уровней передачи для первых трех участков.

4. Теоретическая часть

Номинальное затухание РУ ($A_{\text{ном}}$) при температуре 20°C приводится в технических данных аппаратуры (см. табл. 2). Длина РУ для температуры грунта, отличающейся от 20°C (например, при максимальной температуре, когда затухание кабеля максимально), определяется по формуле

$$l_{\text{ном}} = \frac{A_{\text{ном}}}{\alpha_{\text{макс}}}, \text{ км}$$

где $\alpha_{\text{макс}}$ - коэффициент затухания кабеля на расчетной частоте ЦСП для максимальной температуры грунта в зоне строительства линии передачи, дБ/км.

Коэффициент затухания $\alpha_{\text{макс}}$ определяется по формуле

$$\alpha_{\text{макс}} = \alpha_{20} [1 - \alpha_a (20^\circ - t_{\text{макс}})],$$

где α_{20} - коэффициент затухания кабеля на расчетной частоте при температуре грунта, равной 20°C, дБ/км; (α_a - температурный коэффициент затухания кабеля на расчетной частоте, 1/град (берется из паспортных данных кабеля, но с достаточной для инженерных

расчетов степенью точности можно взять $a_a = 2 \times 10^{-3}$ 1/град); t_{\max} - максимальная температура грунта на глубине заделки кабеля, $^{\circ}\text{C}$ (определяется из метеонаблюдений за несколько лет на этапе изысканий).

Значения коэффициента затухания α_{20} для расчетной частоты определяются по формуле

$$\alpha_{20} = \alpha_1 \cdot \sqrt{\frac{f_t}{2}},$$

где α_1 – коэффициент затухания пары кабеля на частоте 1 МГц; f_t – тактовая частота линейного цифрового сигнала, МГц, определяемая типом линейного кода цифровой системы передачи. Значения α_1 для широко применяемых типов симметричных высокочастотных кабелей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Характеристика кабелей

Марка кабеля	МКС 1х4х1,2	МКСА 4х4х1,2	МКСБ 4х4х1,2	МКСБ 7х4х1,2	КСПП 1х4х1,2
α_1 , дБ/км	5,350	4,954	5,388	5,233	5,430

Расчет количества РУ внутри секции ДП находится по формуле

$$n_{\text{ру}} = \text{Ц} \left(\frac{L_{\text{дп}}}{l_{\text{ном}}} \right),$$

где $L_{\text{дп}}$ - длина секции ДП, км; $\text{Ц}(x)$ - функция округления до большего ближайшего целого числа.

Необходимое число НРП равно

$$n_{\text{нрп}} = n_{\text{ру}} - 1.$$

При проектировании трасса разбивается первоначально на участки номинальной длины, а затем по условиям местности производится привязка НРП с учетом допустимых отклонений длин РУ от номинальной. Укороченные относительно номинала РУ в пределах секции ДП следует располагать перед ОП, ОРП или пунктом переприема по тональной частоте, т. к. блоки линейных регенераторов современных ЦСП по электрическим кабелям не содержат искусственных линий. Если же имеются искусственные линии, то с их помощью «укороченные» участки электрически удлиняются до длины, находящейся в допустимых пределах.

Взаимное расположение укороченных и удлиненных относительно номинала РУ в пределах секции ДП может быть произвольным. Однако, следует размещать НРП равномерно, так, чтобы длины регенерационных были бы одинаковыми и не выходили за пределы возможных отклонений. Следует избегать удлиненных РУ. Это связано с тем, что с ростом затухания РУ значительно возрастает вероятность ошибки, при этом для всего линейного тракта ЦСП она определяется в основном вероятностью ошибки на худшем РУ, которым является самый длинный.

Помехозащищенность цифровой линии передачи оценивается вероятностью возникновения ошибок при прохождении цифрового сигнала через все элементы цифрового линейного тракта (ЦЛТ). Ошибки в разных регенераторах возникают практически независимо

друг от друга, поэтому вероятность ошибок в ЦЛТ можно определить как сумму вероятностей ошибок по отдельным участкам

$$P_{\text{ош ож лт}} = \sum_{p=1}^{n_{\text{рп}}} P_{\text{ош ож } i}$$

где $n_{\text{рп}}$ - количество регенерационных пунктов с учетом регенератора ОП приемной станции; $P_{\text{ош ОЖ } i}$ - вероятность ошибки i -го регенератора.

Если вероятность ошибок у всех регенераторов одинакова, то ожидаемая вероятность ошибки всего ЦЛТ равна

$$P_{\text{ош ож лт}} = n_{\text{рп}} \cdot P_{\text{ош ож}}$$

Ожидаемую вероятность ошибок удобнее всего рассчитывать с учетом группирования РУ с одинаковыми длинами.

После размещения регенерационных пунктов выполняется расчет затухания регенерационных участков $A_{\text{ру}}$, которое равно

$$A_{\text{ру}} = \alpha_{\text{макс}} \cdot l_{\text{ру}} + 2A_{\text{лт(фп)}} + A_{\text{ил}}$$

где $A_{\text{лт(фп)}}$ - затухание линейного трансформатора для ЦСП по симметричным кабелям или фильтров питания для ЦСП по коаксиальным кабелям;

$A_{\text{ил}}$ - затухание искусственной линии, если она используется для удлинения регенерационного участка.

В цифровых системах передачи рассчитываются следующие разновидности уровней передачи:

- абсолютный уровень пиковой мощности при воздействии единичного импульса цифрового сигнала с амплитудой $U_{\text{пер}}$

$$P_{\text{пер1}} = 10 \lg \left[\frac{U_{\text{пер}}^2}{z_{\text{в}}} \cdot 10^3 \right], \text{ дБ};$$

где $z_{\text{в}}$ - волновое сопротивление линии, Ом.

$$P_{\text{пер}} = 10 \lg \left[\frac{U_{\text{пер}}^2}{2z_{\text{в}}} \cdot 10^3 \right], \text{ дБ},$$

- средний абсолютный уровень цифрового сигнала

Соответствующим образом определяются уровни приема на входе линейного регенератора регенерационного пункта

Для проверки соответствия величин усилительной способности регенератора на

$$P_{np1} = P_{пер1} - A_{py}, \text{ дБ},$$

$$P_{np} = P_{пер} - A_{py}, \text{ дБ}.$$

рабочей частоте определяется величина усиления корректирующего усилителя (КУ):

$$S_y = P_{y_{вых}} - P_{np}, \text{ дБ}.$$

где $P_{y_{вых}}$ - абсолютный уровень средней мощности на выходе усилителя, равный

$$P_{y_{вых}} = 10 \lg \left[\frac{U_m^2}{2z_{py}} \cdot 10^3 \right], \text{ дБ},$$

где U_m - напряжение единичного импульса на входе решающего устройства (РУ), т.е. на выходе КУ, которое в ЦСП принято равным минимальному значению напряжения высокого потенциала микросхем соответствующей серии; z_{py} - входное сопротивление РУ линейного регенератора.

Реализация таких затуханий возможна только при полном подавлении всех помех, кроме помех, вызванных переходным влиянием на дальний конец. Поэтому затухание кабельной линии на регенерационном участке выбирают примерно на 10.. 15 дБ меньше максимальной усилительной способности регенераторов.

Тогда проверка соответствия величин необходимых усиления регенераторов производится по формуле

$$S_y \leq S_{y \text{ макс}} = A_{\text{макс}} - (10...15), \text{ дБ}.$$

Рассчитанные значения длины и затухания РУ, а также уровней на входе регенератора и усиления корректирующих усилителей регенератора заносятся в соответствующие таблицы (например, таблица 2).

Таблица 2

№ п/п	Номер реге- нерацион- ного пункта	l_{py} , км	A_{py} , дБ	P_{np} , дБ	S_y , дБ
1	ОП-А	-	-	-	-
2	НРП-1/1	3,0	71	-59,8	62,8
#	#	#	#	#	#
7	НРП-6/1	2,7	64,1	-52,9	55,9
#	#	#	#	#	#

5. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

Исходные данные										
№ варианта	α_1	t_{max}	α_a	$L_{ДП}$	$L_{маг}$	$A_{ЛТ}$	$U_{пер}$	U_m	$Z_в$	$Z_{РУ}$
1	5,35	+15	$2 \cdot 10^{-3}$	200	600	0,5	3	5	600	600
2	4,954	+12	$2 \cdot 10^{-3}$	180	620	1,0	3	5	590	590
3	5,388	+13	$2 \cdot 10^{-3}$	190	590	0,8	3	5	595	595
4	5,233	+16	$2 \cdot 10^{-3}$	170	580	0,9	3	5	580	580
5	5,430	+10	$2 \cdot 10^{-3}$	175	610	1,2	3	5	585	585
6	4,995	+17	$2 \cdot 10^{-3}$	160	570	1,3	3	5	605	605
7	5,122	+16	$2 \cdot 10^{-3}$	150	560	1,5	3	5	610	610
8	5,130	+9	$2 \cdot 10^{-3}$	165	585	1,1	3	5	615	615
9	5,287	+11	$2 \cdot 10^{-3}$	185	575	1,25	3	5	585	585
10	4,911	+12	$2 \cdot 10^{-3}$	195	590	1,3	3	5	580	580

Примечание: Для всех вариантов -- поток **ЕЗ** (ИКМ 480). По результатам расчетов построить **диаграмму уровней передачи** для первых трех участков **НРП-1/1, НРП-2/1, НРП-3/1**, имея в виду следующее предположение: первый участок имеет номинальную длину, второй – на 10% короче, а третий – на 5% длиннее номинального.

ПРИМЕР

Исходные данные										
№ варианта	α_1	t_{max}	α_a	$L_{ДП}$	$L_{маг}$	$A_{ЛТ}$	$U_{пер}$	U_m	$Z_в$	$Z_{РУ}$
X	5,35	+25	$2 \cdot 10^{-3}$	200	600	0,5	3	5	600	600

- Для потока **ЕЗ** тактовая частота $f_m = 34,368$ МГц.
- $A_{ном}$ по таблице 2 равно 73 дБ.
- Находим α_{20} . $\alpha_{20} = \alpha_1 \cdot \sqrt{\frac{f_t}{2}}$, $\alpha_1 = 5,350$; $\alpha_{20} = 5,350 \cdot \sqrt{\frac{34,368}{2}} = 22,178$ дБ/км.
- Находим α_{max} . $\alpha_{max} = \alpha_{20} [1 - \alpha_a \cdot (20^0 - t_{max})] = 22,178 \cdot (1 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot (-5)) = 22,231$ дБ/км.
- Находим $l_{ном}$. $l_{ном} = \frac{73}{22,231} = 3,284$ км.
- Вычисляем количество РУ внутри секции ДП - $n_{ру} = \Pi\left(\frac{200}{3,284}\right) = 61$.
- Тогда необходимое число НРП на участке секции ДП равно $61 - 1 = 60$.
- Вычисляем ожидаемую вероятность ошибки всего ЦЛТ -

$$p_{ож\ ош\ ру} = 59 \cdot 10^{-10} = 0,59 \cdot 10^{-8}$$

- Вычисляем затухания регенерационных участков $A_{ру}$ пока для номинальной длины – $A_{ру} = \alpha_{max} \cdot l_{ру} + 2A_{ЛТ} + 0 = 22,231 \cdot 3,284 + 2 \cdot 0,5 = 74$ дБ
- Вычисляем абсолютный уровень передачи на выходе передающего устройства –

$$p_{пер} = 10 \lg \left[\frac{U_{пер}^2}{2Z_B} \cdot 10^3 \right] = 10 \lg \frac{9}{1200} \cdot 10^3 = 8,75 \text{ дБ}$$

11. Вычисляем абсолютный уровень передачи на входе приемного устройства регенерационного участка - $p_{пр} = 8,75 - 74 = -65,23$ дБ.
12. Вычисляем $p_{у\text{ вых}}$ - абсолютный уровень средней мощности на выходе усилителя –

$$p_{у\text{ вых}} = 10 \lg \left(\frac{5^2}{2 \cdot 600} \cdot 10^3 \right) = 13,19 \text{ дБ.}$$

13. Тогда коэффициент усиления корректирующего усилителя на входе решающего устройства регенератора равен

$$S_y = 13,19 - (-65,23) = +78,42 \text{ дБ.}$$

14. Вычисляем параметры второго и третьего участков:

$$l_2 = 3,284 \cdot 0,9 = 2,956 \text{ км;}$$

$$A_{py2} = 22,231 \cdot 2,956 + 2 \cdot 0,5 = 66,7 \text{ дБ;}$$

$$p_{np} = 8,75 - 66,70 = -58,20 \text{ дБ;}$$

Для укороченного участка необходимо вычислить значение затухания искусственной линии:

$$A_{ил} = |p_{пр\text{ ном}} - p_{пр2}| = |-65,23 + 58,20| = +7,03 \text{ дБ.}$$

$$L_3 = 3,284 \cdot 1,05 = 3,448 \text{ км;}$$

$$A_{p3} = 22,231 \cdot 3,448 + 2 \cdot 0,5 = 77,66 \text{ дБ;}$$

$$p_{np} = 8,75 - 77,66 = -67,88 \text{ дБ.}$$

15. Для удлинённого участка НРП-3/1 коэффициент усиления корректирующего усилителя на входе решающего устройства регенератора должен быть больше номинального за счет запаса усиления:

$$S_{y3} = 13,19 - (-67,88) = +81,07 \text{ дБ.}$$

Заносим данные в таблицу и строим диаграмму уровней передачи для первых трех участков.

№ п/п	Номер регенерационного пункта	l_{py} , км	A_{py} , дБ	p_{np} , дБ	S_y , дБ	$A_{ил}$, дБ
1	ОП-А	-	-	-	-	-
2	НРП-1/1	3,284	74	-65,23	78,42	-
3	НРП-2/1	2,956	66,7	-58,20	78,42	7,03
3	НРП-3/1	3,448	77,66	-67,88	81,07	-
#	#	#	#	#	#	

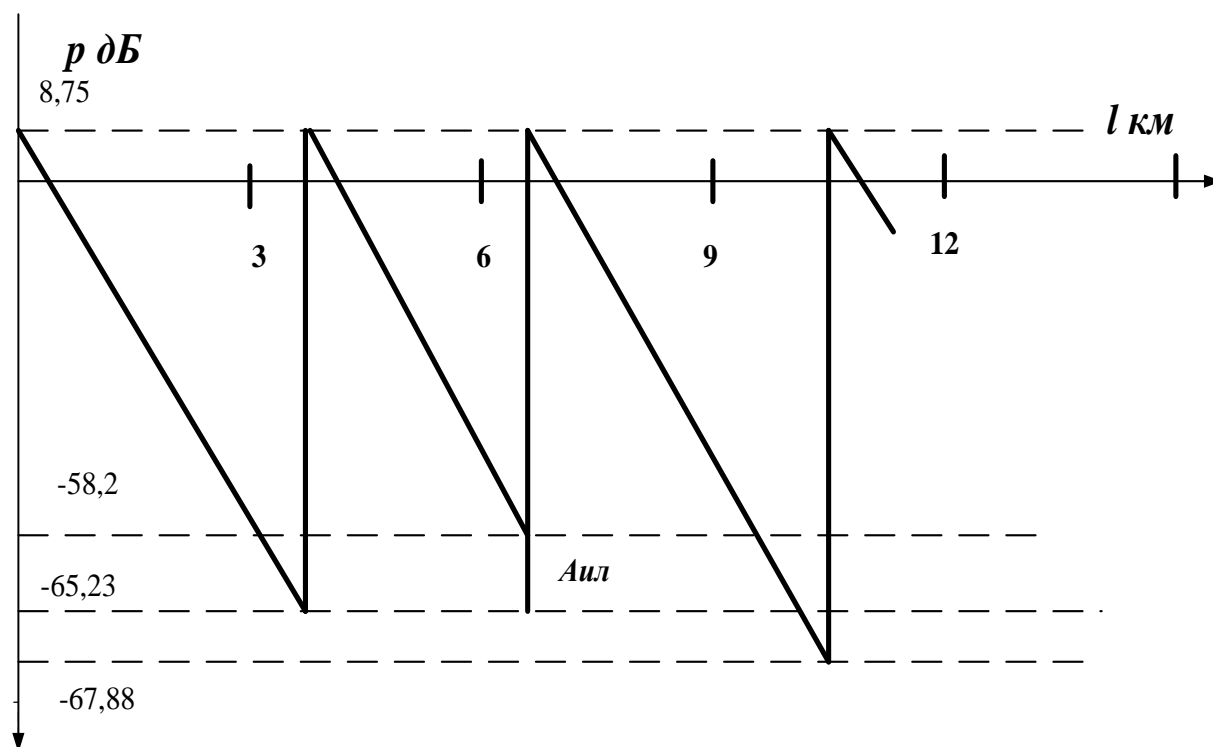


Диаграмма уровней передачи ЦЛТ

6. Контрольные вопросы:

1. Дать определение регенерационного участка.
2. Дать определение секции дистанционного питания.
3. От чего зависит вероятности ошибки регенератора?
4. Назвать основные структурные элементы цифрового линейного тракта.
5. Основные функции регенератора.
6. От чего зависит затухание регенерационных участков?
7. От чего зависит длина регенерационного участка?
8. Что такое «глаз-диаграмма»?
9. Основные параметры ЛЦС и их физическая сущность.
10. Назовите основные причины искажения сигналов в цифровых линейных трактах (ЦЛТ).
11. Основные требования, предъявляемые к структуре линейного цифрового сигнала (ЛЦС). Их физическая сущность.

7. Литература.

1. В.В. Крухмалев, В.Н.Гордиенко, А.Д. Моченов. Цифровые системы передачи: Учебное пособие для вузов /Под ред. А.Д. Моченова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013. – 352 с.: ил.
2. Е.Б. Алексеев, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев и др. Проектирование и эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. Учебное пособие для вузов/ Под ред. В.Н.Гордиенко и М.С. Тверецкого. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 392 с.: ил.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 2.

Тема: Расчет показателей надежности участка внутризональной первичной сети

1. Цели занятия:

Закрепить знания по теории надежности цифровых систем передачи. Получить практические навыки расчетов основных показателей надежности каналов и трактов передачи. Овладеть методикой расчета показателей надежности восстанавливаемых и невосстанавливаемых объектов линий передачи.

2. Рекомендации:

Изучить материал в [1] с.36-48.

3. Порядок выполнения работы:

1. Опрос по теоретическому материалу занятия и изучение блока кратких теоретических сведений (с помощью компьютера).
2. Уяснение задачи, методики расчетов и индивидуальных исходных данных, полученных от преподавателя.
3. Расчеты: среднего времени между отказами, коэффициентов готовности и простоя, среднего времени восстановления. Оценить надежность ВОЛП.

Теоретическая часть:

Под **надежностью** объекта (элемента или системы) понимают его свойство сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих качество передачи.

Комплексным показателем надежности восстанавливаемых объектов, к которым относятся устройства электросвязи, является **коэффициент готовности** K_z , определяющий вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени.

С коэффициентом готовности связан **коэффициент простоя** $K_n = 1 - K_z$, который определяет вероятность того, что объект окажется в неработоспособном состоянии в произвольный момент времени.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени (наработки). Ее характеризуют показателями:

- **наработкой на отказ**, или средним временем между отказами T_o , ч.
- **средним временем восстановления** T_v , ч;
- **интенсивностью отказов** - средним количеством отказов в единицу времени (обычно в течение одного часа) $\lambda(t)$, 1/ч;

Считается, что в период нормальной эксплуатации (после приработки и до физического износа), интенсивность отказов постоянна $\lambda(t) = \text{const} = \lambda$.

В этом случае $T_o = 1/\lambda$, а вероятность безотказной работы; $P(t) = e^{-\lambda t}$

Очевидные соотношения:
$$K_z = \frac{T_o}{T_o + T_v}; \quad K_n = \frac{T_v}{T_o + T_v};$$

Если считать, что отказы элементов в системе независимы, а отказ одного элемента приводит к отказу всей системы в целом, то при n элементах в системе

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad K_e = \prod_{i=1}^n K_{ei}; \quad K_n = \sum_{i=1}^n K_{ni}$$

Среднее время восстановления системы из N элементов:

$$T_{ec} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i T_{eci}}{\lambda_c}$$

Требуемые показатели надежности канала передачи зависят от его протяженности.

$$T_{OL} = \frac{T_{OM} \cdot L_M}{L}; \quad K_{PL} = (1 - K_{GM}) \cdot \frac{L}{L_M};$$

где T_{OM} - норматив среднего времени между отказами,

K_{GM} - коэффициент готовности канала максимальной протяженности.

Для канала внутризоновой первичной сети длиной $L_M=1400$ км установлено:

- канал ТЧ аналоговой сети $T_{OM} \geq 111,4$ ч. $K_{GM} \geq 0,99$.

- ОЦК цифровой сети: $T_{OM} \geq 2050$ ч. $K_{GM} \geq 0,998$.

При расчете надежности магистрали расчет ведется отдельно для линейно-кабельных сооружений (ЛКС) аппаратного комплекса.

При расчете показателей надежности ЛКС учитывают:

- λ_{K1} – интенсивность отказов одного километра оптического кабеля в год из-за *внешних причин*. Его значения вычисляют из того, что на 100км кабеля приходится в среднем G повреждений в год. Предположим, что $G=0,15$, тогда:

$$\lambda_{K1} = 0,15 / 100 \cdot 8765 = 1,7 \cdot 10^{-7} 1/ч \cdot км$$

- λ_{K2} – интенсивность отказов одной строительной длины ОК из-за *внутренних причин*.

λ_{K2} рассчитывают, руководствуясь техническими условиями на ОК, согласно которым минимальная наработка на отказ одной строительной длины составляет 215000 часов. Приблизительно считают, что среднее значение (наработка на отказ) в G_1 раз больше минимальной. Тогда, предполагая, что $G_1 = 15$ получим:

$$\lambda_{K2} = 1 / 215000 \cdot 15 = 3,1 \cdot 10^{-7} 1/ч.$$

- $\lambda_{нрп.к}$ – интенсивность отказов одного НРП за счет внешних повреждений.

Согласно опыта эксплуатации отказ НРП из-за внешних повреждений составляет в среднем G_2 на один пункт в год. Предположим, что $G_2=0,006$.

Отсюда получается:

$$\lambda_{нрп.к} = 0,006 / 8765 = 6,8 \cdot 10^{-6} 1/ч.$$

Среднее время восстановления $T_{влкс}=10$ ч.

Интенсивность отказов ЛКС

$$\lambda_{лкс} = \lambda_{K1} L + \lambda_{K2} n_{CD} + \lambda_{нрп.к} n_{нрп}$$

Далее рассчитывается $T_{олкс}$, $K_{злкс}$, $K_{нлкс}$.

Расчет показателей надежности аппаратного комплекса производится исходя из числа мультиплексоров НРП на магистрали. Основу мультиплексора, в основном определяющим его надежность, составляют оптические передатчики и приемники (оптический интерфейс). По опыту эксплуатации их надежность определяется средним временем наработки на отказ G_3 часов. Предполагая, что $G_3 = 45000$ часов получим:

$$\lambda_{мл} = 1 / 45000 = 2,22 \cdot 10^{-4} 1/ч.$$

Далее по известным формулам рассчитываются T_{oa} , $K_{гд}$, и $K_{па}$. При расчете полагают, что время восстановления $НРП \leq 2,5$ ч..

Зная показатели надежности ЛКС, аппаратного комплекса, рассчитывают результирующие показатели:

$$\lambda_m = \lambda_{лкс} + \lambda_{д}, \quad T_{ом} = 1/\lambda_m; \quad K_{зм} = 1 - K_{лкс} - K_{па}.$$

Зная результирующую интенсивность отказов магистрали, производят расчет вероятности безотказной работы за периоды: сутки, квартал, полугодие, год.

На основе расчетов необходимо сделать выводы.

№ варианта	1	2	3	4	5
Последняя цифра студенческого билета	0,5	1,6	2,7	3,8	4,9
Параметр G	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10
Параметр G_1	16	14	17	13	12
Параметр G_2	0,005	0,0045	0,0055	0,0059	0,0065
Параметр G_3 , час	40000	42000	43000	41000	46000
Длина магистрали L (км)	1200	1100	1000	1050	950
Длина строительного участка $l_{см}$, (км)	3	4	2	2,5	3,5
Номинальная длина регенерационного участка $l_{рег}$, (км)	95	100	105	90	110
Среднее время восстановления ЛКС (час)	8	6	7	5	9
Среднее время восстановления мультиплексора (час)	0,5	0,6	0,45	0,7	0,8

Пример. Исходные данные в таблице 2.

Таблица 2 – Исходные данные для примера

Параметр G	0,15
Параметр G_1	15
Параметр G_2	0,006
Параметр G_3 , час	45000
Длина магистрали L (км)	800
Длина строительного участка $l_{см}$, (км)	4
Номинальная длина регенерационного участка $l_{рег}$, (км)	100
Среднее время восстановления ЛКС (час)	10
Среднее время восстановления мультиплексора (час)	0,5

Решение

1. Интенсивность отказов одного километра оптического кабеля в год из-за *внешних причин*:

$$\lambda_{K1} = 0,15 / 100 \cdot 8765 = 1,7 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч} \cdot \text{км}.$$

2. Интенсивность отказов одной строительной длины ОК из-за *внутренних причин*:

$$\lambda_{K2} = 1 / 215000 \cdot 15 = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч}.$$

3. Интенсивность отказов одного НРП за счет внешних повреждений:

$$\lambda_{нрп.к} = 0,006 / 8765 = 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч}.$$

4. Интенсивность отказов ЛКС

$$\lambda_{лкс} = \lambda_{K1} L + \lambda_{K2} n_{CD} + \lambda_{нрп.к} n_{нрп}.$$

Предварительно нужно найти число строительных длин и число регенерационных пунктов на магистрали.

$$n_{CD} = \frac{L}{l_{CD}} = \frac{800}{4} = 200$$

$$n_{нрп} = \frac{L}{l_{рег}} = \frac{800}{100} = 8, \text{ тогда}$$

$$\lambda_{лкс} = 1,7 \cdot 10^{-7} \cdot 800 + 3,1 \cdot 10^{-7} \cdot 200 + 6,8 \cdot 10^{-6} \cdot 8 = 0,2524 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{час}}$$

5. Интенсивность отказов мультиплексора:

$$\lambda_{мл} = 1 / 45000 = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч}.$$

6. Нарботка на отказ ЛКС:

$$T_{0лкс} = \frac{1}{0,2524 \cdot 10^{-3}} = 3692 \text{ часов}.$$

7. Коэффициент готовности ЛКС: $K_{Г лкс} = \frac{3692}{3692+10} = 0,9973$.

8. Коэффициент простоя ЛКС:

$$K_{П лкс} = \frac{10}{3692+10} = 0,0027.$$

9. Нарботка на отказ мультиплексора:

$$T_{0мл} = \frac{1}{2,22 \cdot 10^{-4}} = 4504 \text{ часа}.$$

10. Коэффициент готовности мультиплексора:

$$K_{Г мп} = \frac{4504}{4504+0,5} = 0,99989.$$

11. Коэффициент простоя мультиплексора:

$$K_{П мп} = \frac{0,5}{4504,5} = 0,0027 = 0,000011.$$

4. Контрольные вопросы:

1. Дать определение коэффициента готовности.
2. Дать определение коэффициента простоя.
3. Дать определение среднего времени между отказами.
4. Дать определение среднего времени восстановления.
5. Дать определение интенсивности отказов.
6. Дать определение интенсивности восстановления.
7. Основные пункты методики расчета показателей надежности восстанавливаемых объектов ВОЛП.
8. Основные пункты методики расчета показателей надежности невосстанавливаемых объектов ВОЛП.
9. Пояснить основные этапы эксплуатации ЦСП с точки зрения надежности.
10. Дать определение первичной сети.
11. Пояснить понятие внутризоновая сеть.
12. Дать определение магистральной сети.

5. Литература.

1. Е.Б. Алексеев, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев и др. Проектирование и эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. Учебное пособие для вузов/ Под ред. В.Н.Гордиенко и М.С. Тверецкого. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 392 с.: ил.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 3.

Тема: Оценка динамического диапазона сигнала в линейном тракте ЦСП

1. Цели занятия:

Закрепить знания по теории линейных сигналов цифровых систем передачи. Получить практические навыки расчетов основных показателей линейных сигналов. Овладеть методикой оценки динамического диапазона линейного сигнала при заданной защищенности.

2. Рекомендации:

Изучить материал в §3.2.1 [1], §1.3.1 [2], §5,3 [3].

3. Порядок выполнения работы:

1. Опрос по теоретическому материалу занятия и изучение блока кратких теоретических сведений (с помощью компьютера).

2. Уяснение задачи, методики расчетов и индивидуальных исходных данных, полученных от преподавателя.

3. Определить минимальное количество разрядов m в кодовом слове, при котором обеспечивается заданная защищенность гармонического колебания с минимальной амплитудой $U_{мин}$ от шумов квантования $A_{з.кв.}$ при равномерном квантовании двухполярных отчетов. Построить зависимость защищенности от уровня

гармонического колебания при изменении его амплитуды от $U_{мин}$ до напряжения ограничения $U_{огр}$.

4. Определить допустимый диапазон изменения уровня гармонического колебания, в котором защищенность от шумов квантования остается не ниже заданной, при использовании неравномерного квантования с сегментированной характеристикой А - типа, рекомендованной МСЭ – Т.

Исходные данные в таблице 1.

Таблица 1 - Исходные данные по вариантам

Предпоследняя цифра студенческого билета	Защищенность от шумов квантования $A_{з.кв}$, дБ	Последняя цифра студенческого билета	Минимальная амплитуда гармонического колебания $U_{мин}$ мВ	Напряжение ограничения $U_{огр}$, В
0	27	0	2,5	1
1	25	1	3	2
2	25	2	5	1.5
3	27	3	4,5	1.2
4	26	4	8	3
5	23	5	7	1.6
6	23,5	6	6,5	0,5
7	22	7	3,5	2,5
8	22,5	8	6	1,8
9	21	9	7,5	2,7

Теория

Расчет защищенности от шумов квантования для гармонического сигнала производится по формуле

$$A_{ш.кв.} = 10 \lg \frac{6U^2}{\sigma_i^2}$$

Минимальное число разрядов m в кодовом слове при равномерном квантовании гармонического сигнала, обеспечивающую заданную защищенность $A_{з.кв.}$ в диапазоне значений амплитуд от $U_{мин}$ до $U_{огр}$, можно определить из формулы

$$A_{з.кв.} = 6m - 20 \lg k + 4,8 - 20 \lg \frac{U_{огр}}{U_{мин}} \quad (1)$$

Где k – пик - фактор, равный для гармонического сигнала $\sqrt{2}$.

При расчете графика защищенности $A_{з.кв.}$ от уровня сигнала надо использовать зависимости:

$$A_{з.кв.} = 10 \lg \frac{P_c}{P_{ш.кв.}} = 20 \lg \frac{U_{эфф.}}{0.775} - 10 \lg \frac{\sigma^2}{12} = p_c - p_{ш.кв} \quad (2)$$

а величину шага квантования определить по формуле:

$$\delta = \frac{U_{огр}}{2048} \quad (3)$$

В формуле (2) $p_c - p_{ш.кв}$ - разность абсолютных уровней передачи сигнала и шумов квантования.

График зависимости защищенности от абсолютного уровня сигнала строить в координатах $A_{з.кв}$ [дБ] - U_c в пределах от $U_{мин}$ до $U_{огр}$ в децибелах, т.е. $A_{з.кв} = F(p_c)$.

С учетом линейной зависимости $A_{з.кв}$ от абсолютного уровня сигнала достаточно вычислить значения $A_{з.кв}$ в двух точках p_c : для $U_{мин}$ и для $U_{огр}$. При этом удобно пользоваться формулой

$$p_c = 20 \lg \frac{U}{1,41 \cdot 0,775} = 20 \lg \frac{U}{1,09275} \quad [\text{дБ}] \quad (4)$$

В данной формуле учтены коэффициент 1,41 приведения к эффективному значению напряжения гармонического сигнала по его амплитудному значению, а также 0,775 - эталонное значение напряжения при вычислении абсолютного уровня передачи по напряжению в децибелах.

При выполнении пункта 2 задания необходимо определить динамический диапазон входного сигнала обеспечиваемого в нелинейном кодере типа A при заданной минимальной защищенности. Для этого необходимо определить уровень и амплитуду сигнала, соответствующие минимальному значению $A_{з.кв}$.

В этой формуле нет необходимости учитывать поправочные коэффициенты для эффективных значений напряжения сигнала.

Пример:

Дано: $U_{огр} = 1,4$ В, $U_{мин} = 2$ мВ, $A_{з.кв} = 27$ дБ.

1. Минимальное число разрядов m : по формуле (1):

$$m = 1/6 \cdot (27 + 20 \lg 1,41 - 4,8 + 20 \lg (1,4/2 \cdot 10^{-3})) = \text{ent}(13,7) = 14$$

Защищенность для $U = U_{огр}$ и $U = U_{мин}$ по формуле (2) с учетом (4):

$$A_{з.кв.огр} = p_{с.огр} - p_{ш.кв} = 20 \cdot \lg(1,4/1,09) - 10 \cdot \lg \frac{(\frac{1,4}{2048})^2}{12} = 2,17 - (-74,1) = 76,3 \text{ дБ}$$

$$A_{з.кв.мин} = p_{с.мин} - p_{ш.кв} = 20 \cdot \lg(2 \cdot 10^{-3}/1,09) - 10 \cdot \lg \frac{(\frac{1,4}{2048})^2}{12} = -54,7 - (-74,1) = 19,4 \text{ дБ}$$

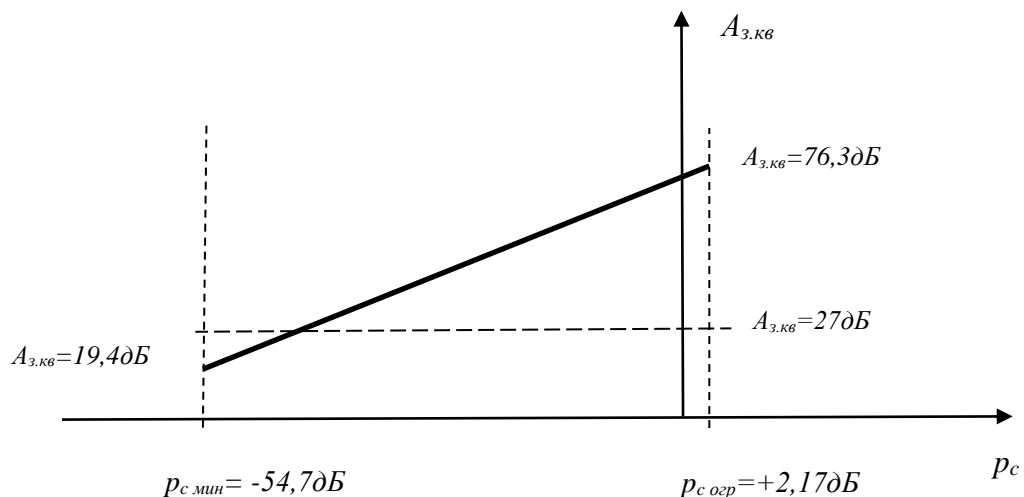


Рисунок 1 – Зависимость защищенности при равномерном квантовании

2. График $A_{з.кв} = F(p_c)$ удобнее строить в относительных уровнях сигнала при условии, что опорное значение сигнала равно $U_{огр}$, т.е.

$$p_c = 20 \lg \frac{U_c}{U_{огр}} \quad (5)$$

Тогда график, построенный в абсолютных уровнях передачи, сместится так, что нулевому значению p_c будет соответствовать $U_c = U_{огр}$. В этой формуле нет необходимости учитывать поправочные коэффициенты для эффективных значений напряжения сигнала.

Сначала определяем уровни сигналов для начального и конечного значений сигнала в 7 сегменте, используя таблицу 3.1 в [1]:

$$p_{c.н} = 20 \lg(0/5) = -6 \text{ дБ};$$

$$p_{c.к} = 20 \lg(1) = 0 \text{ дБ}.$$

Аналогично вычисляем значения уровней для остальных сегментов, используя таблицу 3.1 и формулу (3).

Затем по формуле (3) вычисляем значения $A_{з.кв}$ для этих значений уровней сигнала и строим график $A_{з.кв} = F(p_c)$.

Для 7 сегмента :

$$A_{з.кв.н} = 10 \lg \frac{6 \cdot 0,7^2}{\left(64 \cdot \frac{1,4}{2048}\right)^2} = 31,9 \text{ дБ};$$

$$A_{з.кв.к} = 10 \lg \frac{6 \cdot 1,4^2}{\left(64 \cdot \frac{1,4}{2048}\right)^2} = 37,9 \text{ дБ}.$$

Аналогично для 2-6 сегментов. Для 0-1 сегментов линия защищенности пойдет вниз параллельно отрезкам линий для сегментов 2-7. Скачки вверх на границах сегментов объясняются изменением в 2 раза шага квантования в соседних сегментах. Динамический диапазон сигнала находится по графику как показано на рисунке 2.

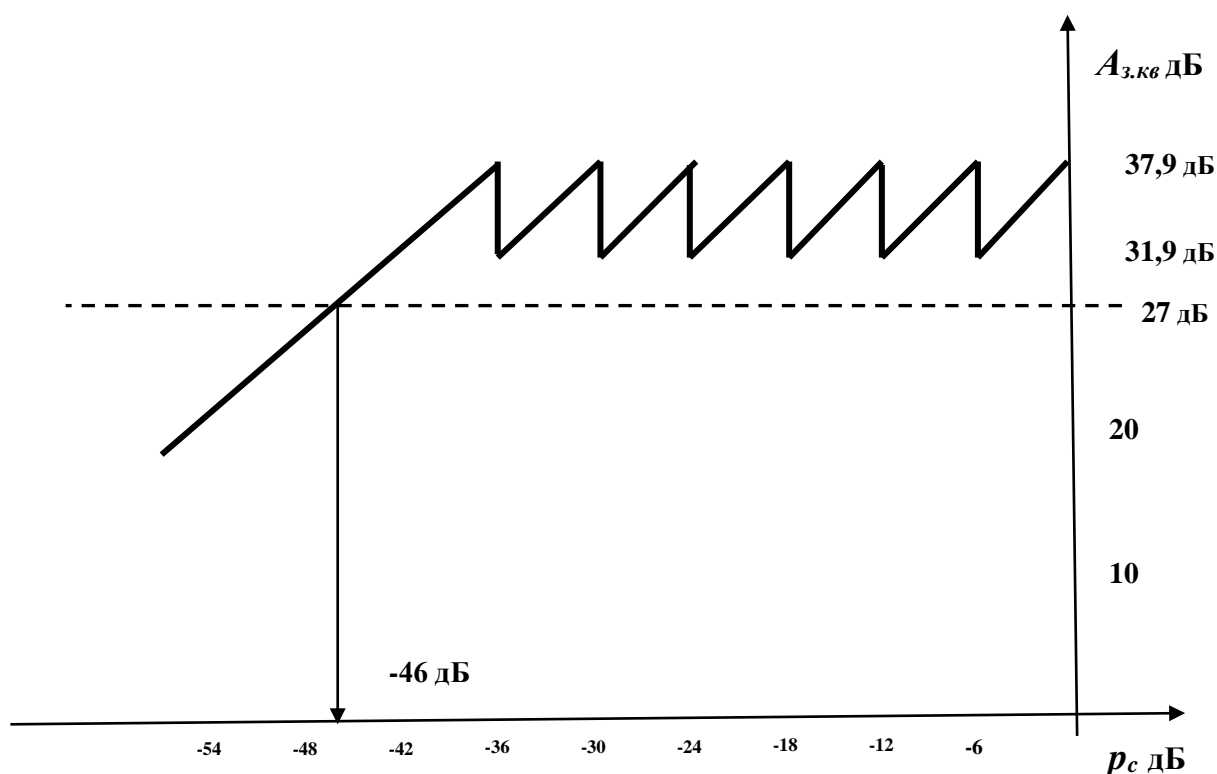


Рисунок 2 - Зависимость защищенности при неравномерном квантовании

Таким образом, динамический диапазон для заданной защищенности $A_{з.кв} = 27$ дБ получился по графику: $D = 46$ дБ. Данному относительному уровню сигнала соответствует по(5) амплитудное значение сигнала:

$$U_{с.мин} = U_{огр} \cdot 10^{(-46/20)} = 1,4 \cdot 10^{(-46/20)} = 0,007 \text{ В} = 7 \text{ мВ}$$

Полученное минимально допустимое для заданной защищенности $A_{з.кв}$ значение больше заданного в исходных данных $U_{мин} = 2$ мВ, что объясняет ход графика на рисунке 1.

4. Контрольные вопросы:

1. Поясните понятие «равномерный код».
2. Поясните понятие «неравномерный код».
3. Какие неравномерные коды, применяемые в линейных трактах ЦСП, вы знаете?
4. Поясните понятие «компандирование».
5. Поясните структуру кода с квазилогарифмической характеристикой компандирования по А-закону.
6. Дайте определение динамического диапазона сигнала.
7. В чем измеряются уровни линейного сигнала в тракте ЦСП?
8. Поясните понятие «защищенность сигнала от шумов квантования».
9. Как рассчитывается мощность шумов квантования?
10. Чем объясняются скачки на границах сегментов кода с квазилогарифмической характеристикой компандирования по А-закону?
11. Дайте определение абсолютного уровня передачи.
12. Дайте определение относительного уровня передачи.

5. Литература

1. . Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебник для вузов. М.: Горячая линия - Телеком, 2012 - 416с.
2. Крухмалев В.В., Гордиенко В.М., Моченов А.Д. Цифровые системы передачи. Учебное пособие для вузов / под редакцией А.Д. Моченова. – М.: Горячая линия – Телеком, 2013 – 352с.
3. Цифровые и аналоговые системы передачи. Учебник для вузов / под редакцией В.И. Иванова – 2 издание – М.: Горячая линия – Телеком, 2014 – 232с.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 4.

Тема: Расчет длины регенерационного участка ЦСП по симметричному кабелю

1. Цели занятия:

Закрепить знания по структуре регенерационного участка ЦСП по симметричному кабелю, модели влияния, переходным затуханиям, особенностям используемых линейных кодов. Получить практические навыки расчетов основных показателей регенерационного участка ЦСП по симметричному кабелю. Овладеть методикой расчета регенерационного участка ЦСП по симметричному кабелю.

2. Рекомендации:

Изучить материал в [1] с.93-107.

3. Порядок выполнения работы:

1. Опрос по теоретическому материалу занятия и изучение блока кратких теоретических сведений (с помощью компьютера).
2. Уяснение задачи, методики расчетов и индивидуальных исходных данных, полученных от преподавателя.

3. Рассчитать: ожидаемую минимальную защищенность от переходной помехи из-за влияния на ближний конец в точке принятия решения регенератора ТРР, максимальную протяженность кабельного участка. Составить структурную схему регенерационного участка ЦСП по симметричному кабелю.

Теория

Длина регенерационного участка должна быть наибольшей с тем, чтобы минимизировать количество регенераторов на линии. С другой стороны, увеличение длины регенерационного участка при прочих равных условиях приводит к увеличению коэффициента ошибок в регенераторе. Таким образом, определение длины регенерационного участка должно начинаться с выбора допустимого коэффициента ошибок в применяемых регенераторах. В современных ЦТС обычно принимают допустимый коэффициент ошибок $\leq 10^{-10}$. Вообще же допустимый коэффициент ошибок регенератора может быть найден как $10^{-7} l_{\text{рег}}/L$, где 10^{-7} — норма на коэффициент ошибок, отводимая на данный участок сети, L — полная длина данного участка сети, а $l_{\text{рег}}$ — предполагаемая длина регенерационного участка. Напомним, что полные длины магистрального, внутризонового и местного участков сети равны соответственно 10000, 600 и 100 км соответственно.

Допустимый коэффициент ошибок в регенераторе позволяет определить допустимую величину помехозащищенности регенератора $A_{\text{пз рег}}$, которая и используется в дальнейших расчетах.

Расчет для магистралей с коаксиальным кабелем. Обычно, как это сделано в эквивалентной схеме (рисунок 1), реальные линии и усилитель заменяют идеальными (не вносящими помех), а на входе усилителя включают эквивалентный генератор помехи.



Рисунок 1. К определению длины регенерационного участка

В коаксиальном кабеле, ввиду высокой экранирующей способности его пар, источниками помех являются: тепловая помеха линии, которая, с учетом согласованного включения корректирующего усилителя, может быть подсчитана по формуле Найквиста

$$P_{\text{тн}} = kT\Delta f,$$

где $k = 1,28 \cdot 10^{-23}$ Дж/град — постоянная Больцмана; T — абсолютная температура по Кельвину; $\Delta f = (0 \dots 0,5f_i)$, т. е. $\Delta f = 0,5f_i$ — рабочий диапазон частот линейного тракта.

В этом случае мощность помех эквивалентного генератора, которую называют мощностью собственных помех корректирующего усилителя, можно определить как

$$P_{\text{сл}} = P_{\text{тн}} \cdot D_{\text{кус}},$$

причем здесь $D_{\text{кус}}$ — коэффициент собственных помех (шумов) корректирующего усилителя.

Можно подсчитать, что при нормальной температуре и ширине полосы частот

$$\Delta f = 1 \text{ МГц}, P_{\text{тн}} = 0,404 \cdot 10^{-11} \text{ мВт},$$

что соответствует уровню по мощности $P_{\text{тн}} = -114 \text{ дБм}$. Тогда уровень помехи на входе корректирующего усилителя будет равен

$$p_{cn} = -114 + 10\lg(0,5f_i / 1 \text{ МГц}) + d_{\text{кус}}, \text{ дБ.} \quad (4.6)$$

Здесь

$$d_{\text{кус}} = 10\lg D_{\text{кус}}.$$

Точная оценка мощности полезного сигнала на входе регенератора затруднительна, так как спектр сигналов в коде МЧПИ (который обычно используется в данных линиях) широкий, и затухание линии зависит от частоты. Но ввиду того, что наиболее мощные компоненты спектра данных сигналов расположены в области частоты $0,5f_i$ упрощенно расчет затухания линии проводится на этой частоте. Таким образом, уровень приема сигнала будет равен

$$p_{\text{пр}} = p_{\text{пер}} - \alpha(0,5f_i) l_{\text{рег}},$$

где $\alpha(f)$ — километрическое затухание кабеля, $l_{\text{рег}}$ — длина регенерационного участка, а $p_{\text{пер}}$ — уровень передачи, который может быть подсчитан как

$$p_{\text{пер}} = 10\lg\left(\frac{U_0^2}{Z_{\text{каб}} \cdot 10^{-3}}\right).$$

В последней формуле U_0 — амплитуда импульсов на передаче, $Z_{\text{каб}}$ — характеристическое сопротивление кабеля (обычно равное 75 Ом). Защищенность сигналов от собственных помех на входе регенератора составит

$$A_{\text{зсн}} = p_{\text{пр}} - p_{\text{cn}} = 114 + p_{\text{пер}} - 10\lg(0,5f_i / 1 \text{ МГц}) - \alpha(0,5f_i) l_{\text{рег}} + d_{\text{кус}}.$$

Задаваясь допустимой величиной коэффициента ошибок определяют требуемую помехозащищенность регенератора $A_{\text{пзтреб}}$. Приравнявая $A_{\text{пзтреб}} = A_{\text{зсн}}$, получают следующую формулу для расчета длины регенерационного участка:

$$l_{\text{рег}} = \frac{114 + p_{\text{пер}} - 10\lg(0,5f_i / 1 \text{ МГц}) - d_{\text{кус}} - A_{\text{пзтреб}}}{\alpha(0,5f_i)}.$$

Расчет для магистралей симметричного кабеля. Здесь можно выделить два случая.

1. Количество влияющих ЦТС $N > 6$. Тогда следует считать, что помеха имеет нормальное распределение и ее мощность равна $P_{\text{пп}\sigma} = P_{\text{пп}}N$, где $P_{\text{пп}}$ — мощность переходной помехи создаваемой одной влияющей ЦТС.

Если все ЦТС работают по одному кабелю, то наиболее опасное влияние оказывает передача одной ЦТС на прием другой (рис.1, а). Этот случай эквивалентен ситуации, рассмотренной применительно к коаксиальному кабелю, но уровень помехи эквивалентного генератора

$$p_{\text{пп}} = p_{\text{пер}} - A_6 + 10\lg N,$$

где A_6 — затухание на ближний конец.

Если же имеет место двухкабельная работа ЦТС, т.е. все цепи, по которым передача ведется в одном направлении, помещены в одном кабеле, то характер взаимного влияния между ЦТС можно уяснить с помощью рисунка 2, б.

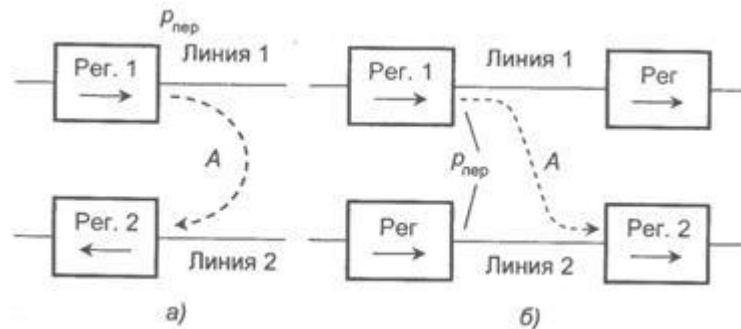


Рисунок 2. Взаимные влияния между ЦТС при однокабельной (а) и двухкабельной работе (б)

В этом случае

$$p_{nn} = p_{пер} - A_d + 10 \lg N,$$

где A_d — переходное затухание на дальний конец. Тогда помехозащищенность регенератора будет $A_{зпн} = p_{пр} - p_{nn} = A_{б,д} - \alpha(0,5f_l) l_{рег}$. Здесь $A_{б,д}$ — переходное затухание на ближний или дальний конец в зависимости от того, какая система организации работы ЦТС используется — однокабельная или двухкабельная. Отсюда

$$l_{рег} = \frac{A_{б,д} - A_{з\text{ треб}} - 10 \lg N}{\alpha(0,5f_l)}.$$

Так как $A_d > A_b$, длина регенерационного участка при двухкабельной работе больше, чем при однокабельной.

В ряде случаев, например при уплотнении кабелей ГТС, для организации соединительных линий между АТС, для увеличения $l_{рег}$ при однокабельной работе ЦТС рекомендуется размещать регенераторы в шахматном порядке, как это показано на рисунке 3. Здесь переходное затухание можно определить как

$$A_{ш} = A_b + 0,5\alpha(0,5f_l) l_{рег}.$$

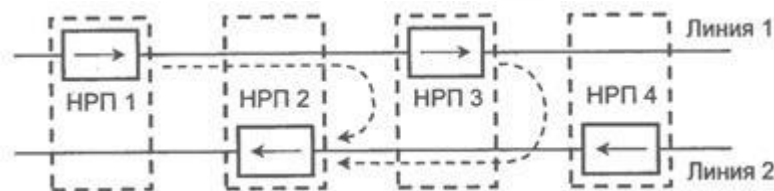


Рисунок 3. Взаимное влияние между ЦТС при шахматном размещении НРП

Оптимальным является размещение регенераторов, работающих в разных направлениях, строго в середине регенерационных участков. Если же регенерационный участок разбит на две неравные части l_1 и l_2 так, что

$$l_1 < l_2, \text{ то } A_{ш} = A_b + \alpha(0,5f_l) l_1.$$

2. Количество влияющих ЦТС относительно мало ($N < 4$). В этом случае помеху можно представить как гармоническое колебание с частотой, близкой к $0,5f_l$ и амплитудой

$$U_{пш} = N U_{пн},$$

где $U_{пш}$ — амплитуда помехи, создаваемой одной ЦТС.

Так как помеха ограничена по напряжению диапазоном $\pm U_{\text{ппг}}$, минимальная защищенность сигналов от помех составит 6 дБ (помеха не должна превышать порога принятия решения). По аналогии с предыдущим, с учетом $A_{3 \text{ треб}} = 6 \text{ дБ}$,

$$l_{\text{рег}} = \frac{A_{\text{б.д}} - A_{3 \text{ треб}} - 20 \lg N}{\alpha(0,5f_t)}$$

Следует особо остановиться на определении длины регенерационных участков, примыкающих к АТС. Как известно, работа узлов АТС, особенно декадно-шаговой системы, создает интенсивные шумы в полосе частот до 2 МГц. Мощность этих помех быстро затухает с удалением от АТС, и можно считать, что наиболее подвержен действию помех прилегающий к АТС регенерационный участок. Поэтому в случае декадно-шаговых АТС дается рекомендация о сокращении вдвое длины прилегающего к ней регенерационного участка. Если при этом еще используется шахматное размещение регенераторов, то укороченным следует делать участок в направлении приема.

2. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

В таблице 1 приведены индивидуальные исходные данные для расчетов по вариантам.

Таблица 1 – Исходные данные по вариантам

<i>№ варианта</i> (последняя цифра студ. билета)	<i>T</i> град	<i>f_t</i> МГц	<i>D_{кус}</i>	<i>U</i> Вольт	<i>N</i>	<i>A_{пзтреб} = A_{зсп}</i> дБ
1	290	1	2	10	9	6
2	295	1,2	3	12	7	7
3	300	1,4	2	14	8	6
4	302	1,6	3	15	9	7
5	304	1,8	4	12	8	8
6	306	2	3	13	7	8
7	285	2,2	2	14	8	7
8	280	1,8	3	15	9	6
9	308	1,2	5	16	9	7
10	310	1	4	10	8	8

4. Контрольные вопросы:

1. Назовите элементы структурной схемы регенерационного участка ЦСП по симметричному кабелю.
2. Назовите основные функции регенератора.
3. От чего зависит затухание регенерационных участков ЦСП по симметричному кабелю?
4. Назовите и поясните конструктивные элементы симметричного электрического кабеля.
5. Назовите и поясните основные электрические параметры симметричного электрического кабеля.
6. Дайте определение абсолютного уровня передачи.
7. От чего зависит длина регенерационного участка с симметричным кабелем?
8. Назовите основные дестабилизирующие факторы, снижающие помехоустойчивость одиночного регенератора.

9. Поясните назначение линейного регенератора (ЛР), основные этапы процесса регенерации.
10. Приведите формулу для коэффициента затухания $\alpha_{\text{макс}}$ регенерационного участка с симметричным кабелем?

5. Литература

1. Е.Б. Алексеев, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев и др. Проектирование и эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. Учебное пособие для вузов/ Под ред. В.Н.Гордиенко и М.С. Тверецкого. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 392 с.: ил.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 5.

Тема: Оценка параметров линейного тракта цифровой ВОЛС

Данное занятие из-за большого объема осваиваемого материала состоит из двух занятий по 4 часа.

1. Цели занятия:

Закрепить знания по структуре линейного тракта волоконно-оптической ЦСП, особенностям используемых линейных кодов. Получить практические навыки расчетов основных показателей регенерационного участка волоконно-оптической ЦСП. Овладеть методикой расчета регенерационного участка волоконно-оптической ЦСП

2. Рекомендации:

Изучить материал в [1] с.108-124.

3. Порядок выполнения работы:

1. Опрос по теоретическому материалу занятия и изучение блока кратких теоретических сведений (с помощью компьютера).
2. Уяснение задачи, методики расчетов и индивидуальных исходных данных, полученных от преподавателя.
3. Рассчитать: помехозащищенности сигнала в точке принятия решения регенератора, минимальную чувствительности фотоприемника на ЛФД, оценить быстродействие волоконно-оптической системы передачи. Составить структурную схему регенерационного участка волоконно-оптической ЦСП и построить диаграмму распределения энергетического потенциала.

Теория

После выбора типа оптического интерфейса и соответствующих ему оптического волокна и кабеля, уровня синхронного транспортного модуля STM-N и его оборудования выполняется *расчет основных показателей линейного тракта проектируемой цифровой ВОЛС*.

К таким показателем относятся:

– *длина регенерационного участка (или элементарного кабельного участка – ЭКУ);*

- *диаграмма уровней и распределение энергетического потенциала по длине регенерационного участка;*
- *мощность основных шумов оптического линейного тракта: дробовых, темновых и собственных;*
- *вероятность ошибки или коэффициент ошибки одиночного регенератора;*
- *быстродействие волоконно-оптической системы передачи;*
- *долговременные и оперативные показатели ошибок цифровых каналов и трактов;*
- *показатели надежности каналов и трактов.*

Основой для расчета показателей линейного тракта цифровой ВОСП являются технические данные оборудования и допустимые нормы на параметры каналов и трактов.

Расчет длины регенерационного участка

Исходными данными для определения длины ЦВОСП являются:

- параметры оптического кабеля: коэффициента затухания α , дБ/км и среднеквадратическое значение дисперсии оптического волокна σ_v , пс/нм·км;
- параметры оборудования STM-N: скорость оптического сигнала B , Мбит/с и тип линейного кода (обычно код NRZ со скремблированием);
- тип источника оптического излучения;
- длина волны источника излучения, λ , нм;
- ширина спектра источника излучения $\Delta\lambda$, нм;
- уровень излучаемой мощности $p_{\text{пер}}$, дБм;
- чувствительность или минимальный уровень приема $p_{\text{пр мин}}$, дБм; минимальный уровень приема гарантирует величину коэффициента ошибок $K_{\text{ош}}$ (или вероятность ошибки $p_{\text{ош}}$) не более, чем указано в технических данных STM-N; если $p_{\text{ош}}$ определяется в процессе проектирования, то она подлежит расчету;
- порог перегрузки приемного устройства или максимальный уровень приема, $p_{\text{пр макс}}$, дБм;
- дополнительные потери или энергетический запас оптического тракта $\Delta\mathcal{E}$, дБ.

Длина регенерационного участка цифровой волоконно-оптической системы передачи (ЦВОСП) зависит от многих факторов, важнейшими из которых являются:

- 1) энергетический потенциал (\mathcal{E}) ЦВОСП, равный

$$\mathcal{E} = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр мин}} = A_{\text{макс}}, \quad (1)$$

где $p_{\text{пер}}$ – абсолютный уровень мощности оптического сигнала (излучения), дБм; $p_{\text{пр мин}}$ – абсолютный уровень мощности оптического сигнала на входе приемного устройства, при котором коэффициент ошибок или вероятность ошибки $p_{\text{ош}}$ одиночного регенератора не превышает заданного значения, дБм. Энергетический потенциал определяет максимально-допустимое затухание $A_{\text{макс}}$ оптического сигнала в оптическом волокне (ОВ), разъёмных и неразъёмных соединениях на регенерационном участке, а также в других узлах ЦВОСП;

2) дисперсия в ОВ, σ_v , пс/нм·км; дисперсионные явления в ОВ приводят к рассеянию во времени спектральных или модовых составляющих сигнала, т.е. к различному времени их распространения, что приводит к изменению формы и длительности оптических импульсных сигналов, к их уширению;

3) помехи, обусловленные тепловыми шумами резисторов, транзисторов полупроводниковых диодов усилителей, шумами источников оптического излучения, шумами из-за отражения оптического излучения от торцевой поверхности ОВ, модовыми шумами из-за интерференции мод, распространяющихся в ОВ и др; этот вид помех интегрально учитывается как собственные шумы;

4) квантовый или фотонный шум, носителем которого является сам оптический сигнал (в силу его малости по сравнению с другими составляющими шумов оптического линейного тракта в курсовой работе его не учитываем и влияние учитывается как влияние дестабилизирующих факторов;

5) коэффициент затухания ОВ α , дБ/км;

6) минимально-детектируемая мощность (МДМ) $P_{\text{МДМ}}$ соответствующая минимальному порогу чувствительности приемного устройства фотоприемника ЦВОСП с заданной вероятностью ошибки; МДМ может быть определена по формуле:

$$P_{\text{МДМ}} = -1,15 \cdot h \cdot f \cdot (\lg p_{\text{ош}}) B / \eta, \quad (2)$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Вт·с/Гц – постоянная Планка; f - частота оптического излучения, Гц; η – квантовая эффективность фотодетектора (см. 3.3.2...3.3.4) (при расчетах следует брать $\eta = 0,75 \dots 0,9$); B - скорость передачи информации, бит/с, равная тактовой частоте линейного сигнала ЦВОСП; заданная вероятность ошибки. Частота оптического излучения известна соотношением:

$$f = C / \lambda. \quad (3)$$

где C - скорость распространения света, равная $3 \cdot 10^{17}$ нм/с; λ – длина волны оптического излучения, нм.

Как правило, при использовании стандартного оборудования линейных трактов ЦВОСП совместно с рекомендуемыми для них оптическими кабелями максимально-допустимая длина регенерационного участка, определенная по энергетическим характеристикам систем (энергетический потенциал, уровни передачи и приема оптического излучения, затухание регенерационного участка), меньше максимальной длины, определяемой дисперсионными характеристиками ОВ. Поэтому при проектировании рекомендуется длину регенерационного участка определять по энергетическим параметрам ЦВОСП.

Для определения длины регенерационного участка составляется его расчетная схема, рисунок 1, где приняты следующие обозначения: ОС-Р – оптический соединитель разъемный (их число на регенерационном участке равно 2); НРП – необслуживаемый регенерационный пункт; ППОМ – приемопередающий оптический модуль, преобразующий оптический сигнал в электрический, восстанавливающий параметры последнего и преобразующий его в оптический); ОС-Н – оптический соединитель неразъемный, число которых на единицу меньше числа строительных длин оптического кабеля, составляющий регенерационный участок; $l_{\text{стр}}$ – строительная длина оптического кабеля, как отмечалось выше, равная 2...4 км; ОВ - оптическое волокно; l_{py} - длина регенерационного участка.

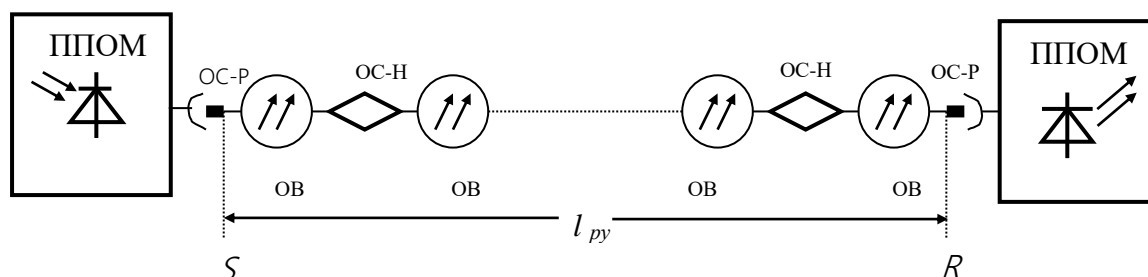


Рисунок 1 – Расчетная схема для определения длины регенерационного

Как следует из рисунка 1 затухание регенерационного участка равно

$$A_{\text{макс}} = \mathcal{E} = 2A_p + q \cdot A_n + \alpha \cdot l_{\text{py}} + A_t + A_v, \text{ дБ}, \quad (4)$$

где A_p – затухание разъемного оптического соединителя (ОС-Р) равное 0,5 дБ; A_n – затухание неразъемного оптического соединителя (ОС-Н); q – число неразъемных соединений; α – коэффициент затухания оптического волокна, дБ/км; l_{py} – длина регенерационного участка; A_t – допуски на температурные изменения параметров ЦВОСП, в том числе и оптического кабеля, для типовых ЦВОСП равные 0,5...1,5 дБ; A_v – допуски на ухудшение параметров элементов ЦВОСП со временем (старение, деградация и т. п.), $A_v = 2...6$ (зависит от типа источника оптического излучения и приемника оптического излучения и их комбинаций). Сумма $A_t + A_v = \Delta \mathcal{E}_3$ – энергетический запас.

Максимальное затухание (или энергетический потенциал \mathcal{E}) регенерационного участка равно

$$A_{\text{макс}} = \mathcal{E} = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр мин}}, \text{ дБм}, \quad (5)$$

где $p_{\text{пер}}$ и $p_{\text{пр мин}}$ значения абсолютных уровней мощности оптического сигнала на выходе передатчика и входе приемника соответственно берутся из паспортных данных STM-N.

Из (4) и (5) получим

$$l_{\text{py}} = \frac{\mathcal{E} - 2A_p - qA_n - \Delta \mathcal{E}_3}{\alpha}.$$

Все величины в (6), кроме q – числа неразъемных оптических соединений, известны. Число q на единицу меньше числа строительных длин оптического кабеля, составляющих регенерационный участок, т. е.

$$q_{\text{стр}} = l_{\text{py}} / l_{\text{стр}}, \quad (7)$$

Подставив значение q в (6) и выполнив несложные преобразования, получим максимальное значение длины регенерационного участка

$$l_{\text{py макс}} = \frac{\mathcal{E} + A_n - 2A_p - \Delta \mathcal{E}_3}{\alpha + A_n / l_{\text{стр}}}, \text{ км}. \quad (8)$$

Приемные устройства ППОМ оснащаются устройствами автоматической регулировки усиления (АРУ) с пределами регулирования $A_{\text{АРУ}}$, определяющих минимальную проектную длину регенерационного участка

$$l_{\text{py макс}} = \frac{\mathcal{E} + A_n - 2A_p - \Delta \mathcal{E}_3 - A_{\text{АРУ}}}{\alpha + A_n / l_{\text{стр}}}, \text{ км}. \quad (9)$$

После определения длины регенерационного участка ЦВОС по методике, изложенной выше, осуществляется размещение НРП и ОРП в соответствии с топологией синхронной сети и проектируемой ВОЛП.

Если в соответствии с местными условиями, особенностями выбранной трассы длина регенерационного участка должна быть меньше расчетной, то на входе ППОМ включают *оптический аттенюатор*.

При проектировании должна также рассчитываться длина регенерационного участка $l_{\text{руд}}$ с *учетом дисперсии*. Эта длина может быть рассчитана по дисперсии σ_n , перекрываемой транспортным модулем и оптического волокна σ_v

$$l_{\text{руд}} = \sigma_{\text{п}} / \sigma_{\text{в}}, \text{ км.} \quad (10)$$

Предложенную методику определения длины регенерационного участка для ЦВОСП рассмотрим на следующем примере.

Пример 1. Требуется определить длину регенерационного участка для ЦВОСП на основе синхронного транспортного модуля типа SMA-4, работающей по кабелю типа ОКЛ-01 на длине волны $\lambda = 1550$ нм. Основные параметры SMA-4 и кабеля ОКЛ-01 необходимые для расчетов приведены в таблице 1.

Затухание одного разъёмного оптического соединителя $A_{\text{р}} = 0,5$ дБ; затухание одного неразъёмного оптического соединителя $A_{\text{н}} = 0,1$ дБ. Допуск на температурные изменения параметров оборудования ЦВОСП $A_{\text{т}} = 0,75$ дБ; допуск на ухудшение параметров ЦВОСП со временем $A_{\text{в}} = 4$ дБ, т. е. энергетический запас $\Delta\mathcal{E}_3 = 4,75$ дБ, квантовая эффективность фотоприёмного устройства ППОМ $\eta = 0,9$.

Таблица 1- Варианты заданий для студентов

№ в а р и а н т а	Параметры	SMA-4 Siemens					ОКЛ-01		
		$P_{\text{пер}},$ дБм	$P_{\text{пр мин}},$ дБм	$A_{\text{ру макс}},$ дБ	$\sigma_{\text{п}},$ пс/нм	$\Delta\lambda,$ нм	$\alpha,$ дБ/км	$\sigma_{\text{в}},$ пс/нм·км	$L_{\text{стр}},$ км
	Параметры для примера	-4	-34	32	2500	0,5	0,22	18	2
1	Значения параметров для вариантов	-5	-33	33	2550	0,5	0,23	17	3
2		-5,5	-32	34	2450	0,5	0,24	19	2
3		-4,5	-34	35	2400	0,5	0,25	16	3
4		-5,5	-35	33	2600	0,5	0,21	19,5	2
5		-3,5	-31	35	2450	0,5	0,20	15	3
6		4	-32	32	2550	0,55	0,21	16,5	2
7		-4,5	-33	32	2450	0,56	0,22	16	3
8		-5,0	-34	33	2560	0,52	0,21	19	3
9		-4	-34	33	2550	0,53	0,22	18	3
10		-3,5	-32	34	2450	0,54	0,20	15,5	3

Решение. Шаг первый. Воспользовавшись формулой (5) и данными таблицы 1 определим максимальное затухание регенерационного участка $A_{\text{макс}}$ или энергетический потенциал \mathcal{E} системы передачи:

$$A_{\text{макс}} = \mathcal{E} = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр мин}} = -4 - (-34) = 30 \text{ дБ.}$$

Шаг второй. Подставив в формулу (8) значения энергетического потенциала $\mathcal{E} = 28$ дБ, потерь в разъёмных соединениях $A_{\text{р}} = 0,5$ дБ, потерь в неразъёмных соединениях $A_{\text{н}} = 0,1$ дБ, значение энергетического запаса $\Delta\mathcal{E}_3 = 4,75$ дБ; коэффициент затухания кабеля $\alpha = 0,22$ дБ/км и значение строительной длины $l_{\text{стр}} = 2$ км, найдем максимально-допустимое значение длины регенерационного участка;

$$l_{\text{ру макс}} = \frac{\mathcal{E} + A_{\text{н}} - 2A_{\text{р}} - \Delta\mathcal{E}_3}{\alpha + A_{\text{н}} / l_{\text{стр}}} = \frac{30 + 0,1 - 2 \cdot 0,5 - 4,75}{0,22 + 0,1 / 2} = 100,27. \text{ км.}$$

Шаг третий. Длина регенерационного участка, ограничиваемая дисперсией оптического волокна, определяется по формуле (10), если в нее подставить значения $\sigma_{\Pi} = 2500$ пс/нм и $\sigma_{\text{в}} = 18$ пс/нм·км, т.е.

$$l_{\text{руд}} = \frac{\sigma_{\Pi}}{\sigma_{\text{в}}} = \frac{2500}{18} = 1387.3. \text{ км}$$

Полученное значение $l_{\text{ру}}$ и $l_{\text{руд}}$ близко к значению оптического интерфейса типа V-4,3 для STM-4. Для размещения регенерационных пунктов выбирается меньшее значение длины регенерационного участка, которая с учетом запасов кабеля, можно взять равной 100 км.

Оценка параметров линейного тракта ЦВОСП

Качество приема оптического излучения определяется распределением энергетического потенциала по длине регенерационного участка, шумами фотодетектора приемного оптического модуля (ПРОМ), вероятностью или коэффициента ошибки одиночного линейного регенератора (ЛР) порога чувствительности и быстродействия ПРОМ.

Расчет распределения энергетического потенциала по длине регенерационного участка.

Уровень оптической мощности, поступающей на вход ПРОМ линейного регенератора, зависит от энергетического потенциала ВОСП, потерь мощности в ОВ, потерь мощности оптического излучения в разъёмных и неразъёмных соединений.

Перед выполнением расчетов рекомендуется составить таблицу с исходными данными для расчета распределения энергетического потенциала по длине регенерационного участка (см. табл.2). Методику расчета распределения энергетического потенциала рассмотрим на следующем примере.

Пример 2. Рассчитать распределение энергетического потенциала по длине регенерационного участка для ЦВОСП, технические параметры которого (см. **Пример 1**) приведены в таблице 2.

Решения. 1. Определяем уровень оптического сигнала после первого разъёмного соединения (РС)

$$p_{\text{р1}} = p_{\text{пер}} - A_{\text{рс}} = -4 - 0,5 = -4,5 \text{ дБм.}$$

2. Находим уровень передачи после первого неразъёмного соединения (НС) станционного оптического кабеля

$$p_{\text{н1}} = p_{\text{р1}} - A_{\text{нс}} = -4,5 - 0,1$$

Таблица 2 - Варианты заданий для студентов.

№№ п/п	Параметры	Обозначения	Ед. изм.	параметры примера	Значения параметров для вариантов									
					Варианты									
					1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Уровень мощности передачи оптического сигнала	$p_{\text{пер}}$	дБм	-4	-5	-5	-4	-4	-6	-5	-6	-7	-4	-5
2	Минимальный уровень мощности приема	$p_{\text{пр}}$	дБм	-34	-33	-35	-33	-34	-33	-33	-35	-36	-35	-34

	оптического излучения													
3	Энергетический потенциал ЦВОСП	Э	дБ	30	28	30	29	30	27	28	29	29	31	29
4	Длина регенерационного участка	l_{py}	км	100	90	95	105	85	90	92	87	88	91	96
5	Строительная длина оптического кабеля	$l_{стр}$	км	2	3	2	3	2	3	2	3	2	3	2
6	Количество строительных длин	$q_{стр}$	–	50	30	33	35	43	30	46	29	44	31	48
7	Количество разъемных соединений	$q_{рс}$	–	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
8	Затухание оптического сигнала на разъемном соединителе	$A_{рс}$	дБ	0,5	0,6	0,7	0,6	0,8	0,7	0,6	0,7	0,6	0,8	0,7
9	Количество неразъемных соединений	$q_{нс}$	–	51	31	34	36	44	31	47	30	45	32	49
10	Затухание оптического сигнала на неразъемном соединителе	$A_{нс}$	дБ	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1
11	Коэффициент затухания оптического кабеля	α	дБ/км	0,22	0,22	0,2	0,24	0,2	0,23	0,2	0,24	0,23	0,25	0,2

3. Далее сигнал проходит по линейному оптическому кабелю строительной длины $l_{стр} = 2$ км и с коэффициентом затухания $\alpha = 0,22$ дБ/км. Уровень сигнала на входе второго НС будет равен

$$p_{н2вх} = p_{н1} - \alpha \cdot l_{стр} = -4,6 - 0,22 \cdot 2 = -5,04 \text{ дБм}$$

Выполняя аналогичные расчеты для всех составляющих регенерационного участка, получим, что уровень сигнала после 50-ой строительной длины, 51-го НС на входе 2-го РС будет равен: $p_{н51} = -31,6$ дБм.

Уровень приема, т.е. уровень оптического излучения на выходе второго РС равен

$$p_{пр} = p_{н2} - A_{рс} = -31,6 - 0,5 = -32,1 \text{ дБм.}$$

Следовательно, общее затухание регенерационного участка равно

$$A_{py} = p_{пер} - p_{пр} = -4 - (-32,1) = 28,1 \text{ дБ,}$$

что почти соответствует SMA-4.

По результатам расчета можно сделать вывод, что затухание регенерационного участка меньше энергетического потенциала ЦВОСП, равного $\mathcal{E} = 30$, дБ. Следовательно, принятый при расчете длины регенерационного участка эксплуатационный запас $\Delta \mathcal{E}_3$ можно принять.

Результаты расчета распределения энергетического потенциала можно представить в виде таблицы или в форме диаграммы, рисунок 2, где приняты такие обозначения: ППМ – приемо-передающий модуль; РС – разъемное соединение; НС – неразъемное (сварное) соединение; ОВ – оптическое волокно.

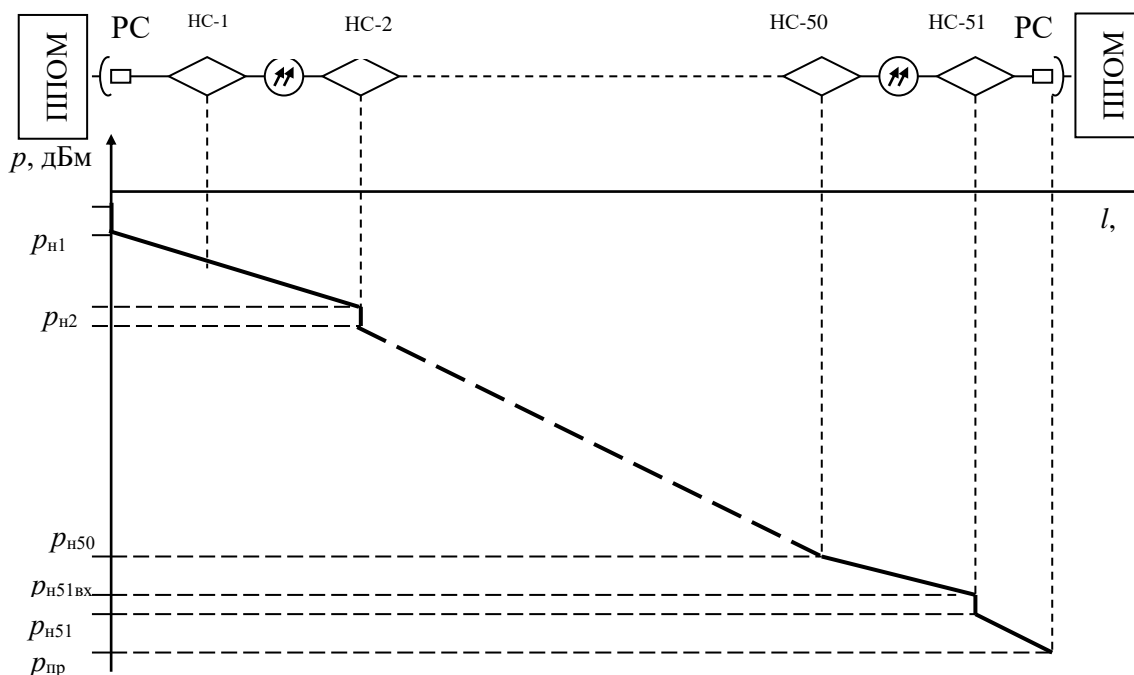


Рисунок 2 – Диаграмма распределения энергетического потенциала

Поскольку все уровни передачи диаграммы распределения энергетического потенциала рассчитаны, то ее изображение возможно в условном масштабе, но обязательно с указанием характерных основных точек диаграммы.

Диаграмма распределения энергетического потенциала служит основой для расчета основных параметров оптического линейного тракта: различного вида шумов, вероятности ошибки одиночного регенератора, быстродействия ЦВОС и порога чувствительности ($P_{\text{мдм}}$) линейного регенератора.

РАСЧЕТ ШУМОВ РЕГЕНЕРАЦИОННОГО УЧАСТКА

Качество приема оптического излучения определяется шумами фотодетектора ПРОМ, основными из которых являются: *дробовые шумы*, *шумы темновых токов* и *собственные шумы*. Шумы определяются для одного регенерационного участка (как правило, *самого длинного*, если регенерационные пункты размещены по тракту неравномерно).

Для рассчитанной длины регенерационного участка рассчитываются различные составляющие шумов оптического линейного тракта. Основные этапы расчета шумов рассмотрим на примере.

Пример3 . Для условий задачи выше рассмотренных примеров определить шумы фотодетектора ПРОМ (ППОМ) регенерационного участка.

Порядок решения. 1. Определим мощность оптического излучения на выходе передающего оптического модуля – ПОМ или ППОМ (точка S, рис. 1) по формуле

$$P_{\text{пер}} = 10^{0,1 p_{\text{пер}}}, \text{ мВт}, \quad (11)$$

где $p_{\text{пер}}$ – уровень передачи оптического излучения (берется из технических данных ЦВОСП). Подставив в (11) значение $p_{\text{пер}} = -4$ дБм (табл. 2), получим:

$$P_{пер} = 10^{0,1P_{пер}} = 10^{0,1(-4)} = 0,4 \text{ мВт}$$

2. Для регенерационного участка с затуханием $A_{py} = 28,1$ дБ абсолютный уровень приема $P_{пр}$ на входе ПРОМ (ППОМ), т. е. в точке R равен

$$P_{пр} = P_{пер} - A_{py} = -4 - 28,1 = -32,1 \text{ дБм}.$$

3. Определим мощность оптического излучения на входе ПРОМ или приемо-передающего модуля (ППОМ) линейного регенератора (точка S .) по формуле

$$P_{пер} = 10^{0,1P_{пр}}, \text{ мВт} \quad (12)$$

Подставив в (12) значение $P_{пр}$, получим

$$P_{пр} = 10^{0,1P_{пр}} = 10^{0,1(-32,1)} = 0,6 \text{ мкВт или } 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ мВт}.$$

Поскольку электрический сигнал на выходе фотодетектора ПРОМ (ППОМ) является случайной величиной, то его значение оценивается *среднеквадратическим* значением фототока, величина которого определяется по формуле:

$$\overline{I_c^2} = 0,5 \cdot (0,8 \cdot \eta \cdot \lambda \cdot P_{пр})^2 \cdot M^2, \quad (13)$$

где $\eta = 0,8 \dots 0,9$ – квантовая эффективность фотодиода; λ – длина волны оптического излучения, мкм, которая определяется типом оптического кабеля; $P_{пр}$ – мощность оптического излучения на входе ПРОМ (или ППОМ), Вт, определенная выше; M – коэффициент умножения лавинного фотодиода (ЛФД); для р-і-п фотодиода $M = 1$.

4. По формуле (13) для нашего примера определим среднеквадратическое значение полезного сигнала, подставив в нее значения $P_{пр} = 0,6 \cdot 10^{-6}$ Вт и положив в ней $\eta = 0,9$ (см. выше) и $\lambda = 1,55$ мкм; фотодетектор выполнен на основе ЛФД с коэффициентом умножения равным $M = 100$

$$\overline{I_c^2} = 0,5 \cdot (0,8 \cdot \eta \cdot \lambda \cdot P_{пр})^2 \cdot M^2 = 0,5 \cdot (0,8 \cdot 0,9 \cdot 1,55 \cdot 0,6 \cdot 10^{-6})^2 \cdot 100^2 = 22,4 \cdot 10^{-10} \text{ А}^2.$$

Основными шумами на выходе фотодетектора ПРОМ (ППОМ) являются следующие виды шумов.

Дробовые шумы, которые оцениваются среднеквадратическим значением вида

$$\overline{I_{др}^2} = 2 \cdot e \cdot (0,8 \cdot \eta \cdot \lambda \cdot P_{пр})^2 \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B = 4 \cdot e \cdot \overline{I_c^2} \cdot F(M) \cdot B, \quad (14)$$

где, к уже принятым обозначениям, добавились новые: $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ – заряд электрона, Кл (кулон); B – скорость передачи, бит/с; $F(M)$ – коэффициент шума лавинного умножения, учитывающий увеличение дробовых шумов лавинного фотодиода (ЛФД) из-за нерегулярного характера процесса умножения; для большинства ЛФД с достаточной точностью для практических расчетов $F(M)$ по формуле.

$$F(M) = M^x, \quad 0,4 \leq x \leq 1, \quad (15)$$

значения M и x определяются материалом, из которого выполнен ЛФД; для р-і-п – величина $F(M) = 1$.

5. Для рассматриваемого примера определим величину коэффициента шума ЛФД, подставив в (15) значения $M = 100$ и $x = 0,8$, получим

$$F(M) = M^x = 100^{0,8} = 39,8.$$

6. Подставив в (14) значения $\overline{I_c^2} = 22,4 \cdot 10^{-10} \text{ А}^2$, $F(M) = 39,8$, величину заряда электрона e и $B = 622,08 \cdot 10^6$ бит/с (для примера), определим величину дробовых шумов

$$\overline{I_{др}^2} = 4 \cdot e \cdot \overline{I_c^2} \cdot F(M) \cdot B = 4 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 22,4 \cdot 10^{-10} \cdot 622,08 \cdot 10^6 = 0,89 \cdot 10^{-18} \text{ А}^2.$$

Темновые шумы, возникающие независимо от внешнего оптического сигнала из-за случайной тепловой генерации носителей под воздействием *фонового* излучения, несвязанного с полезным сигналом, среднеквадратическое значение которого равно

$$I_T^2 = 2 \cdot e \cdot I_T \cdot F(M) \cdot M^2 \cdot B, \quad (16)$$

где I_T – среднее значение темнового тока, величина которого для германиевых фотодиодов равна $(1 \dots 8) \cdot 10^{-7}$ А, а для кремниевых – $(1 \dots 8) \cdot 10^{-8}$ А.

7. Подставив в (16) значения заряда электрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ К, величину темнового тока $I_T = 5 \cdot 10^{-7}$ (германиевый фотодиод), $M = 100$, $F(M) = 39,8$ и скорость цифрового потока $B = 622,08 \cdot 10^6$ бит/с, получим

$$I_T^2 = 2 \cdot e \cdot I_T \cdot F(M) \cdot M^2 \cdot B = 2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 100^2 \cdot 622,08 \cdot 10^6 = 99,5 \cdot 10^{-14} \text{ А}^2.$$

Собственные шумы электронных схем ПРОМ или ППМ, обусловленные хаотическим тепловым движением электронов, атомов и молекул в резисторах, полупроводниках и других радиоэлементах, среднеквадратическое значение которых равно

$$\bar{I}_{\text{сш}}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot F_{\text{ш}} \cdot B / R_{\text{вх}}, \quad (17)$$

где $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – постоянная Больцмана; T – температура по шкале Кельвина; $F_{\text{ш}}$ и $R_{\text{вх}} = 1 \dots 5$ МОм – коэффициент шума и входное сопротивление предварительного усилителя ПРОМ или ППОМ соответственно.

8. Для рассматриваемого примера величину собственных шумов определим, подставив в (17) значения $T = 300^\circ\text{К}$, $F_{\text{ш}} = 8$, $B = 622,08$ Мбит/с и $R = 10^6$ Ом:

$$\bar{I}_{\text{сш}}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot F_{\text{ш}} \cdot B / R_{\text{вх}} = 4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 622,08 \cdot 10^6 / 10^6 \approx 15,3 \cdot 10^{-15} \text{ А}^2.$$

Сравнивая величины дробовых, темновых и собственных шумов, видим, что основными являются **темновые** шумы.

Среднеквадратическое значение токов суммарных шумов будет равно:

$$\bar{I}_{\text{ш}}^2 = \bar{I}_{\text{сш}}^2 + \bar{I}_T^2 + \bar{I}_{\text{др}}^2. \quad (18)$$

9. Для нашего примера среднеквадратическое значение токов суммарных шумов получим, подставив в (18) значение соответствующих слагаемых

$$\bar{I}_{\text{ш}}^2 = \bar{I}_{\text{сш}}^2 + \bar{I}_T^2 + \bar{I}_{\text{др}}^2 = 15,3 \cdot 10^{-15} + 99,5 \cdot 10^{-14} + 0,89 \cdot 10^{-18} \approx 101 \cdot 10^{-14} \text{ А}^2.$$

На этом расчет основных шумов одиночного линейного регенератора или регенерационного усилителя завершается, и переходят к расчету вероятности или коэффициента ошибки одиночного регенератора.

РАСЧЕТ ВЕРОЯТНОСТИ ИЛИ КОЭФФИЦИЕНТА ОШИБКИ ОДИНОЧНОГО РЕГЕНЕРАТОРА

Определение вероятности или коэффициента ошибки одиночного регенератора распадается на две части:

1) расчет *допустимой вероятности ошибки* $p_{\text{ош доп}}$, приходящаяся на один регенерационный участок исходя из норм на различные участки первичной сети: магистральной, внутризонавой и местной;

2) расчет *ожидаемой вероятности ошибки* $p_{\text{ож}}$, зависящей от величины защищенности от суммарных шумов регенерационного участка.

Расчет допустимой вероятности ошибки

Допустимая вероятность ошибки одиночного регенератора определяется по формуле

$$p_{\text{ош доп}} = p_{\text{ош1}} \cdot l_{\text{ру}}, \quad (19)$$

где $p_{\text{ош1}}$ – нормированная вероятность ошибки, приходящаяся на 1 км километр линейного тракта, значения которой для различных участков первичной сети приведены в табл. 3; l_{py} – длина регенерационного участка, км.

Таблица 3 – Вероятности ошибок

Участок первичной сети	Магистральный	Внутризоновый	Местный
$p_{\text{ош1}}, 1/\text{км}$	10^{-11}	$1,67 \cdot 10^{-10}$	10^{-9}

Если длина регенерационного участка равна l_{py} , то общая допустимая вероятность ошибки одиночного регенератора (одного регенерационного участка) равна:

$$p_{\text{доп}} = p_{\text{ош1}} \cdot l_{\text{py}} \quad (20)$$

Пример. 4 Рассчитать допустимую вероятность ошибки одиночного регенератора для ЦВОСП *внутризоновой первичной сети*, длина регенерационного участка которой равна $l_{\text{py}} = 99$ км.

Таблица 4 - Варианты заданий для студентов

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
l_{py}	90	92	95	85	87	97	80	82	94	98

Решение. Подставив в (20) значения $p_{\text{ош1}} = 1,67 \cdot 10^{-10}$ (см. табл.3) и $l_{\text{py}} = 99$ км, получим *допустимую вероятность ошибки* одиночного регенератора

$$p_{\text{ош доп}} = p_{\text{ош1}} \cdot l_{\text{py}} = 1,67 \cdot 10^{-10} \cdot 99 = 1,65 \cdot 10^{-8}.$$

Допустимой вероятности ошибки одиночного регенератора соответствует допустимая защищенность $A_{\text{з доп}}$, которая определяется по формуле

$$A_{\text{з доп}} = 4,58 + 11,42 \lg(-\lg p_{\text{ош}}). \quad (21)$$

Для оценки соответствия вероятности ошибки нормам необходимо определить *ожидаемую вероятность ошибки* – $p_{\text{ож}}$ и сравнить ее с допустимой. При правильно выбранных проектных решениях должно выполняться условие

$$p_{\text{ож}} \leq p_{\text{доп}}. \quad (22)$$

Расчет ожидаемой вероятности ошибки одиночного регенератора

Ожидаемая вероятность ошибки определяется *ожидаемой защищенностью* от шумов оптического линейного тракта, которая равна.

$$A_{\text{з ож}} = 10 \lg(I_{\text{с}}^2 / I_{\text{ш}}^2), \quad (23)$$

где $I_{\text{с}}^2$ и $I_{\text{ш}}^2$ среднеквадратические значения фототоков полезного сигнала и суммарных шумов на выходе ПРОМ или ППОМ соответственно, определенных ранее.

Ожидаемая вероятность ошибки одиночного регенератора $p_{\text{ож1}}$ может быть получена из данных таблицы 5 соответствующим *интерполированием*.

Таблица 5 - Вероятность ошибки в зависимости от защищенности

$A_{з\text{ доп, дБ}}$	18.8	19.7	20.5	21.1	21.7	22.2	22.6	23.0	23.4	23.7
$p_{\text{ош}}$	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}	10^{-13}	10^{-14}

Пример 5. Определить ожидаемую вероятность ошибки одиночного регенератора для результатов **Примера 3**, т.е. $I_c^2 = 22,4 \cdot 10^{-10} \text{ А}^2$ и $I_{ш}^2 = 99,5 \cdot 10^{-14} \text{ А}^2$.

Решение. Подставив в формулу (23) значения токов I_c^2 и $I_{ш}^2$ получим

$$A_{з\text{ ож}} = 10 \lg (I_c^2 / I_{ш}^2) = 10 \lg (22,4 \cdot 10^{-10} / 99,5 \cdot 10^{-14}) = 33,5 \text{ дБ.}$$

Ожидаемой защищенности, как следует из табл. 4, соответствует вероятность ошибке менее 10^{-14} , что значительно ниже допустимого значения.

РАСЧЕТ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Быстродействие ЦВОСП определяется инертностью элементов ПРОМ или ППОМ и дисперсионными свойствами оптического волокна.

Расчет быстродействия сводится к определению допустимого быстродействия и ожидаемого быстродействия и их сравнения.

Допустимое быстродействие ЦВОСП зависит от характера передаваемого сигнала, скорости передачи линейного цифрового сигнала и равно:

$$t_{\text{доп}} = \beta / B, \text{ нс,} \quad (24)$$

где β – коэффициент, учитывающий характер линейного цифрового сигнала (линейный код) и равный 0,7 для кода NRZ и 0,35 для всех других; B – скорость передачи линейного цифрового сигнала.

Ожидаемое быстродействие ЦВОСП (как совокупности волоконно-оптической системы передачи и оптического кабеля) равно

$$t_{\text{ож}} = \sqrt{t_{\text{пер}}^2 + t_{\text{пр}}^2 + t_{\text{ов}}^2}, \text{ нс,} \quad (25)$$

здесь $t_{\text{пер}}$ – быстродействие передающего оптического модуля (ПОМ), зависящее от скорости передачи линейного цифрового сигнала и типа источника излучения; $t_{\text{пр}}$ – быстродействие ПРОМ или ППОМ, определяемое скоростью передачи линейного цифрового сигнала и типом фотодетектора; $t_{\text{ов}}$ – уширение импульса оптического излучения импульса при его прохождении по оптическому волокну оптического кабеля регенерационного участка, которое равно

$$t_{\text{ов}} = t_{\text{ов}} \cdot l_{\text{ру}}, \text{ нс,} \quad (26)$$

где $t_{\text{ов}}$ – удельное уширение импульса при его передачи по оптическому волокну (ОВ), определяемая по формуле

$$t_{\text{ов}} = 10^{-3} \cdot \Delta\lambda \cdot \sigma_{\text{б}}, \text{ нс} \quad (27)$$

здесь, $\Delta\lambda$ – ширина спектра излучения, равная 24...40 нм для светоизлучающих диодов и 0,2...5 нм для полупроводниковых лазерных диодов на уровне – 20 дБ; $\sigma_{\text{б}}$ – дисперсия ОВ, пс/нм·км

Быстродействие ПОМ и ПРОМ (ППОМ) для типовых скоростей передачи приведены в таблице 6.

Таблица 6 - Быстродействие ПОМ и ПРОМ (ППОМ) для типовых скоростей передачи

Быстродействие ПОМ или ПРОМ	Скорость передачи цифрового потока, Мбит/с						
	8	34	140	565	155	622	2500
$t_{\text{пер}}, \text{нс}$	5	3	0,5	0,15	1	0,1	0,05
$t_{\text{пр}}, \text{нс}$	4	2,5	0,4	0,1	0,8	0,08	0,04

Если $t_{\text{ож}} < t_{\text{доп}}$, то выбор типа кабеля и длины регенерационного участка выполнены верно. Величина $t_{\text{доп}} - t_{\text{ож}} = \Delta t$ – *запас по быстродействию*. При достаточно большом его значении можно ослабить требования к компонентам ВОЛП. Если условие $t_{\text{ож}} > t_{\text{доп}}$ не выполняется, то следует выбрать ПОМ, ПРОМ (ППОМ) и ОК с другими параметрами.

Пример 6. Определить быстродействие ЦВОСП на основе STM-4 (SMA-4 Siemens), если длина регенерационного участка которой равна $l_{\text{ру}} = 99$ км. Скорость передачи информационного потока $B = 622,08$ Мбит/с, линейный код типа NRZ., ширина полосы оптического излучения $\Delta\lambda = \Delta\lambda_{20}/6,07 = 1/6,07 = 0,165$ нм, дисперсия ОВ равна $\sigma_{\text{в}} = 18$ пс/нм·км.

Таблица 7- Варианты заданий для студентов

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$l_{\text{ру}}, \text{км}$	90	92	95	85	87	97	80	82	94	98
$B, \text{Мбит/с}$	622	650	670	610	690	645	630	665	680	655
$\Delta\lambda_{20} \text{ нм}$	1,2	1,1	1,15	1,2	1,25	1,3	1,35	1,4	1,45	1,5
$\sigma_{\text{в}}$ пс/нм·км.	15	16	17	18	18	17	19	15	16	19

Решение. Данные брать из таблицы 7.

1. По формуле (27) определим удельное уширение импульса при его прохождении по ОВ $t_{\text{ов}}$

$$t_{\text{ов}} = 10^{-3} \cdot \Delta\lambda \cdot \sigma_{\text{в}} = 10^{-3} \cdot 0,165 \cdot 18 = 2,97 \cdot 10^{-3} \text{ нс/км.}$$

2. По формуле (24) найдем значение допустимого быстродействия $t_{\text{доп}}$, положив в ней $\beta = 0,7$, так как используется код типа NRZ, и $B = 622,08$ Мбит/с:

$$t_{\text{доп}} = \beta / B = 0,7 / 622,08 \cdot 10^6 = 1,125 \text{ нс.}$$

3. Подставив в формулу (26) значения $t_{\text{ов}} = 18 \cdot 10^{-3}$ нс/км и $l_{\text{ру}} = 99$ км, найдем величину уширения импульса при его прохождении по длине регенерационного участка

$$t_{\text{ов}} = \sigma_{\text{ов}} \cdot l_{\text{ру}} = 2,97 \cdot 10^{-3} \cdot 99 = 0,294 \text{ нс.}$$

4. По формуле (25) найдем ожидаемую величину быстродействия $t_{\text{ож}}$, подставив в нее значения $t_{\text{пер}} = 0,05$ нс и $t_{\text{пр}} = 0,04$ нс, и $t_{\text{ов}} = 1,728$ нс, получим

$$t_{\text{ож}} = \sqrt{t_{\text{пер}}^2 + t_{\text{пр}}^2 + t_{\text{ов}}^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,04^2 + 0,294^2} = 0,3 \text{ нс.}$$

Сравнение полученных значений показывает, что условие $t_{\text{ож}} < t_{\text{доп}}$ выполняется и, следовательно, основные параметры ВОЛП и ее компонентов сделаны правильно.

Расчет порога чувствительности ПРОМ

Одной из основных характеристик ПРОМ является его *чувствительность*, т. е. минимальная детектируемая мощность (МДМ) оптического сигнала длительностью $\tau = 1/B$, устойчиво обнаруживаемая фотодетектором ПРОМ.

С достаточной степенью точности величина уровня МДМ $p_{\text{МДМ}}$ может быть определена по формулам:

$$p_{\text{МДМ}} = \begin{cases} -55 + 11 \lg B, & \text{если } B \leq 50 \text{ Мбит/с} \\ -55 + 10 \lg B, & \text{если } B > 50 \text{ Мбит/с} \end{cases} \quad (28)$$

для р-і-п фотодиодов и

$$p_{\text{МДМ}} = \begin{cases} -70 + 10,5 \lg B, & \text{если } B \leq 50 \text{ Мбит/с} \\ -70 + 10 \lg B, & \text{если } B > 50 \text{ Мбит/с} \end{cases} \quad (29)$$

Зная абсолютный уровень МДМ $p_{\text{МДМ}}$ и уровень передачи ПОМ (или ППОМ), можно получить приближенную оценку максимального энергетического потенциала ВОСП:

$$\mathcal{E}_{\text{макс}} = p_{\text{пер}} - p_{\text{мин}}, \text{ дБ.} \quad (30)$$

Расчет производить для данных своего варианта и с учетом таблицы 8.

Таблица 8 - Варианты заданий для студентов

№ вар.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$p_{\text{пер}}$, дБ	-5	-6	-4	-3	-2	-2,5	-3,5	-5,5	-4,5	-4

Пример 7. Определить уровень МДМ $p_{\text{МДМ}}$ и максимальный энергетический потенциал для ЦВОСП со скоростью передачи линейного цифрового сигнала равной $B = 622,08$ Мбит/с и уровнем передачи равным $p_{\text{пер}} = -4$ дБ. Фотодетектор реализован на основе ЛФД.

Решение. Подставив $B = 622,08$ Мбит/с в соответствующую форму (29) получим $p_{\text{МДМ}} = -70 + 10,5 \lg B = -70 + 10,5 \cdot \lg(622,08) = -29,3$ дБм.

Приближенное значение максимального энергетического потенциала будет равно согласно (5):

$$\mathcal{E}_{\text{макс}} = p_{\text{пер}} - p_{\text{мин}} = -4 - (-29,3) = 33,3 \text{ дБ.}$$

Отметим, что полученные значения $p_{\text{МДМ}}$ и $\mathcal{E}_{\text{макс}}$ соответствуют типу выбранного STM.

Расчеты долговременных и оперативных показателей ошибок цифровых каналов и трактов выполняются согласно рекомендациям «**Нормам** на электрические параметры цифровых каналов и трактов магистральных и внутризональных первичных сетей, введенным в действие приказом Минсвязи России от 10.08.96 г. №92».

Расчеты показателей надежности каналов и трактов сводятся к определению ожидаемых *коэффициента готовности* и *коэффициента* по показателям интенсивности и потока отказов и восстановления оборудования цифровых телекоммуникационных систем и сравнения их с допустимыми.

Контрольные вопросы:

1. Назовите основные элементы структурной схемы регенерационного участка волоконно-оптической ЦСП.
2. Поясните понятие дисперсии в оптоволокне.
3. Как дисперсионные явления проявляются в волоконном световоде?
4. Объясните природу возникновения модовой дисперсии.
5. Почему в градиентных многомодовых световодах модовая дисперсия практически отсутствует?
6. Объясните природу появления материальной дисперсии.
7. Что такое волноводная дисперсия?
8. Как зависит уширение импульса от длины световодной линии?
9. Как зависит пропускная способность волоконных световодов от уширения импульсов?
10. Объясните природу возникновения межсимвольной интерференции.
11. Поясните характерные точки диаграммы распределения энергетического потенциала.
12. Поясните, что такое строительная длина оптического кабеля.
13. Поясните, что такое затухание оптического сигнала на неразъемном соединителе и назовите порядок его величины.
14. Поясните, что такое коэффициент затухания оптического кабеля.
15. Поясните, что такое затухание оптического сигнала на разъемном соединителе и назовите порядок его величины.
16. Приведите и поясните формулу мощности оптического излучения на выходе передающего оптического модуля (ПОМ).
17. Приведите и поясните формулу мощности оптического излучения на входе ПРОМ.
18. Перечислите и поясните основные шумы на выходе фотодетектора ПРОМ.
19. Приведите и поясните формулу для допустимой вероятности ошибки одиночного регенератора.
20. Приведите и поясните формулу для допустимого быстродействия цифровых ВОЛП.
21. Приведите и поясните формулу для ожидаемого быстродействия ВОЛП.

Литература.

1. Е.Б. Алексеев, В.Н. Гордиенко, В.В. Крухмалев и др. Проектирование и эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей. Учебное пособие для вузов/ Под ред. В.Н.Гордиенко и М.С. Тверецкого. – М.: Горячая линия – Телеком, 2012. – 392 с.: ил.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ 6.

Тема: Определение объемов цифровых потоков в сети

1. Цели занятия:

Закрепить знания по структуре мультисервисной сети и линейного тракта ВОСП технологии SDH. Получить практические навыки расчетов объемов цифровых потоков в сети SDH. Овладеть методикой расчетов

объёмов цифровых потоков в мультисервисной сети SDH.

2. Рекомендации:

Изучить материал в [1] с. 6-10.

3. Порядок выполнения работы:

1. Опрос по теоретическому материалу занятия и изучение блока кратких теоретических сведений (с помощью компьютера).
2. Уяснение задачи, методики расчетов и индивидуальных исходных данных, полученных от преподавателя.
3. Рассчитать: матрицу расстояний, матрицу тяготений, объёмы цифровых потоков между узлами, числа трибутарных потоков между узлами сети. Построить матрицу расстояний и матрицу тяготений.

Исходные данные

1. Структура сети

Первичная сеть является частью классической структуры сетей с коммутацией пакетов, в которых имеются четко выраженные составляющие: сети абонентского доступа (САД), первичная сеть (ПС) и вторичная сеть (ВС) (рисунок 1).

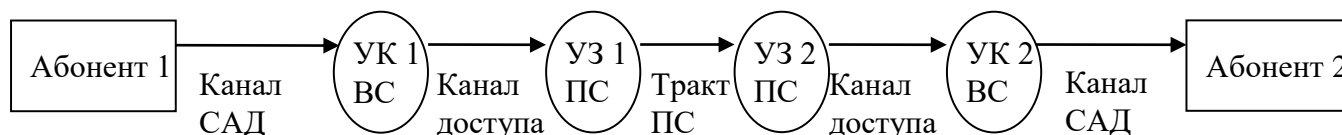


Рисунок 1. Обобщенная структура мультисервисной сети

Обозначения на рисунках:

- УК1....УК5 - узлы коммутации;
- MBV – мультиплексоры ввода вывода.

Основой любой реальной сети связи является уровень неспециализированной (универсальной) первичной сети, представляющей собой совокупность узлов и соединяющих их типовых физических цепей, типовых каналов передачи и сетевых трактов.

Современные городские и территориальные опорные сети строятся почти исключительно на базе оконечных мультиплексоров (ОМ) и мультиплексоров ввода/вывода (МВВ) и соединяющих их волоконно-оптических линий связи (ВОЛС).

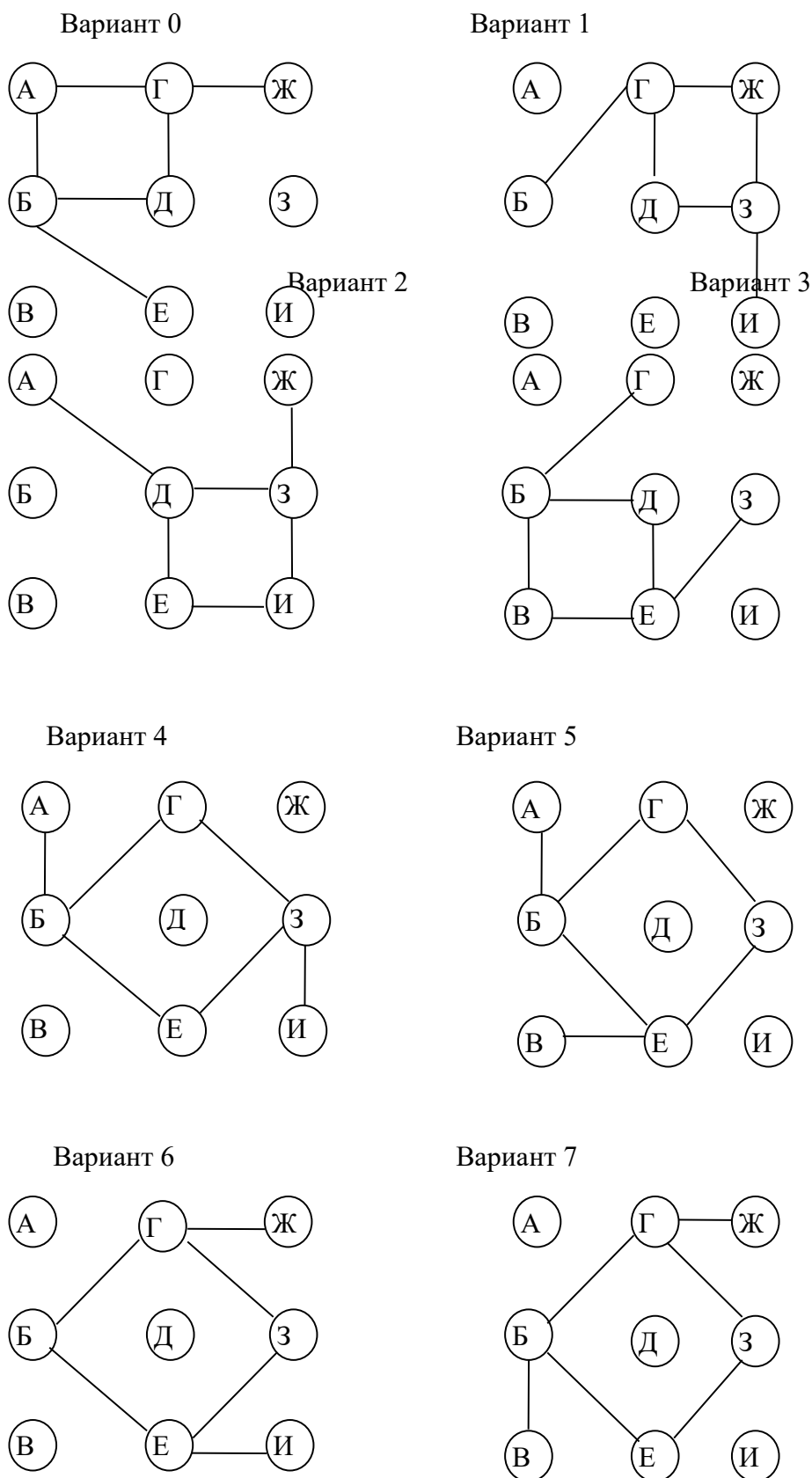
Для передачи применяется технология SDH с использованием стандартных транспортных модулей STM-1, STM-4, STM-16, STM-64 и STM-256 (скорости соответственно 155 Мбит/с, 622 Мбит/с, 2,5 Гбит/с, 10 Гбит/с и 40 Гбит/с). В городских структурах поверх технологии SDH успешно реализуется технология Ethernet на скоростях 1 Гбит/с и 10 Гбит/с.

Упомянутая выше универсальность ПС состоит в том, что для нее безразличен тип передаваемого трафика. ПС выполняет заказ (как правило, в виде аренды) на предоставление определенной полосы пропускания для пропуска цифрового потока. При этом основными

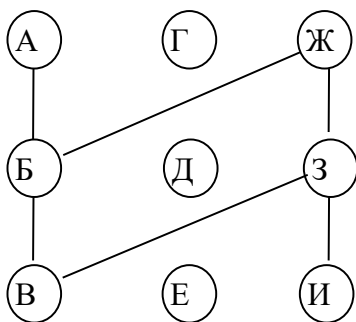
договорными параметрами являются каналные скорости передачи данных (от 2 Мбит/с и выше) и допустимая вероятность ошибок в битах – Bit Error Rate – BER = $10^{-9} \div 10^{-12}$.

Исходные данные для настоящего практического занятия формируются следующим образом:

а) В соответствии с *последней цифрой шифра* по рисунку 2 выбирается 6-узловой фрагмент, для которого производится весь последующий расчёт.



Вариант 8



Вариант 9

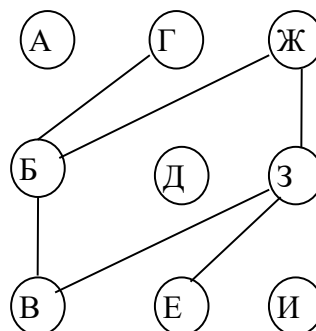


Рисунок 2 - Варианты конфигураций первичной сети

б) Расстояния между узлами конкретного варианта определяются в соответствии с таблицей 1. Расстояния указаны в километрах. Так как полная матрица расстояний симметрична относительно главной диагонали, то в таблице 1 приведена только правая верхняя часть.

Таблица 1

Узлы	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И
А		90	—	100	130	—	—	—	—
Б	—		80	110	70	120	180	—	—
В	—	—		—	—	80		170	—
Г	—	—	—		65	—	70	110	—
Д	—	—	—	—		85	—	75	—
Е	—	—	—	—	—		—	130	95
Ж	—	—	—	—	—	—		55	—
З	—	—	—	—	—	—	—		70
И	—	—	—	—	—	—	—	—	

Пример: Для варианта 00 задействованы узлы А, Б, Г, Д, Ж, Е. Отсутствуют узлы В,И,З. Формирование матрицы расстояний осуществляется из таблицы 2 путем удаления столбцов и строк, соответствующих отсутствующим узлам. Полученная в результате этой операции матрица представлена таблицей 2.

Таблица 2

Узлы	А	Б	Г	Д	Е	Ж
А		90	100	130	—	—
Б	—		110	70	120	180
Г	—	—		65	—	70
Д	—	—	—		85	—
Е	—	—	—	—		—
Ж	—	—	—	—	—	

2. Определение объемов цифровых потоков

Объемы цифровых потоков между узлами определяются из таблицы 3 путём удаления лишних строк и столбцов, т.е. тех строк и столбцов, которые соответствуют отсутствующим в

данном варианте узлов. Например, для варианта 0 из табл. 3 должны быть удалены строки и столбцы узлов В, З, И. После этого все значения потоков Е1 полученной матрицы тяготений шестого порядка умножаются на коэффициент, выбираемый из таблицы 4 в соответствии с предпоследней цифрой шифра. Получаемые при этом дробные значения чисел цифровых потоков Е1, округляются до ближайших целых в большую сторону. Затем все значения потоков Е3 в 1-й строке полученной матрицы тяготений увеличиваются на число, соответствующее последней цифре текущего года (по времени выполнения практического занятия).

В общем случае, матрица тяготений асимметрична. Однако, поскольку целью данного занятия является, в первую очередь, расчёт первичной сети, то представленная в таблице 3 матрица тяготений для упрощения сформирована в симметричном варианте.

Матрица тяготений (табл. 3) формируется после учёта всех требований. Значения потоков в таблице 3 означают числа потоков Е1/Е3/Е4. Например, от узла А к узлу Б необходимо организовать 45 потоков Е1, 10 потоков Е3 и 3 потока Е4.

Таблица 3

Узлы	А	Б	В	Г	Д	Е	Ж	З	И
А		45	50	15	60	65	10	50	40
		10	20	8	16	14	4	10	20
		3	2	1	3	2	1	2	1
Б			70	65	10	55	50	40	45
			20	18	6	14	12	10	10
			2	3	1	2	1	3	2
В				10	55	60	6	70	50
				4	12	14	3	15	18
				1	2	3	1	2	3
Г					60	65	7	50	5
					10	12	4	18	2
					3	2	1	2	1
Д						40	25	50	10
						15	7	19	4
						2	1	1	2
Е							5	50	65
							2	14	12
							1	2	3
Ж								45	7
								16	5
								3	1
З									40
									13
									2
И									

В качестве входящих в мультиплексоры трибутарных потоков могут использоваться не только потоки PDH (т.е. Е1, Е3 и Е4), но и потоки SDH.

Таблица 4 - Коэффициент увеличения нагрузки

Вариант (предпоследняя цифра шифра)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Коэффициент	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7	1.8	1.9	2

Таким образом, в результате выполнения раздела 1 должна быть определена матрица тяготений 6-и узловой сети, элементами которой являются числа трибутарных потоков $(n_1, n_3, n_4)_{ij}$ между узлами i и j , т.е. потоков Е1, Е3 и Е4 соответственно.

3. Пример определения матрицы тяготений

Рассмотрим вариант 00, т.е. вариант, в котором последняя и предпоследняя цифры шифра равны нулю.

Конфигурация сети, выбранная по рисунку 2 для варианта 0, включает 6 узлов: А, Б, Г, Д, Е и Ж. В соответствии с этим таблицу 3 преобразуем в таблицу 5, исключив из неё строки и столбцы, соответствующие отсутствующим узлам В, З и И. Удаление строк и столбцов выполняется обычными операциями над таблицей 3.

Таблица 5.

Узлы						
	А	Б	Г	Д	Е	Ж
А		45	15	60	65	10
		10	8	16	14	4
		3	1	3	2	1
Б			65	10	55	50
			18	6	14	12
			3	1	2	1
Г				60	65	7
				10	12	4
				3	2	1
Д					40	25
					15	7
					2	1
Е						5
						2
						1
Ж						

По полученной матрице (таблица 5) можно определить, например, что трафик от узла Г к узлу Е состоит из 65 потоков Е1, 12 потоков Е3 и 2-х потоков Е4. В силу принятых нами допущений о симметричности потоков, трафик от узла Е к узлу Г тоже будет равен величинам 65/12/2.

Для окончательного формирования матрицы тяготений соответствующего варианта необходимо все значения потоков Е1 таблицы 5 умножить на коэффициент из таблицы 4 (в нашем случае этот коэффициент равен 1.1) и округлить до ближайшего большего.

В таблице 6 представлена итоговая матрица тяготений проектируемой 6-и узловой сети.

Таблица 6

Узлы						
	А	Б	Г	Д	Е	Ж
А		50	17	66	72	11
		10	8	16	14	4
		3	1	3	2	1
Б			72	11	61	55
			18	6	14	12
			3	1	2	1
Г				66	72	8
				10	12	4
				3	2	1
Д					44	28
					15	7
					2	1
Е						6
						2
						1
Ж						

4. Контрольные вопросы

1. Поясните, что такое матрица расстояний.
2. Поясните, что такое матрица тяготений.
3. В каких единицах измеряются объёмы цифровых потоков между узлами в PDH иерархии?
4. В каких единицах измеряются объёмы трибутарных потоков между узлами в SDH иерархии?
5. Характеристики модуля STM 1.
6. Характеристики модуля STM 4.
7. Характеристики модуля STM 16.
8. Характеристики модуля STM 64.
9. Характеристики модуля STM 256.
10. Характеристики потока Е 1.
11. Характеристики потока Е 3.
12. Характеристики потока Е 4.
13. Назовите основные элементы линейного тракта по технологии SDH.

5. Литература

1. Нерсисянц А.А., Герасимов И.Н. Методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Проектирование и эксплуатация систем передачи». СКФ МТУСИ: Ростов-на-Дону, 2015. – 41 с.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 7.

Тема: Расчет пропускной способности участков первичной сети

1. Цели занятия:

Закрепить знания по структуре мультисервисной сети и линейного тракта ВОСП технологии SDH. Получить практические навыки расчетов пропускной способности участков сети SDH. Овладеть методикой расчетов пропускной способности мультисервисной сети SDH

2. Рекомендации: Изучить материал в [1] с. 10-13.

3. Порядок выполнения работы:

1. Опрос по теоретическому материалу занятия и изучение блока кратких теоретических сведений (с помощью компьютера).
2. Уяснение задачи, методики расчетов и индивидуальных исходных данных, полученных от преподавателя.
3. Для заданной структуры сети и на основе данных, рассчитанных на предыдущем занятии, рассчитать: варианты распределения стандартизированных потоков вторичной сети по участкам первичной сети, варианты суммарных потоков по каждому участку сначала в числах потоков E1/E3/E4, а затем и в виде битовой скорости.

В качестве **исходных данных** необходимо использовать результаты расчетов, выполненных на *практическом занятии №6*.

Первичная сеть (ПС) в данном случае представляет собой оптоволоконную сеть радиально-кольцевой структуры на базе технологии SDH. Это опорная сеть, предоставляющая услуги в виде определенной полосы пропускания любым пользователям на основе долговременной аренды (принцип выделенного канала).

Всего задействовано 4 волокна по 2 в каждом направлении, из которых один основной и один резервный (система резервирования 1:1, время переключения на резерв до 50 мс). Остальные волокна кабеля (так называемые «темные волокна») находятся в резерве на случай расширения пропускной способности сети или повреждения рабочих волокон.

На оптоволоконном кольце расположены 6 мультиплексоров ввода/вывода (MBB или Add/Drop Multiplexer – ADM), с которыми совмещены 6 узлов коммутации вторичной сети, т.е. по одной паре УК – MBB в каждом информационном микрорайоне (ИМР). На самом деле SDH-кольцо может содержать больше MBB, но для проектируемой мультисервисной сети эти MBB прозрачны и могут не рассматриваться.

Основой для такого расчета служит **полученная на предыдущем занятии матрица тяготений**, элементы которой определяют все межузловые потоки.

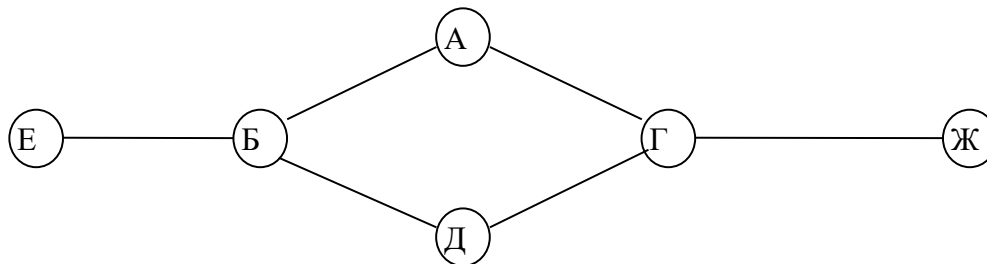


Рисунок 3. Схема проектируемой сети

Для определения суммарной пропускной способности для 6-и участков первичной сети достаточно занести значения матрицы тяготений в таблицу 7 в процессе просмотра всех 15 межузловых потоков. Например, узлы А и Б связаны непосредственно, поэтому потоки 50/10/3 фиксируются только в участке А – Б (строка 1). Узлы А и Е связываются по двум участкам, поэтому потоки 72/14/2 фиксируются в участках А – Б и Б – Е (строка 4).

Таблица 7. Распределение стандартизированных потоков вторичной сети по участкам первичной сети.

№	Потоки вторичной сети						
		а – б	а – г	б – д	б – е	г – д	г – ж
1	А → Б	50 10 3					
2	А → Г		17 8 1				
3	А → Д	66 16 3		66 16 3			
4	А → Е	72 14 2			72 14 2		
5	А → Ж		11 4 1				11 4 1
6	Б → Г			72 18 3		72 18 3	
7	Б → Д			11 6 1			
8	Б → Е				61 14 2		
9	Б → Ж			55 12 1		55 12 1	55 12 1
10	Г → Д					66 10 3	
11	Г → Е	72 12 2	72 12 2		72 12 2		
12	Г → Ж						8 4 1

13	Д → Е			<u>44</u> <u>15</u> 2	<u>44</u> <u>15</u> 2		
14	Д → Ж					<u>50</u> <u>17</u> 3	<u>28</u> <u>7</u> 1
15	Е → Ж			<u>6</u> <u>2</u> 1	<u>6</u> <u>2</u> 1	<u>6</u> <u>2</u> 1	<u>6</u> <u>2</u> 1
Суммарные потоки по участкам первичной сети		250					108
		<u>52</u>					<u>29</u>
		10					5
Требуемые суммарные пропускные способности участков первичной сети, Мбит/с.		3668					1902
Стандартный транспортный модуль, STM-N		STM-64					STM-16
Коэффициент использования пропускной способности канала		0.37					0.76
Длины участков первичной сети, км		90	100	70	120	65	70

После распределения межузловых потоков по участкам первичной сети определяются суммарные потоки по каждому участку сначала в числах потоков Е1/Е3/Е4, а потом и в виде битовой скорости. Например, для участка А – Б (суммарные потоки 250/52/10) битовая скорость определяется как

$$C = 250 \cdot 2 \text{ Мбит/с} + 52 \cdot 34 \text{ Мбит/с} + 10 \cdot 140 \text{ Мбит/с} = 3668 \text{ Мбит/с}.$$

Таким образом, на участке сети А – Б необходимо организовать SDH тракт с синхронным транспортным модулем STM-64, обеспечивающим битовую скорость до 10 Гбит/с.

Аналогичным образом определяются битовые скорости и транспортные модули для остальных 5-и участков. Для удобства дальнейших расчётов в таблице 7 приведены и длины каждого из 6-и участков сети.

Тот факт, что в нашем примере коэффициент использования пропускной способности канала на участке А-Б оказался ниже 50% не является недостатком проекта. Наоборот, в телекоммуникационных компонентах (узлы, каналы, тракты, сегменты сети и т.д.) существует не формальная граница опасной степени загрузки, равная 0,7. При превышении этой границы компоненты сети или вся сеть считаются перегруженными и не гарантируют выполнение требований по качеству обслуживания.

Кроме того, с учётом экспоненциального роста пользовательского трафика (примерно, ежегодное удвоение), логично при проектировании сети ориентироваться на коэффициент использования, лежащий в пределах от 0,3 до 0,5 (в данном проекте это не является обязательным требованием).

Наличие многовариантной маршрутизации позволяет в ряде случаев несколько выравнивать коэффициенты использования каналов. Например, в данной сети связь узлов Е и Ж можно выполнить по маршруту Е-Б-А-Г-Ж, или по альтернативному маршруту Е-Б-Д-Г-Ж. В данном случае рекомендуется проводить аргументированный подход к альтернативной маршрутизации. Например, трафик, допускающий примерно равноценные альтернативные маршруты, направлять через менее загруженные участки сети.

4. Контрольные вопросы

1. Поясните особенности сети радиально-кольцевой структуры на базе технологии SDH.
2. Поясните систему резервирования 1:1 в сети на базе технологии SDH.
3. Поясните термин «темные волокна» в сети на базе технологии SDH.
4. Поясните термин «вторичная сеть».
5. Поясните термин «первичная сеть».
6. Виды мультиплексоров в сети на базе технологии SDH.
7. Поясните функции мультиплексора ввода-вывода.
8. Поясните функции терминального мультиплексора.
9. Поясните термин «коэффициент использования пропускной способности канала».
10. Поясните термин «SDH тракт».

5. Литература

1. Нерсисянц А.А., Герасимов И.Н. Методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Проектирование и эксплуатация систем передачи». СКФ МТУСИ: Ростов-на-Дону, 2015. – 41 с.

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 8.

Тема: Определение параметров оптической секции SDH

1. Цели занятия:

Закрепить знания по структуре линейного тракта волоконно-оптической ЦСП технологии СЦИ СР. Получить практические навыки расчетов основных показателей регенерационного участка волоконно-оптической ЦСП технологии СЦИ СР. Овладеть методикой расчета регенерационного участка волоконно-оптической ЦСП технологии СЦИ СР.

2. Рекомендации:

Изучить материал в [1] с. 13 - 26.

3. Порядок выполнения работы:

1. Опрос по теоретическому материалу занятия и изучение блока кратких теоретических сведений (с помощью компьютера).
2. Уяснение задачи, методики расчетов и индивидуальных исходных данных, полученных от преподавателя.
3. Рассчитать: длины регенерационных участков по затуханию и по дисперсии, длины усилительных участков, выбрать тип оптической секции, синхронного мультиплексора. Составить расчетную схему для определения длины усилительного участка ВОСП-СР, построить диаграмму распределения энергетического потенциала.

Выбор типа оптической секции

Необходимо определить тип оптических секций на сети и их интерфейсов, произвести выбор типа оптического волокна и желательно марку оптического кабеля, определить параметры оптических интерфейсов синхронных транспортных модулей соответствующего уровня SDH.

Оптическая секция или цифровой стык включает в себя аппаратуру окончания оптического линейного тракта (АОЛТ), стационарный оптический кабель (СОК) и линейный оптический кабель (ЛОК).

АОЛТ оборудования SDH представляет собой плату оптического стыка в составе аппаратуры синхронного мультиплексора STM-N, на цифровом стыке которой формируется цифровой сигнал N-ого уровня иерархии STM, параметры которого определены в рекомендациях МСЭ-Т G.707.Y.1332.

Для систем передачи SDH требуется обеспечение поперечной совместимости, т.е. использование на концах оптического тракта оборудования различных производителей. Это требование привело к классификации оптических стыков по коду применения.

Обозначение кода применения состоит из обозначения типа применения, далее, уровня STM-N, отделенного точкой от приводимого (или неприводимого) цифрового символа, обозначающего длину волны источника излучения и тип применяемого оптического кабеля. Т.е. «ТИП ПРИМЕНЕНИЯ – УРОВЕНЬ STM. ЦИФРОВОЙ СИМВОЛ».

Рассмотрим эти обозначения подробнее:

ТИП ПРИМЕНЕНИЯ:

VSR – очень короткие (very short reach);

I – для внутриобъектовой связи (intra);

S – для короткой межстанционной связи (short);

L – для длинной межстанционной связи (long);

V – для очень длинной межстанционной связи (very);

U – для сверхдлинной межстанционной связи (ultra).

УРОВЕНЬ STM: определяет тип используемого фрагмента данных и соответствующие каналные скорости – STM-1, STM-4, STM-16 и т.д.

ЦИФРОВОЙ СИМВОЛ:

1 - Номинальная длина волны источника излучения 1310 нм и тип кабеля со стандартным ОВ (рекомендации G.652 МСЭ-Т).

2 - Номинальная длина волны источника излучения 1550 нм и тип кабеля со стандартным ОВ (рекомендации G.652 МСЭ-Т).

3 - Номинальная длина волны источника излучения 1550 нм и тип кабеля со стандартным ОВ с нулевой смещенной дисперсией (рекомендации G.653 МСЭ-Т).

4 - Номинальная длина волны источника излучения 1550 нм и тип кабеля со стандартным ОВ с ненулевой смещенной дисперсией (рекомендации G.655 МСЭ-Т).

Отсутствие цифрового символа означает номинальную длину волны источника излучения 1310 нм и тип кабеля с ОВ, соответствующего рекомендациям G.652 МСЭ-Т (используется для внутриобъектовой связи)

Коды применения для оборудования SDH приведены в таблицах 1, 2, 3.

Таблица 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ STM-1 STM-4 STM-16, коды приложений I, S, L.

Использование Параметры		Внутри станции	Методу станциями				
			Короткая секция		Длинная секция		
Номинальная длина волны источника, нм		1310	1310	1550	1310	1550	
Тип волокна		G.652	G.652	G.652	G.652	G.652. G.654	G.653
Расстояние, км		2	15		40	80	
Уровни SDH	STM-1 STM-4 STM-16	I-1 I-4 I-16	<i>S-1.1 S- 4.1 S- 16.1</i>	<i>S-1.2 S-4.2 S-16.2</i>	<i>L-1.1 L- 4.1 L- 16.1</i>	<i>L-1.2 L- 4.2 L- 16.2</i>	<i>L-1.3 L- 4.3 L- 16.3</i>

Таблица 2 КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ
(коды **S, L** для STM-64, 256)

Параметр	Значение						
Номинальная длина волны источника, нм	1310	1550	1550	1550	1310	1550	1550
Тип волокна	G.652	G.652	G.653	G.655	G.652	G.652	G.653
Заданное рас- стояние, км	20	40	40	40	40	80	80
STM-64	<i>S-64.1</i>	<i>S-64.2</i>	<i>S-64.3</i>	<i>S-64.5</i>	<i>L-64.1</i>	<i>L-64.2</i>	<i>L-64.3</i>
Заданное расстояние, км		40	40			80	80
STM-256		<i>S-256.2</i>	<i>S-256.3</i>			<i>L-256.2</i>	<i>L-256.3</i>

Таблица 13 КЛАССИФИКАЦИЯ ОПТИЧЕСКИХ ИНТЕРФЕЙСОВ (Коды V и U)

Параметр	Очень длинная секция			Сверхдлинная секция	
Номинальная длина волны источника, нм	1310	1550	1550	1550	1550
Тип ОВ (рекомендация МСЭ-Т)	G.652	G.652	G.653	G.652	G.653

Протяженность, км STM-1, STM-4 STM-16	60 — V-4.1 —	120 — V-4.2 V-16.2	120 — V-4.3 V-16.3	160 — U-4.2 U-16.2	160 — U-4.3 U-16.2
Протяженность, км STM-64 STM-256	60 — —	120 V-64.2 —	120 V-64.3 —	— — —	— — —

Для рассматриваемого варианта (Вариант 00) необходимо определить коды секций БЕ, АБ, АГ, БД, ДГ и ГЖ в соответствии с таблицами 8, 9 и 10.

Например, для секций «А-Б» и «Г-Ж» получим следующие типы оптической секции:

- секция А-Б – **V. 64.3** (очень длинная межстанционная связь, STM – 64, длина волны источника излучения 1550 нм);
- секция Г-Ж - **L. 16.3** (длинная межстанционная связь, STM – 16, длина волны источника излучения 1550 нм).

Выбор синхронного мультиплексора

Выбор мультиплексора, особенно в реальном проектировании, является важнейшим этапом работы. Здесь нужно в комплексе учесть энергетические, скоростные, ценовые и другие параметры различных изделий.

При выборе оборудования необходимо анализировать справочные данные по поставляемому фирмами изготовителями оборудованию. Наиболее полную и свежую информацию можно найти в Internet. Кроме того, некоторые сведения по оборудованию приведены в приложении к настоящему методическому пособию.

Для дальнейшего расчёта необходимо выписать следующие параметры передачи мультиплексора (без оптических усилителей):

Уровень передачи, дБм...

Длина волны, нм...

Чувствительность приемника $K_{чп}$, дБм...

Затухание регенерационного участка, дБ...

Уровень перегрузки приемника, дБм...

Дисперсия, пс/нм

Тип источника излучения...

Тип оптического детектора...

Исходя из кодов участков, определённых в п. 3.1, на них используется оптический кабель с ОВ, работающий на длине волны 1550 нм и обладающий нулевой смещенной дисперсией (рекомендации G.653)

Усредненные данные таких ОВ:

Километрическое затухание - 0,19-0,25 дБ/км

Хроматическая дисперсия – 3,3 пс/нм.км

В качестве производителя кабеля выбирается ОК ЗАО «Самарская кабельная компания». Тип кабеля - ОКЛК-01 с $\alpha = 0,22$ дБ/км и $\delta = 1,8$ пс/нм.км.

Параметры типовых разъёмных соединений приведены в таблице 4.

Таблица 4 ПОТЕРИ В РАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ (Рек. G.957 МСЭ-Т)

Параметр	Некалиброванные		Калиброванные	
Потери при соединении с образцовым разъемом, дБ	Среднее	0,20	Среднее	0,14
	94%	<0,30	95%	<0,30
	97%	<0,40	99%	<0,40
Потери при соединении «любой с любым», дБ	Среднее	0,30	Среднее	0,15
	60%	<0,30	94%	<0,30
	85%	<0,50	98%	<0,40

Расчет длины регенерационного участка (РУ)

П р и м е р: Рассчитать длину усилительного участка ВОСП-СР с использованием STM-16, положив следующие значения величин, в нее входящих:

$p_s = 25$ дБм – абсолютный уровень выходной суммарной мощности оптического сигнала с учетом запаса по усилению;

$m = 16$ – число оптических каналов; $10\lg m = 10\lg 16 = 12$ дБ, следовательно, уровень передачи по оптическому каналу $p_{\text{пер}} = p_s - 10\lg m = 25 - 12 = 13$ дБм. Предельная протяженность РУ ограничивается как затуханием, так и шириной полосы пропускания оптического тракта.

Для определения длины регенерационного участка составляется его расчетная схема, в которой приняты следующие обозначения: ОС-Р – оптический соединитель разъемный (их число на регенерационном участке равно 2); НРП – необслуживаемый регенерационный пункт; ППОМ – приемопередающий оптический модуль, преобразующий оптический сигнал в электрический, восстанавливающий параметры последнего и снова преобразующий его в оптический); ОС-Н – оптический соединитель неразъемный, число которых на единицу меньше числа строительных длин оптического кабеля, составляющих регенерационный участок; $l_{\text{стр}}$ – строительная длина оптического кабеля, равная 2...4 км (это длина кабеля, наматываемого на кабельную катушку на заводе изготовителе кабеля); ОВ – оптическое волокно; $l_{\text{ру}}$ – длина регенерационного участка.

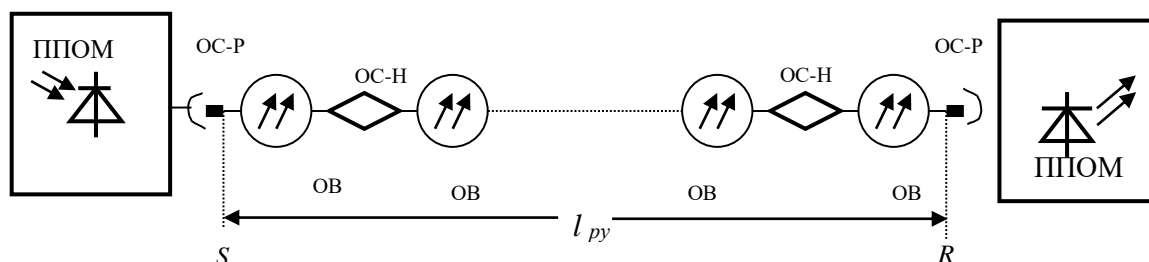


Рисунок 1. Расчетная схема для определения длины регенерационного участка

Как следует из рисунка 1 затухание регенерационного участка равно

$$A_{\text{макс}} = \Sigma = 2A_p + q \cdot A_n + a \cdot l_{\text{ру}} + A_t + A_b, \text{ дБ},$$

где: A_p – затухание разъемного оптического соединения (ОС-Р) равное 0,5 дБ;

A_n – затухание неразъемного оптического соединения (ОС-Н);

q – число неразъемных соединений; a – коэффициент затухания

оптического волокна, дБ/км;

l_{py} – длина регенерационного участка;

A_t – допуски на температурные изменения параметров ЦВОСП, в том числе и оптического кабеля, для типов ЦВОСП равные 0,5...1,5 дБ;

A_b – допуски на ухудшение параметров элементов ЦВОСП со временем (старение, деградация и т. п.), $A_b = 2...6$ (зависит от типа источника оптического излучения и приемника оптического излучения и их комбинаций).

Сумма $A_t + A_b = \Delta\mathcal{E}_3$ – энергетический запас, его обычно берут равным 6 дБ.

Максимально допустимое затухание (или энергетический потенциал \mathcal{E}) регенерационного участка равно

$$A_{\text{макс}} = \mathcal{E} = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр мин}}, \text{ дБм},$$

При расчете длины РУ по затуханию необходимо использовать следующие основные параметры аппаратуры и оптического кабеля:

-энергетический потенциал, равный разности уровней передатчика - $p_{\text{пер}}$ и чувствительностью фотоприемника - $p_{\text{пр}}$, т.е. $\mathcal{E} = p_{\text{пер}} - p_{\text{пр}}$;

-погонное затухание ОК – α_k ;

-затухания в неразъемных соединениях α_{nc} и их количество n_{nc} ;

-затухания в разъемных соединениях α_{pc} и их количество – n_{pc} (их на РУ-2);

-эксплуатационный запас системы $\Delta\mathcal{E}_3$, его обычно берут равным 6 дБ;

-количество n_{nc} равно: $n_{nc} = L_{py}/L_{cmt} - 1$

Максимальная длина РУ по затуханию рассчитывается по формуле:

$$L_{\text{зат.макс}} = \frac{\mathcal{E} - \Delta\mathcal{E}_3 - \alpha_{pi} \cdot n_{pc}}{\alpha_k + \alpha_{nc}/L_{cmt}} [\text{км}]$$

Минимальная длина РУ определяется динамическим диапазоном АРУ (автоматическая регулировка усиления) приемного оптического модуля α_{APU} , его величина лежит в пределах 12-15 дБ.

$$L_{\text{зат.мин}} = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_3 - \alpha_{pc} \cdot n_{pc} - \alpha_{APU}}{\alpha_k + \alpha_{nc}/L_{cmt}} [\text{км}]$$

На длину регенерационного участка влияет широкополосность, которая зависит от нормированной среднеквадратической дисперсии волокна $\sigma_v \left[\frac{n_c}{\text{нм} \cdot \text{км}} \right]$ и ширины полосы оптического излучения источника $\Delta\lambda [\text{нм}]$. Расчетная формула для длины РУ по дисперсии имеет вид:

$$L_{\text{дисп}} = \frac{0,25 \cdot 10^{-12}}{\sigma_v \cdot \Delta\lambda \cdot B} [\text{км}]$$

где B – скорость передачи цифрового сигнала в линии, численно равная тактовой частоте.

Рассчитав значения $L_{\text{зат.макс}}$, $L_{\text{зат.мин}}$ и $L_{\text{дисп}}$ определяются предельные значения длины РУ, удовлетворяющие всем требованиям.

В заключение рассчитывается диаграмма распределения энергетического потенциала. Диаграмму рассчитать для участка, не содержащего необслуживаемых регенерационных пунктов. При расчете принять величину строительной длины ОК равной 4 км. Уровень оптической мощности, поступающей на вход приемника, зависит от уровней передачи оптического передатчика, потерь мощности в ОВ, потерь мощности в разъемных и неразъемных соединениях. При расчетах принять $\alpha_{pc} = 0,5$ дБ, $\alpha_{nc} = 0,1$ дБ.

Графически примерная диаграмма распределения энергетического потенциала имеет вид (Рисунок 2).

Аналитически диаграмма распределения энергетического потенциала представляется как:

$$P_{np} = P_{nep} - \alpha_{pc1} - \alpha_{nc1} - \alpha_k \cdot l_i - \sum_{i=2}^{n-1} \alpha_k \cdot l_i - \sum_{i=3}^{n-2} \alpha_{nc} \cdot l - \alpha_{ncn-1} - \alpha_k \cdot l_n - \alpha_{ncm} - \alpha_{pc2}$$

Диаграмма распределения энергетического потенциала служит основой для расчета основных параметров оптического линейного тракта.

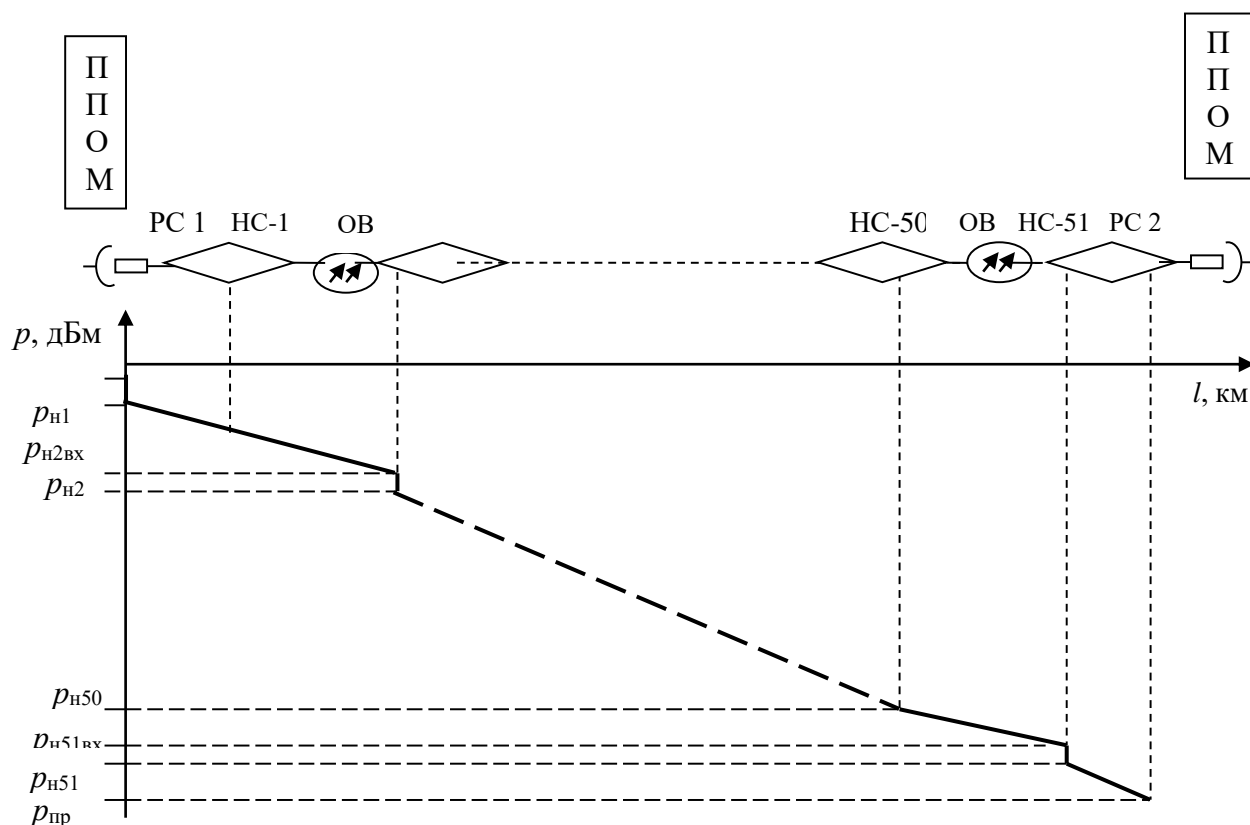


Рисунок 2. Диаграмма распределения энергетического потенциала

Расчет длины усилительного участка.

Решить проблему компенсации потерь ОБ можно включением на секциях оптических усилителей. Выбор варианта компенсации потерь определяется несложными экономическими расчетами. Оптические усилители находят самое широкое применение в ВОСП-СР.

Исходные данные к выполнению задания приведены в таблице 2. Вариант выбирается по двум последним цифрам номера студенческого билета.

Таблица 2 - Параметры ВОСП-СП

Количество спектральных каналов ВОСП-СР, <i>m</i>			4	8	16	32	48	48	32	16	8	4
Уровень синхронного транспортного модуля, <i>N</i> (STM-N)			4	16	64	64	16	4	4	16	64	16
Логарифмический коэффициент шума, дБ			4	5	6	7	8	8	7	6	5	4
Минимально допустимая защищенность оптического сигнала от оптических шумов, <i>A</i> _з , для вероятности ошибки не хуже 10 ⁻¹² , не менее, дБ			18	20	28	31	21	19	21	23	30	27
Количество ЭКУ на участке регенерации ВОСП-СР, <i>k</i>			2	3	4	5	6	5	4	3	2	4
Системный запас ВОСП-СР, Δ <i>Э</i> _з , дБ.			10	12	14	15	16	17	16	16	15	14
Затухание разъемного соединения, <i>A</i> _р , не более, дБ			0,35		0,40		0,45		0,50		0,47	
Затухание неразъемного соединения, <i>A</i> _н , не более, дБ			0,1									
Параметры оптического кабеля			Номер варианта									
<i>α</i> , дБ/м	<i>l</i> _{стр} , км	<i>σ</i> _{ов} , пс/нм·км										
0,22	2	3,5	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09
0,21	4	18	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
0,18	2	15	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
0,30	4	17	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
0,20	2	5,0	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49
0,23	4	3,5	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59
0,33	2	16	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69
0,36	4	17	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79
0,25	2	18	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89
0,35	4	3,5	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99

Длина усилительного участка волоконно-оптической линии передачи (ВОЛП) определяется по двум критериям:

- 1) максимально перекрываемого затухания – максимальной длины усилительного участка;
- 2) максимально допустимой величины перекрываемой хроматической дисперсии.

Для определения длины усилительного участка составляется расчетная схема, рисунок 7, где приняты следующие обозначения: ОУ_л – линейный оптический усилитель; ОС-Р – оптический соединитель разъемный; ОС-Н – оптический соединитель неразъемный; ОВ – оптическое волокно, S - точка передачи и R – точка приема; l_{yy} – длина усилительного участка.

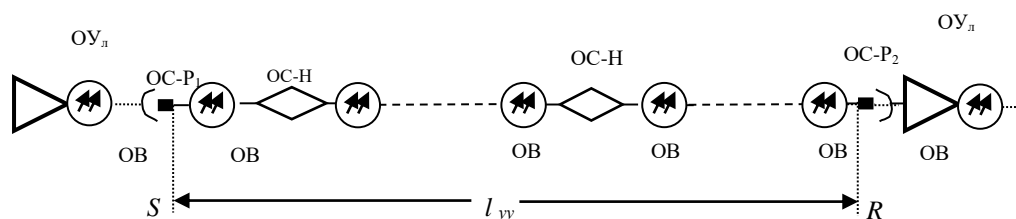


Рисунок 3. Расчетная схема для определения длины усилительного участка ВОСП-СР

Расчет по первому критерию производится по формуле для максимальной длины элементарного кабельного участка (ЭКУ) ВОЛП с применением оптических усилителей различного типа: мощный усилитель или *бустер* и линейный усилитель. Напомним, что под ЭКУ понимается пассивный кабельный участок (между точками S и R), не содержащий оптических усилителей и регенераторов. Рекомендация МСЭ-Т определяет точку S, как точку на ОВ сразу за оптическим разъемом ОС-Р₁, а точку R, как опорную точку на ОВ сразу перед оптическим разъемом ОС-Р₂. Параметры этих усилителей одинаковы (таблица 3).

Таблица 3 - Параметры оптических усилителей

Наименование параметров ОУ	Значение параметров
1 Уровень входной суммарной мощности: минимальный, дБм максимальный, дБм	– 36,0 + 1,0
2 Уровень выходной суммарной мощности. P _S : минимальный, дБм максимальный, дБм	– 10,0 + 17,0
3. Коэффициент усиления: минимальный, дБм максимальный, дБм	10,0 33,0
4. Неравномерность коэффициента усиления в заданном диапазоне рабочих длин волн, не более, дБ	3,0
5. Шум-фактор F _{yc} в заданном диапазоне длин волн (при минимальном уровне суммарной входной мощности), не более, дБ	6,0
6. Коэффициент отражения на входе и выходе, не более, дБ	– 30,0

Длина ЭКУ может быть определена по формуле

$$L_{\text{ЭКУ}} = \frac{P_s - 10 \lg m - P_{\text{ASF}} - F_{\text{yc}} - A_3 - 10 \lg k - \Delta \mathcal{E}_3 - 2A_p}{\alpha + A_{\text{HC}} / l_{\text{cmp}}},$$

где $L_{\text{ЭКУ}}$ – длина ЭКУ, км; p_s – уровень абсолютной мощности оптического сигнала на выходе усилителя передачи в точке S, дБ; m – количество оптических каналов проектируемой ВОЛП; P_{ASF} – усиленное спонтанное усиление, приведенное ко входу усилителя, дБ; F_{yc} – логарифмический коэффициент шума оптического усилителя, дБ; A_3 – минимально допустимая защищенность оптического сигнала от оптических шумов (отношение сигнал/шум), дБ; k – количество ЭКУ на участке регенерации ВОСП-СР, учитывающее процесс накопления шумов, вносимых оптическими усилителями; $\Delta \mathcal{E}_3$ – системный запас

ВОЛП, дБ, учитывающий дополнительные потери по кабелю, за счет дисперсии и нелинейных процессов в ОВ, потери в ОМ/ОД и оптических фильтрах; A_P – затухание разъёмного соединения – ОС-Р, дБ; A_H – затухание неразъёмного соединения – ОС-Н, дБ; l_{cmp} – строительная длина оптического кабеля, км; α – коэффициент затухания ОК, дБ/км.

$F_{yc} = 7$ дБ - логарифмический коэффициент шума оптического усилителя;

$A_3 = 23$ дБ – минимально допустимая защищенность оптического сигнала от оптических шумов, при которой коэффициент ошибок не будет более 10^{-12} при регенерации цифрового сигнала;

$k = 3$ – количество ЭКУ на участке регенерации ВОСП-СР, с учетом эмпирической длины усилительного участка в пределах 100 км

$10 \lg k = 10 \lg 3 = 4,77$ дБ;

$\Delta \mathcal{E}_3 = 15$ дБ – системный запас ВОЛП;

$A_P = 0,5$ дБ – затухание разъёмного соединения – ОС-Р;

$A_H = 0,1$ дБ – затухание неразъёмного соединения – ОС-Н;

$l_{cmp} = 2$ км – строительная длина оптического кабеля, например, типа ОКЛ-2;

$\alpha = 0,22$ дБ/км – коэффициент затухания.

Усиленное спонтанное излучение рассчитывается по формуле

$$P_{ASE} = 10 \lg \left(\frac{hc}{\lambda} \Delta f \cdot 10^3 \right),$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ – постоянная Планка, (Вт·с); $c = 2,998 \cdot 10^{17}$ – скорость света в вакууме, нм/с; λ – длина волны в С-диапазоне (1529...1560); $\Delta f = f_T$ – полоса частот цифрового сигнала, передаваемого по оптическому каналу (при расчетах берется равной скорости передачи цифрового потока выбранного STM-N с учетом кода линейного цифрового сигнала или синхронного транспортного модуля соответствующего уровня).

Подставив значения величин, в нее входящих: $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Вт·с; $c = 2,998 \cdot 10^{17}$ нм/с; $\lambda = 1550,12$ нм; $\Delta f = 2,5 \cdot 10^9$ Гц, получим

$$P_{ASE} = 10 \lg \left(\frac{hc}{\lambda} \Delta f \cdot 10^3 \right) = 10 \lg \left(\frac{6,626 \cdot 10^{-34} \cdot 2,998 \cdot 10^{17}}{1550,12} \cdot 2,5 \cdot 10^9 \cdot 10^3 \right) = -65, \text{ дБм.}$$

Подставив значения всех величин ($p_S = 27$ дБм, $10 \lg m = 10 \lg 16 = 12$ дБ; $p_{ASF} = -65$ дБм; $F_{yc} = 7$ дБ; $A_3 = 23$ дБ; $10 \lg k = 10 \lg 3 = 4,77$ дБ; $\Delta \mathcal{E}_3 = 15$ дБ; $A_P = 0,5$ дБ; $A_H = 0,1$ дБ; $l_{cmp} = 2$ км; $\alpha = 0,22$ дБ/км), получим:

$$L_{\mathcal{E}KY} = \frac{25 - 12 - (-65) - 7 - 23 - 4,77 - 15 - 2 \cdot 0,5}{0,22 + 0,1 / 2} = 120,9 \text{ км.}$$

С учетом 5-ти процентного запаса оптического кабеля длина усилительного участка относительно расчетной должна быть уменьшена на величину $120,9 \cdot 0,05 = 6$ км. Следовательно, длина усилительного участка равна 115 км.

Расчет показателей надежности участка внутризоновой первичной сети.

В данном разделе необходимо рассчитать надежность ОЦК на участке заданной протяженности внутризоновой первичной сети, образованной аппаратурой ВОЦСП и участками ОК. Расчет производится для сети в соответствии с п.1 задания на КП и данных таблиц 6 и 7, а также результатами расчетов задания 4.

Под надежностью объекта (элемента или системы) понимают его свойство сохранять во времени и в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих качество передачи. Комплексным показателем надежности восстанавливаемых объектов, к которым относятся устройства электросвязи, является коэффициент готовности K_r , определяющий вероятность того, что объект окажется работоспособным в произвольный момент времени. С коэффициентом готовности связан коэффициент простоя $K_n = 1 - K_r$, который определяет вероятность того, что объект окажется в неработоспособном состоянии в произвольный момент времени.

Безотказность – свойство объекта непрерывно сохранять работоспособность в течение некоторого времени (наработки). Ее характеризуют показателями:

- наработкой на отказ, или средним временем между отказами T_o ч.
- средним временем восстановления T_v , ч;
- интенсивностью отказов - средним количеством отказов в единицу времени (обычно в течение одного часа) $\lambda(t)$, 1/ч;

Считается, что в период нормальной эксплуатации (после приработки и до физического износа), интенсивность отказов постоянна $\lambda(t) = \text{const} = \lambda$.

В этом случае $T_o = 1/\lambda$, а вероятность безотказной работы; $P(t) = e^{-\lambda t}$

Очевидные соотношения:
$$K_z = \frac{T_o}{T_o + T_v}; \quad K_n = \frac{T_v}{T_o + T_v};$$

Если считать, что отказы элементов в системе независимы, а отказ одного элемента приводит к отказу всей системы в целом, то при n элементах в системе

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^n \lambda_i; \quad K_z = \prod_{i=1}^n K_{zi}; \quad K_n = \sum_{i=1}^n K_{ni}$$

Среднее время восстановления системы из N элементов:

$$T_{vc} = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i T_{vi}}{\lambda_c}$$

Требуемые показатели надежности канала передачи зависят от его протяженности.

$$T_{OL} = \frac{T_{OM} \cdot L_M}{L}; \quad K_{ПЛ} = (1 - K_{ГМ}) \cdot \frac{L}{L_M};$$

где T_{OM} - норматив среднего времени между отказами,

$K_{ГМ}$ - коэффициент готовности канала максимальной протяженности.

Для канала внутризоновой первичной сети длиной $L_M = 1400$ км. установлено:

- канал ТЧ существующей сети $T_{OM} \geq 111,4$ ч. $K_{ГМ} \geq 0,99$.
- ОЦК перспективной сети: $T_{OM} \geq 2050$ ч. $K_{ГМ} \geq 0,998$.

При расчете надежности магистрали расчет ведется отдельно для линейно-кабельных сооружений (ЛКС) аппаратного комплекса.

При расчете показателей надежности ЛКС учитывают:

- λ_{KI} – интенсивность отказов одного километра оптического кабеля в год из-за внешних причин. Его значения вычисляют из того, что на 100 км кабеля приходится в среднем 0,15 повреждений в год:

$$\lambda_{KI} = \frac{0,15}{100 \cdot 8765} = 1,7 \cdot 10^{-7} \frac{1}{ч \cdot км}$$

- λ_{K2} – интенсивность отказов одной строительной длины ОК из-за внутренних причин. λ_{K2} рассчитывают, руководствуясь техническими условиями на ОК, согласно которым минимальная наработка на отказ одной строительной длины составляет 215000 часов.

Приблизительно считают, что среднее значение (наработка на отказ) в 15 раз больше минимальной, откуда:

$$\lambda_{K2} = 1/215000 \cdot 15 = 3,1 \cdot 10^{-7} \text{ 1/ч.}$$

- $\lambda_{нрп.к}$ = интенсивность отказов одного НРП за счет внешних повреждений.

Согласно опыта эксплуатации отказ n_1 НРП из-за внешних повреждений составляет в среднем 0,6 на один пункт в год.

Отсюда получается:

$$\lambda_{нрп.к} = 0,006/8765 = 6,8 \cdot 10^{-6} \text{ 1/ч.}$$

Среднее время восстановления $T_{влкс}=10\text{ч.}$

Интенсивность отказов ЛКС

$$\lambda_{лкс} = \lambda_{K1}L + \lambda_{K2}n_{сд} + \lambda_{нрп.к}n_{нрп}$$

При расчете принято $L_{сд}=4\text{км.}$ Далее рассчитывается $T_{олкс}$, $K_{глкс}$, $K_{нлкс}$

Расчет показателей надежности аппаратного комплекса производится исходя из числа мультиплексоров НРП на магистрали. Основу мультиплексора, в основном определяющим его надежность, составляют оптические передатчики и приемники (оптический интерфейс). По опыту эксплуатации их надежность определяется средним временем наработки на отказ 45000 часов. Отсюда

$$\lambda_{мл} = 1/45000 = 2,22 \cdot 10^{-4} \text{ 1/ч.}$$

Далее по известным формулам рассчитываются $T_{оа}$, $K_{гд}$, и $K_{па}$. При расчете полагают, что время восстановления НРП $\leq 2,5\text{ч.}$, а мультиплексора – 0,5 часа.

Зная показатели надежности ЛКС аппаратного комплекса, рассчитывают результирующие показатели:

$$\lambda_{м} = \lambda_{лкс} + \lambda_{д}, \quad T_{ом} = 1/\lambda_{м}; \quad K_{гм} = 1 - K_{нлкс} - K_{па}.$$

Зная результирующую интенсивность отказов магистрали, производят расчет вероятности безотказной работы за периоды: сутки, квартал, полугодие, год.

На основе расчетов необходимо сделать выводы.

Расчет параметров качества участка проектируемой ВЗПС.

В данном разделе качество линии анализируется на примере функционирования основного цифрового канала (ОЦК).

Для заданного участка ВЗПС длиной L км необходимо рассчитать допустимые значения параметров качества передачи и ОЦК (параметры А, Б, и В) в соответствии с Рекомендации МСЭ-Т G-821. По полученным результатам рассчитать допустимое число секунд и минут с пониженным качеством, полагая, что время контроля равно одному месяцу.

В соответствии с рекомендациями G-821 для ОЦК вводятся три градации параметра качества:

А – при оценке в одноминутных интервалах, не менее чем в 90% измерений должно быть не более четырех ошибок;

Б – при оценке в односекундных интервалах, не менее чем в 99,8% измерений должно быть не более 62 ошибок.

В – при оценке в односекундных интервалах, не менее чем в 92% измерений ошибки должны отсутствовать.

Для внутризонавой первичной сети передачи протяженностью 600км нормы параметра качества ОЦК имеют следующие величины:

по параметру А – $K_A=98,5\%$;
 по параметру Б – $K_B=99,7\%$;
 по параметру В – $K_B=98,8\%$.

Для расчета параметров качества K'_i для участка длиной L можно пользоваться выражением:

$$K'_i = 100 - \frac{(100 - K_i)}{600} \cdot L$$

На практике в качестве основного критерия оценки качества передачи по цифровым каналам и трактам чаще используется коэффициент ошибок $K_{ош}$.

Очевидно, процент времени в градациях А и Б можно отнести к одиночным ошибкам, а в градации В – к пакетам ошибок. Полагая равномерность распределения норм, соответствующих градации В между участками номинальной цепи можно установить километрическое нормы на относительное число односекундных интервалов, в которых будет содержаться хотя бы одна ошибка. Для ВЗПС:

$$K_{ош} = \frac{1 - 0,988}{600} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/км}$$

Для участка длиной L

$$K'_{ош} = K_{ош} \cdot L$$

После расчета K'_i и $K'_{ош}$ производится расчет числа минутных и секунд интервалов в месяц, соответствующих выбранному параметру. Расчет производится по формуле:

$$C_i = (1 - K'_i) \cdot N_i,$$

где

K'_i - параметр качества;

N_i - число минут или секунд в месяце. При расчете полагать, что в одном месяце $N_{сек} = 2,6 \cdot 10^6$, $N_{мин} = 43,2 \cdot 10^3$.

Расчет по параметру А относят к минутным интервалам, а по параметрам Б и В - к секундным.

4. Контрольные вопросы

1. Поясните термин и суть технологии WDM.
2. Дайте характеристику видов WDM.
3. Поясните термин «четырёх волновое смещение» и его физическую суть в технологии WDM.
4. Поясните термин «вынужденное комбинационное (рамановское) рассеяние» и его физическую суть в технологии WDM.
5. Поясните термин «фазовая кросс-модуляция» и его физическую суть в технологии WDM.
6. Поясните функции WDM-транспондера в технологии WDM.
7. Поясните функции волнового конвертора в технологии WDM.
8. Поясните функции компенсаторов хроматической дисперсии в технологии WDM.
9. Поясните функции оптических переключателей спектральных каналов в технологии WDM.
10. Перечислите компонентные сигналы в технологии WDM.

11. Поясните физическую суть расчета длины регенерационного участка по затуханию в технологии WDM.
12. Поясните физическую суть расчета длины регенерационного участка по дисперсии в технологии WDM.

Литература

1. Нерсисянц А.А., Герасимов И.Н. Методические указания по выполнению курсового проекта по дисциплине «Проектирование и эксплуатация систем передачи». СКФ МТУСИ: Ростов-на-Дону, 2015. – 41 с.