

Федеральное государственное образовательное бюджетное учреждение
высшего профессионального образования
«Поволжский государственный университет
телекоммуникаций и информатики»

Кафедра СС

Методические указания и контрольные задания по выполнению контрольной
работы по дисциплине
«Многоканальные телекоммуникационные системы»
для студентов заочной формы обучения направление подготовки 210700.62
Профиль (специализация) подготовки
«МТС»

Составители: к.т.н., доц. В.И. Иванов

Самара, 2014

Излагаются методические указания по выполнению контрольного задания по дисциплине «Многоканальные телекоммуникационные системы », вопросы и задачи для самоконтроля, задания к контрольной работе и методические рекомендации по их выполнению.

Вариант контрольной работы определяется студентом по предпоследней и последней цифрам студенческого билета.

Текст каждого задания вместе с вариантом и исходными данными приводят в пояснительной записке на отдельной, как правило, первой странице.

Решения задач обязательно сопровождаются необходимыми пояснениями и ссылками на литературу, использованную при выполнении соответствующего задания, список которой приводят в конце контрольной работы. В сроки, установленные учебным графиком (но не позже первого дня начала лабораторно-экзаменационной сессии), контрольная работа представляется на рецензирование.

Все исправления и дополнения, сделанные студентом по замечаниям рецензента, выносятся на поля в том месте, где обнаружены ошибки, заданы вопросы или сделаны замечания. Допущенные к защите контрольные работы предъявляются на экзамене или зачете, где и происходит их защита.

Для успешной защиты контрольной работы необходимо:

- внести исправления по замечаниям рецензента, ответить (письменно или устно в зависимости от требований рецензента) на поставленные вопросы;
- уметь полностью объяснить ход решения задач, обосновать правильность использования расчетных формул, понимать смысл входящих в них величин и символов, их размерность.

Изучение дисциплины МТС базируется на обеспечивающих курсах: информатика, физика, физические основы электроники, теория вероятностей и математическая статистика, теория электрических цепей, общая теория связи, цифровая обработка сигналов, основы построения инфокоммуникационных систем и сетей, направляющие системы электросвязи, метрология, стандартизация и сертификация в инфокоммуникациях

Список литературы

Основная литература

1. Цифровые и аналоговые системы передачи: Учебник для вузов /Иванов В.И., Гордиенко В.Н., Попов Г.Н., и др. Под редакцией В.И. Иванова.- М.: Горячая линия – Телеком, 2003, - 232 с.: ил.
2. Волоконно-оптические системы передачи. Учебное пособие для вузов /В.И. Иванов, Л.В. Адамович/- Казань: ЗАО «Новое знание.- 2012.- 123 с.: ил.
3. Спектральное уплотнение ВОЛС. Учебное пособие для вузов /В.И. Иванов/- Казань: ЗАО «Новое знание.- 2012.- 224 с.: ил.
4. Основы построения телекоммуникационных систем и сетей: Учебник для вузов / В.В. Крухмалев, В.Н. Гордиенко, А.Д. Моченов и др.; Под ред. В.Н. Гордиенко и В.В. Крухмалева. – 2-е изд., испр. – М.: Горячая линия – Телеком, 2008. – 424 с: ил.

Дополнительная литература

1. Гордиенко В.Н., Тверецкий М.С. Многоканальные телекоммуникационные системы. Учебник для вузов.- М: Горячая линия -Телеком, 2005.-416 с.: ил.
2. Оптические кабели связи российского производства. Справочник./ Воронцов А.С., Гурин О.И., Мифтяхетдинов С.Х., Никольский К.К., Питерских С.Э. -М.: Эко - Трендз, 2003. -228 с.: ил.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИЗУЧЕНИЮ РАЗДЕЛОВ ДИСЦИПЛИНЫ

Дисциплина МТС раскрывает принципы построения оптических систем передачи, построения двусторонних линейных трактов волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП), методы уплотнения оптических кабелей. Рассматриваются принципы работы источников и приемников оптического излучения, требования к ним. Раскрыты вопросы модуляции и демодуляции оптической несущей. Излагаются принципы построения линейных трактов МТС и оценка их помехоустойчивости.

Структура курса МТС включает в себя следующее:

Введение

1. Принципы построения линейных трактов волоконно-оптических систем передачи
 2. Источники и приемники оптического излучения
 3. Модуляция и демодуляция оптической несущей
 4. Линейные тракты волоконно-оптических систем передачи
 5. Основы проектирования волоконно-оптических линий передачи
- Заключение

ЗАДАНИЯ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ

и методические указания к их выполнению

Целью контрольной работы является расчет следующих параметров оптического линейного тракта (ОЛТ) МТС : длины регенерационного участка $L_{ру}$, определение допустимого $t_{доп}$ и ожидаемого $t_{ож}$ быстродействия волоконно-оптической системы передачи (ЦСП), порога чувствительности приемного оптического модуля (ПРОМ) $p_{мдм}$, допустимую $p_{ош.доп}$ и ожидаемую $p_{ош.ож}$ вероятности ошибки, приходящихся на один регенерационный участок.

Исходные данные к контрольной работе приведены в табл.1. Они определяются двумя последними цифрами номера студенческого билета. Исходные данные включают в себя: протяженность линейного тракта L_t , тип МТС (табл.2) и тип оптического кабеля (табл.3).

ЗАДАНИЕ 1

1. Рассчитать длину регенерационного участка $L_{ру}$ для заданной МТС и соответствующего типа оптического кабеля.
2. Выполнить размещение необслуживаемых регенерационных пунктов по заданной длине оптического линейного тракта.

Таблица 1

Протяженность линейного тракта, L_t , км	400	500	300	700	600	550	450	600	300	350
Тип МТС	ТС-БСС 16Е1		Поликом-300Т		ТС-БСС 16Е1		"Акула"		"Акула"	
Тип оптического кабеля	ОЗКГ -1-0,7	ОЗКГ -1-1,0	ОКЛ-01-03/3,5	ОКЛ-01-03/2,0	ОЗКГ -1-1,5	ОЗКГ -1-0,7	ОКЛ-01-03/3,5	ОКЛ-01-03/2,0	ОКЛ-01-03/3,5	ОКЛ-01-03/2,0

Величина темнового тока I_n , А						$8 \cdot 10^{-9}$	$5 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-9}$	$10 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-9}$	$6 \cdot 10^{-9}$	$4 \cdot 10^{-9}$	$8 \cdot 10^{-9}$	$7 \cdot 10^{-9}$	
Номинальный уровень передачи $R_{пер}$, дБм	Номинальный уровень приема $R_{пр}$, дБм	Тип приемника-излучения и значение параметров М и х: ЛФД-лавинный фотодиод или р-і-п фотодиод			Коэффициент шума усилителя ПРОМ F _ш	Варианты										
		Тип	М	х												
-10	-39	ЛФД	99	0,4	9	00	01	02	03	04	05	06	07	08	09	
-8,0	-38	р-і-п	1	0	8	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
0,0	-40	ЛФД	80	0,7	7	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	
1,2	-42	ЛФД	90	0,5	6	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	
-1,5	-45	р-і-п	1	0	5	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	
-10	-38	р-і-п	1		4	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	
-7,5	-40	ЛФД	60	0,7	8	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	
1,0	-36	ЛФД	70	0,8	5	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	
-3,0	-45	р-і-п	1	0	6	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	
0,0	-39	р-і-п	1	0	4	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	

Таблица 2

Параметры МТС	Тип МТС			
	ТС-БСС 16Е1	Поликом-300Т	"Акула"	"Акула"
Длина волны излучения, мкм	1,3	1,55	1,3	1,55
Число каналов	480	480	1920	1920
Скорость передачи, Мбит/с	34,368	34,368	139,264	139,264
Скорость передачи в ОЛТ, Мбит/с	41,242	68,736	167,1168	167,1168
Энергетический потенциал Э, дБ	41	35	38	38
Линейный код	5В6В	2В4В	10В1Р1Р	10В1Р1Р
Допустимый коэффициент ошибки $K_{ош}$ на 1 участок регенерации	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}	10^{-10}
Расстояние между ОП(ОРП)-ОРП(ОП), км	180	200	200	300

Таблица 3

Параметры оптического кабеля	Тип оптического кабеля				
	ОЗКГ-1-0,7	ОЗКГ-1-1,0	ОЗКГ-1-1,5	ОКЛ 01-0,3/3,5	ОКЛ 01-0,3/2,0
Коэффициент затухания α , дБ/км	0,7	1,0	1,5	0,3	0,3
Дисперсия σ , пс(нм x км)				3,5	2,0
Широкополосность ΔF , МГц/км	800	800	800		

Рабочая длина волны λ , мкм	1,3	1,3	1,3	1,55	1,55
Строительная длина $L_{стр,км}$	4	4	4	4	4

3. Рассчитать распределение энергетического для регенерационного участка.

После выполнения задания дайте письменный ответ на один из сформулированных ниже вопросов (в соответствии с последней цифрой номера студенческого билета).

0. От чего зависит уровень средней оптической мощности на выходном оптическом разъеме передающего оптического модуля (ПОМ)?

1. Что такое энергетический потенциал ВОСП и от чего он зависит?

2. Изобразите обобщенную структурную схему ПОМ и укажите назначение основных ее элементов.

3. Основные виды модуляции оптической несущей, их физическая сущность.

4. От чего зависит длина волны оптического излучения ПОМ? Основные параметры источников оптического излучения.

5. Принцип работы светоизлучающего диода (СИД), классификация СИД.

6. Принцип работы полупроводникового лазерного диода (ПЛД), классификация ПЛД.

7. Изобразите обобщенную схему приемного оптического модуля (ПРОМ). Основные параметры приемников оптического излучения.

8. Принцип работы фотодетектора на основе *p-i-n* фотодиода.

9. Принцип работы фотодетектора на основе лавинного фотодиода (ЛФД).

Методические указания к выполнению первого задания и краткая теория вопроса

1. Определение длины регенерационного участка оптического линейного тракта

Длина регенерационного участка (РУ) $L_{ру}$ цифровой волоконно-оптической системы передачи зависит от многих факторов, важнейшим из которых является энергетический потенциал \mathcal{E} (см. табл. 2), в самом общем случае равный:

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

Где, $p_{пер}$ - абсолютный уровень мощности оптического излучения на входе линейного оптического кабеля (ОК), дБм; $p_{пр}$ - абсолютный уровень мощности оптического излучения на входе ПРОМ; $A_{макс}$ - максимально-допустимое затухание оптического излучения в ОК, разъемных и неразъемных соединениях регенерационного участка.

Примечание: при определении энергетического потенциала ВОСП уровни передачи и приема оптического излучения следует брать из исходных данных к контрольной работе (табл.1). Энергетический потенциал заданной ВОСП (табл.2) следует использовать для предварительной оценки параметров оптического линейного тракта.

Максимальное затухание РУ определяется по следующей формуле:

$$A_{макс} = \mathcal{E} = \alpha \cdot L_{ру} + n_{нс} \cdot A_{нс} + n_{рс} \cdot A_{рс} + \mathcal{E}_0 \quad (2)$$

здесь, α - коэффициент затухания оптического кабеля. дБ/км; $L_{ру}$ - длина РУ; $n_{нс}$ - число неразъемных соединений; $A_{нс}$ - затухание неразъемного

оптического соединения, дБ; n_{pc} - число разъемных соединений; A_{pc} - затухание разъемного оптического соединения, дБ; $\mathcal{E}_3 = 3 \dots 6$ дБ - допуски на ухудшение параметров ЦСП со временем (старение, деградация, потеря прозрачности оптического волокна и др.

В формуле (2) количество неразъемных соединений на длине регенерационного участка равно:

$$n_{nc} = (L_{py} / L_{стр}) - 1 \quad (3)$$

где, L_{py} - искомая длина регенерационного участка; $L_{стр}$ - строительная длина оптического кабеля.

Подставив n_{nc} в формулу (2) и выполнив несложные преобразования, получим формулу для определения длины регенерационного участка

L_{py} :

$$L_{py} = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_3 - n_{pc} \cdot A_{pc}}{\alpha + A_{nc} / L_{стр}} \quad (4)$$

Пример 1. Требуется определить длину регенерационного участка ЦСП, работающей по кабелю типа ОЗКГ-1-0,7. Уровень передачи на выходе ПОМ равен $p_{пер} = -5$ дБм, а уровень приема на входе ПРОМ – $p_{пр} = -40$ дБм. Для данного типа кабеля коэффициент затухания $\alpha = 0,7$ дБ/км, а строительная длина $L_{стр} = 2$ км. Требуется определить длину регенерационного участка данной ЦСП.

Порядок решения:

1. По формуле (1) определяем энергетический потенциал ЦВОСП:

$$\mathcal{E} = p_{пер} - p_{пр} = -5 - (-40) = 35 \text{ дБ}$$

2. Принимаем эксплуатационный запас $\mathcal{E}_3 = 4$ дБ.

3. Считаем, что на длине регенерационного участка имеется два разъемных соединения $n_{pc} = 2$: подсоединение ПОМ к линейному оптическому кабелю и подсоединение линейного оптического кабеля к ПРОМ. Положим, что затухание разъемного соединения $A_{pc} = 0,5$ дБ.

4. Принимаем затухание неразъемного соединения $A_{nc} = 0,1$ дБ.

5. Подставив значения \mathcal{E} , \mathcal{E}_3 , n_{pc} и A_{pc} , A_{nc} и $L_{стр}$ в формулу (4), получим:

$$L_{py} = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_3 - n_{pc} \cdot A_{pc}}{\alpha + A_{nc} / L_{стр}} = \frac{35 - 4 - 2 \cdot 0,5}{0,7 + 0,1/2} = 40,12 \text{ км}$$

На длину регенерационного участка влияет величина дисперсии оптического волокна (ОВ). Предельная длина регенерационного участка с учетом дисперсии ОВ определяется по следующей формуле:

$$L_{руд} = 0,25 / \sigma_{ов} \cdot V \quad (5)$$

где, $\sigma_{ов}$ - дисперсия оптического волокна (см. табл. 3); V - скорость передачи цифрового потока, соответствующая линейному коду ЦВОСП. Если задана широкополосность ОВ, то величин $\sigma_{ов}$ равна:

$$\sigma_{ов} = 0,25 / \Delta F$$

Здесь, ΔF - коэффициент широкополосности ОВ, $Гц \cdot км$ (берется из табл. 3). Подставив значение $\sigma_{ов}$ в (5), получим:

$$L_{руд} = \Delta F / V \quad (6)$$

Для одномодовых ОВ в паспортных данных (табл.3) указывается нормированная

среднеквадратическая дисперсия σ , $нс/нм \cdot км$, которая связана с $\sigma_{об}$ соотношением вида:

$$\sigma_{об} = 10^{-12} \cdot \Delta\lambda \cdot \sigma \quad (7)$$

где, $\Delta\lambda$ - ширина полосы оптического излучения, нм, определяемая из справочных данных соответствующего источника оптического излучения.

Для светоизлучающих диодов $\Delta\lambda = 25 \dots 40$ нм и для полупроводниковых лазерных диодов $\Delta\lambda = 0,2 \dots 5$ нм.

Для рассматриваемого выше примера положим, что ЦСП позволяет организовать 480 каналов тональной частоты (или основных цифровых каналов). Скорость цифрового потока (третичного цифрового потока) на входе ПРОМ равна $C_3 = 34,368$ Мбит/с. Линейный цифровой сигнал представляет блочный код вида 5В6В. Следовательно, скорость передачи линейного цифрового потока будет равна $B = C_3 \cdot 6/5 = 34,368 \cdot 6/5 = 41,242$ Мбит/с. Подставив значения $\Delta F = 800$ МГц/км и $B = 41,242$ Мбит/с в (6), найдем длину регенерационного участка, определяемую широкополосностью или дисперсией оптического волокна

$$L_{руд} = \Delta F / B = 800 / 41,242 = 19,40 \text{ км}$$

Если длина регенерационного участка, определенная по формулам (4) или (6), оказывается меньше длины регенерационного участка, определенного по формуле (4), то выбирают длину регенерационного участка, определенного по формулам (5) или (6). В противном случае следует выбрать оптический кабель с другой широкополосностью или с другой величиной дисперсии.

Пример 2. Определить длину регенерационного участка для ЦСП типа "Акула", если известно, что ее энергетический потенциал $\mathcal{E} = 38$ дБ, система работает по кабелю типа ОКЛ 01-0,3/3,5 (см. табл.3). Примем эксплуатационный запас $\mathcal{E}_3 = 6$ дБ. Число разъемных соединений на регенерационном участке $n_{рс} = 2$. Затухание одного разъемного соединения $A_{рс} = 0,5$ дБ, затухание одного неразъемного соединения $A_{нс} = 0,1$ дБ. Скорость передачи линейного цифрового сигнала равна $B = 167,1168$ Мбит/с или $B = 167,1168 \cdot 10^6$ бит/с.

Порядок решения:

1. Подставив в формулу (4) исходные данные, получим:

$$L_{ру} = \frac{\mathcal{E} - \mathcal{E}_3 - n_{рс} \cdot A_{рс}}{\alpha + A_{нс} / L_{сmp}} = \frac{38 - 6 - 2 \cdot 0,5}{0,35 + 0,1/2} = 77,73 \text{ км}$$

2. Определим длину регенерационного участка с учетом дисперсионных свойств ОВ. Для чего по формуле (8) найдем среднеквадратическое значение дисперсии, положив в ней $\Delta\lambda = 2,6$ нм и $\sigma = 3,5$ пс/нм · км (табл.3):

$$\sigma_{ос} = 10^{-12} \cdot \Delta\lambda \cdot \sigma = 10^{-12} \cdot 2,6 \cdot 3,5 = 9,1 \cdot 10^{-12} \text{ с/км}$$

3. По формуле (5) найдем длину регенерационного участка:

$$L_{руд} = 0,25 / \sigma_{ос} \cdot B = 0,25 / 9,1 \cdot 10^{-12} \cdot 167,1168 \cdot 10^6 = 164 \text{ км}$$

Выбирается длина регенерационного участка, определяемая затуханием оптического кабеля, т.е. $L_{ру} = 77,73$ км.

Полученные по формулам (4) и (6) длины регенерационных участков условно можно назвать **номинальными** $L_{ру ном}$.

Примечание. Значения величин $A_{рс}$, $A_{нс}$, $\Delta\lambda$, \mathcal{E}_3 и др. следует выбирать в пределах, указанных в методических рекомендациях, в приведенных примерах и в справочной литературе (в последнем случае обязательно сделать ссылку).

Для полученного значения длины регенерационного участка определяются основные параметры оптического линейного тракта: быстродействие, порог

чувствительности ПРОМ, допустимая и ожидаемая вероятность ошибки или величина коэффициента ошибки.

Расчитанное значение номинальной и максимальной длин регенерационных участков используются при размещении необслуживаемых регенерационных пунктов (НРП) по длине оптического линейного тракта. При этом реальная длина регенерационного участка L_{py} должна отвечать условию:

$$L_{py} \leq L_{py.макс} \quad (8)$$

2. Размещение необслуживаемых регенерационных пунктов по длине линейного оптического тракта

Для заданной длины оптического линейного тракта (ОЛТ) $L_{олт}$ (см. исходные данные, табл. 1) выполняется размещение регенерационных пунктов, число которых определяется по формуле:

$$N_{рп} = \lceil [(L_{олт}/L_{py.ном}) - 1] \rceil \quad (9)$$

здесь, символ \lceil означает округление в сторону ближайшего большего целого числа.

Пример 3. Выполнить размещение регенерационных пунктов для ОЛТ, длина которого равна $L_{олт} = 480$ км, а номинальная длина регенерационного участка $L_{py.ном} = 77,75$ км (см. Пример 2).

Порядок решения:

1. По формуле (13) определим число регенерационных пунктов:

$$N_{рп} = \lceil [(L_{олт}/L_{py.ном}) - 1] \rceil = \lceil [(480/77,75) - 1] \rceil = 6$$

2. Число регенерационных участков на длине ОЛТ определяется по формуле:

$$N_{py} = N_{рп} + 1 \quad (10)$$

Для нашего примера число регенерационных участков будет равно:

$$N_{py} = N_{рп} + 1 = 6 + 1 = 7$$

3. Регенерационные пункты обычно стремятся разместить по длине ОЛТ равномерно. Для чего необходимо определить среднюю длину регенерационного участка по формуле:

$$L_{py.ср} = L_{олт}/N_{py} \quad (11)$$

Для нашего примера средняя длина регенерационного участка будет равна:

$$L_{py.ср} = L_{олт}/N_{py} = 480/7 = 68,6 \text{ км}$$

Длина регенерационного участка должна удовлетворять условию (8), т.е. быть меньше или равной максимальной.

Если *возможно уменьшение числа регенерационных пунктов*, то, возможен иной выбор средней длины регенерационного участка, приближая ее к максимальной длине регенерационного участка. В этом случае следует выбрать то максимальное значение длины регенерационного участка, при котором обеспечивается уменьшение числа регенерационных пунктов. Для этого в формулу (9) вместо $L_{py.ном}$ подставим $L_{py.макс}$ и получим минимальное значение числа регенерационных пунктов $N_{рп.мин}$:

$$N_{рп.мин} = \lceil [(L_{олт}/L_{py.макс}) - 1] \rceil = \lceil [(480/102,75) - 1] \rceil = 4$$

Число регенерационных участков будет на единицу больше, т.е. $N_{py.мин} = 5$, а расчетная длина регенерационного участка по формуле (11) будет равна:

$$L_{py.рас} = L_{олт}/N_{py.мин} = 480/5 = 96 \text{ км}$$

Примерная схема размещения регенерационных участков приведена на рис 1.

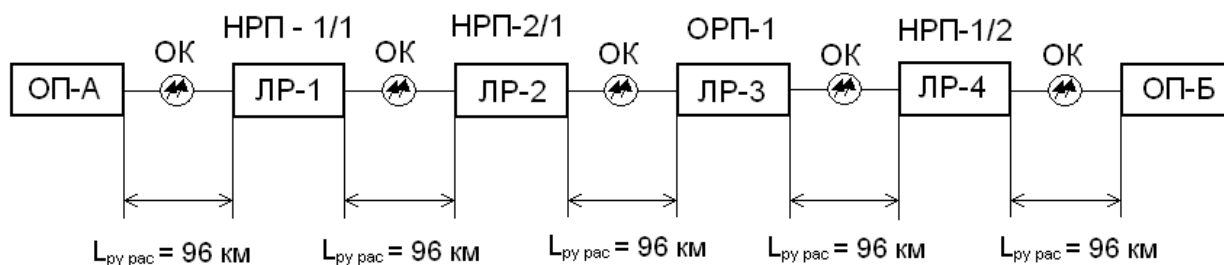


Рис.1. Схема размещения линейных регенерационных пунктов по оптическому линейному тракту

где приняты следующие обозначения: ОП-А - оконечный пункт А; ОК -оптический кабель; ЛР - линейный регенератор; НРП-1/1 - необслуживаемый регенерационный пункт №1 1-ой секции регулирования (ОП-А-ОРП-1); НРП-1/2 - необслуживаемый регенерационный пункт №1 на 2-ой секции регулирования (ОРП-1-ОП-Б); цифра в числителе означает номер НРП на секции регулирования, цифра в знаменателе означает номер секции регулирования; ОРП-1 номер обслуживаемого регенерационного пункта на длине ОЛТ; ОПБ-Б оконечный пункт Б.

Для расчетной длины регенерационного участка выполнить расчет энергетического потенциала.

3. Расчет распределения энергетического потенциала по длине регенерационного участка

Уровень оптической мощности сигнала, поступающего на вход ПРОМ линейного регенератора, зависит от энергетического потенциала ВОСП, потерь мощности в ОВ, потерь мощности оптического излучения в разъемных и неразъемных соединениях. Перед выполнением расчетов рекомендуется составить таблицу (например, табл. 4) с исходными данными для расчета распределения энергетического потенциала по длине регенерационного участка. Эта таблица включает в себя следующие параметры регенерационного участка: уровни мощности оптического сигнала $r_{пер}$ на входе разъемного соединения ПОМ, коэффициент затухания оптического кабеля α , минимальный уровень мощности $r_{пр}$ на выходе разъемного соединения ПРОМ, энергетический потенциал ВОСП Э, строительную длину оптического кабеля $L_{стр}$; количество строительных длин $n_{стр}$; количество разъемных соединителей $n_{рс}$ на регенерационном участке; количество неразъемных соединителей $n_{нс}$ на регенерационном участке; затухание оптического сигнала на разъемном соединителе $A_{рс}$; затухание оптического сигнала на неразъемном соединителе $A_{нс}$.

Пример 4. Рассчитать распределение энергетического потенциала на длине регенерационного участка для ЦСП, технические параметры которой приведены в табл. 4.

Таблица 4

№№ п/п	Параметры	Обозначения	Единицы измерений	Значение параметра
1	Уровень мощности передачи оптического сигнала	$r_{пер}$	дБм	-4
2	Минимальный уровень мощности приема	$r_{пр}$	дБм	-35
3	Энергетический потенциал ЦВОСП	Э	дБ	31
4	Длина регенерационного участка	$L_{ру}$	км	24
5	Строительная длина оптического кабеля	$L_{стр}$	км	4
6	Количество строительных длин	$n_{стр}$	-	6

7	Количество разъемных соединений	$n_{стр}$	-	2
8	Затухание оптического сигнала на неразъемном соединителе	$A_{рс}$	дБ	0,5
9	Количество неразъемных соединений	$n_{нс}$	-	7
10	Затухание оптического сигнала на неразъемном соединителе	$A_{нс}$	дБ	0,1
11	Коэффициент затухания ОК	α	дБ/км	0,7

Порядок решения:

Определяем уровень сигнала после первого разъемного соединения (РС):

$$p_{p1} = p_{пер} - A_{рс} = -4 - 0,5 = -4,5 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после первого неразъемного соединителя (НС) стационарного оптического кабеля и линейного оптического кабеля будет равен:

$$p_{n1} = p_{p1} - A_{нс} = -4,5 - 0,1 = -4,6 \text{ дБм}$$

Далее сигнал проходит по строительной длине $L_{стр} = 4$ км линейного оптического кабеля с коэффициентом затухания $\alpha = 0,7$ дБ/км и уровень сигнала на входе второго НС через 4 км будет равен:

$$p_{n2вх} = p_{n1} - \alpha \cdot L_{стр} = -4,6 - 0,7 \cdot 4 = -7,4 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после второго НС будет равен:

$$p_{n2} = p_{n2вх} - 0,1 = -7,4 - 0,1 = -7,5 \text{ дБм.}$$

Уровень сигнала после прохождения по второй строительной длине на входе третьего НС будет равен:

$$p_{n3вх} = p_{n2} - \alpha \cdot L_{стр} = -7,5 - 0,7 \cdot 4 = -10,3 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после третьего НС будет равен:

$$p_{n3} = p_{n3вх} - 0,1 = -10,3 - 0,1 = -10,4 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после прохождения по третьей строительной длине на входе четвертого НС будет равен:

$$p_{n4вх} = p_{n3} - \alpha \cdot L_{стр} = -10,4 - 0,7 \cdot 4 = -13,2 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после четвертого НС будет равен:

$$p_{n4} = p_{n4вх} - 0,1 = -13,2 - 0,1 = -13,3 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после прохождения по четвертой строительной длине на входе пятого НС будет равен:

$$p_{n5вх} = p_{n4} - \alpha \cdot L_{стр} = -13,3 - 0,7 \cdot 4 = -16,1 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после пятого НС будет равен:

$$p_{n5} = p_{n5вх} - 0,1 = -16,1 - 0,1 = -16,2 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после прохождения пятой строительной длины на входе шестого НС будет равен:

$$p_{n6вх} = p_{n5} - \alpha \cdot L_{стр} = -16,2 - 0,7 \cdot 4 = -19,0 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после шестого НС будет равен:

$$p_{n6} = p_{n6вх} - 0,1 = -19,0 - 0,1 = -19,1 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после шестой строительной длины на входе седьмого НС будет равен:

$$p_{n7вх} = p_{n6} - \alpha \cdot L_{стр} = -19,1 - 0,7 \cdot 4 = -21,9 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала после седьмого НС или на входе второго разъемного соединения будет равен:

$$p_{n7} = p_{n7вх} - 0,1 = -21,9 - 0,1 = -22,0 \text{ дБм}$$

Уровень сигнала на выходе второго разъемного или уровень приема будет равен:

$$p_{пр} = p_{н7} - A_{нс} = -22,0 - 0,5 = -22,5 \text{ дБм}$$

Общее затухание регенерационного участка равно:

$$A_{ру} = p_{пер} - p_{пр} = -4 - (-22,5) = 18,5 \text{ дБ}$$

По результатам расчета можно сделать вывод, что затухание на регенерационном участке меньше энергетического потенциала ЦВОСП, равного $\mathcal{E} = 31 \text{ дБ}$. Эксплуатационный запас ЦВОСП можно принять равным $\mathcal{E}_3 = 6 \text{ дБ}$.

Результаты расчета распределения энергетического потенциала можно представить в виде таблицы, форму которой студент-заочник выбирает самостоятельно...

Диаграмма распределения энергетического для рассмотренного примера приведена на рис.2, где приняты следующие обозначения: ППМ - приемо передающий модуль линейного регенератора; РС - разъемное соединение; НС - неразъемное соединение; ОВ - оптическое волокно.

Поскольку все уровни передачи диаграммы распределения энергетического потенциала рассчитаны, то ее изображение возможно в условном масштабе, как это сделано на рис. 1, но с обязательным указанием характерных основных точек диаграммы.

Диаграмма распределения энергетического потенциала служит основой для расчета основных параметров оптического линейного тракта: различного вида шумов и вероятности ошибки одиночного регенератора, расчет быстродействия ЦСП и порога чувствительности ПРОМ линейного регенератора.

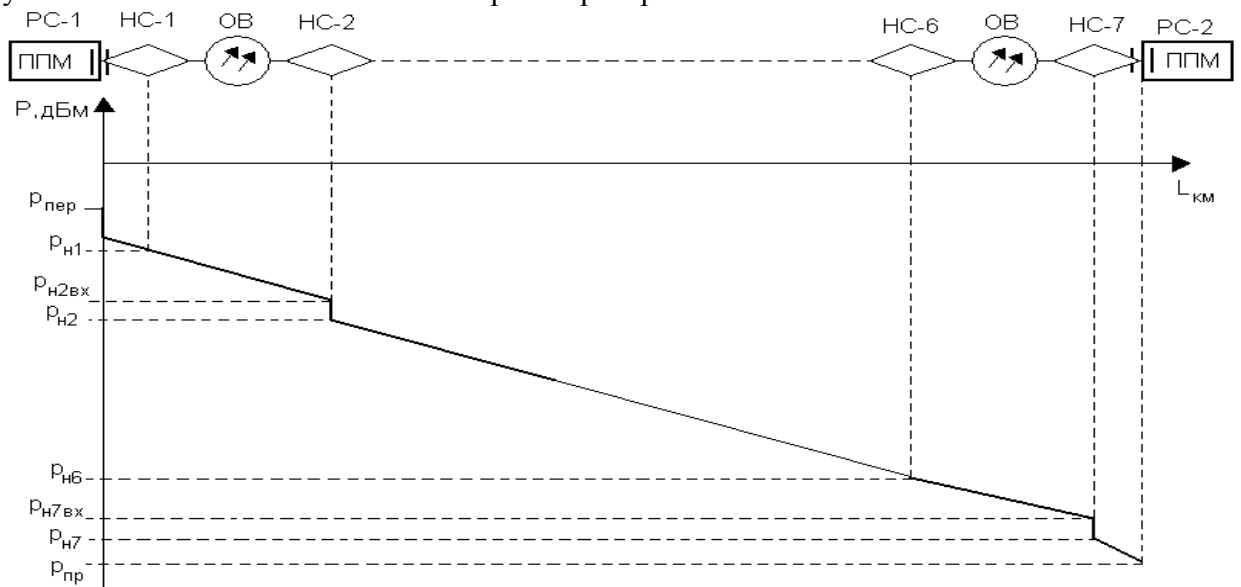


Рис.2. Диаграмма распределения энергетического потенциала

ЗАДАНИЕ 2

1. Рассчитать величину дробовых шумов, шумов темновых токов и собственных шумов приемного оптического модуля линейного регенератора.

2. Рассчитать допустимую и ожидаемую величину вероятности (коэффициента) ошибки одиночного регенератора.

После выполнения задания дайте письменный ответ на один из сформулированных ниже вопросов (в соответствии с последней цифрой номера студенческого билета):

0. Дать краткую характеристику основных шумов передающего оптического модуля.

1. Физическая сущность дробовых шумов p-i-n и лавинных фотодиодов и их оценка.

2. Физическая сущность шумов темновых токов фотодиодов и их оценка.

3. Тепловые шумы элементов ПРОМ и их оценка.

4. Собственные шумы ПРОМ и их оценка. Физическая сущность коэффициента шума.

5. Изложите алгоритм последовательности выбора передающего оптического модуля.

6. Изложите алгоритм последовательности выбора приемного оптического модуля.

7. Изложите алгоритм последовательности выбора оптического кабеля.

8. Дайте краткую характеристику основным параметрам оптического линейного тракта и их физическую сущность.

Типы линейных кодов ЦВОСП и принципы их формирования.

Методические указания к выполнению второго задания и краткая теория вопроса

1. Расчет шумов оптического линейного тракта

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 размещение регенерационных пунктов неравномерное).

Для определения шумов ПРОМ составляется расчетная схема регенерационного участка (см.рис.2) и по формуле (2) ЗАДАНИЯ 1 рассчитывается затухание регенерационного участка.

Пример 5. Для условий задачи Примера 4 (ЗАДАНИЯ 1) определить шумы фотодетектора ПРОМ регенерационного участка соответствующей структуры, рис. 2.

Порядок решения:

1. Определим затухание регенерационного участка, полагая эксплуатационный $\mathcal{E}_3 = 6$ дБ. Подставив в (2) данные из табл. 4 ЗАДАНИЯ 1, получим:

$$A_{py} = \alpha \cdot L_{py} + n_{nc} \cdot A_{nc} + n_{pc} \cdot A_{pc} + \mathcal{E}_3 = 0,7 \cdot 24 + 7 \cdot 0,1 + 2 \cdot 0,5 + 6 = 24,5 \text{ дБ.}$$

2. Определим мощность оптического излучения на выходе ПОМ по формуле:

$$W_{пер} = 10^{0,1 \cdot P_{пер}} \quad (12)$$

здесь, $P_{пер}$ - уровень передачи оптического излучения (берется из технических данных ЦВОСП). Подставив в (12) значение $p_{пер}$ из табл.4, получим:

$$W_{пер} = 10^{0,1 \cdot p_{пер}} = 10^{-0,4} = 0,398 \text{ мВт}$$

3. Определим мощность оптического излучения на входе приемопередающего модуля (ППМ) линейного регенератора, рис.2, по формуле:

$$W_{пр} = W_{пер} \cdot 10^{0,1 \cdot A_{py}} \quad (13)$$

здесь, $W_{\text{пер}}$ - мощность оптического излучения на выходе ПОМ, см (16); A_{py} - затухание регенерационного участка (см. выше). Подставив в (13) значения $W_{\text{пер}} = 0,398$ мВт и $A_{\text{py}} = 24,5$ дБ, получим:

$$W_{\text{пр}} = W_{\text{пер}} \cdot 10^{-0,1 \cdot A_{\text{py}}} = 0,398 \cdot 10^{-0,1 \cdot 24,5} = 0,0014 \text{ мВт} = 0,0014 \cdot 10^{-3} \text{ Вт.}$$

При выполнении дальнейших расчетов обращайтесь внимание на размерности величин, входящих в расчетные, и их порядки!

Поскольку электрический сигнал на выходе фотодетектора ППМ является случайной величиной, то его величина оценивается *среднеквадратическим* значением тока, величина которого определяется по формуле:

$$\bar{I}_c^2 = 0,5 \cdot (0,8 \cdot \eta \cdot \lambda \cdot W_{\text{пр}})^2 \cdot M^2 \quad (14)$$

где, $\eta = 0,8 \dots 0,9$ - квантовая эффективность фотодиода (выбирается студентов в заданных пределах); λ - длина волны оптического излучения (берется из табл.1. Исходные данные), мкм; $W_{\text{пр}}$ - мощность оптического излучения на входе фотодетектора ППМ (определяется по формуле 17), Вт; M - коэффициент лавинного умножения лавинного фотодиода (ЛФД), значение которого берется из табл. 1 (для p-i-n фотодиода $M=1$).

4. По формуле (14) для примера 5 определим среднеквадратическое значение тока полезного сигнала, подставив в нее значение $W_{\text{пр}}$ и в ней положив $\eta = 0,8$ и $\lambda = 1,31$ мкм; $M = 100$ (т.е. фотодетектор ППМ выполнен на основе лавинного фотодиода)

$$\begin{aligned} \bar{I}_c^2 &= 0,5 \cdot (0,8 \cdot \eta \cdot \lambda \cdot W_{\text{пр}})^2 \cdot M^2 = \\ &= 0,5 \cdot (0,8 \cdot 0,8 \cdot 1,31 \cdot 0,0014 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 100^2 = 68,9 \cdot 10^{-10} \text{ А}^2 \end{aligned}$$

Основными шумами на выходе фотодетектора ППМ (или ПРОМ) являются следующие шумы.

Дробовые шумы, которые оцениваются среднеквадратическим значением:

$$\bar{I}_{\text{др}}^2 = 2 \cdot e \cdot (0,8 \cdot \eta \cdot \lambda \cdot W_{\text{пр}})^2 \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B = 4 \cdot I_c^2 \cdot F(M) \cdot B \quad (15)$$

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

$$F(M) = M^x, 0,4 \leq x \leq 1 \quad (16)$$

значения M и x берутся из табл. 1; B - скорость передачи, бит/с.

5. Для рассматриваемого примера 4 определим величину коэффициента шума ЛФД, подставив в (16) значения $M = 100$ и $x=0,8$, получим :

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

6. Подставив в формулу (15) значения $\bar{I}_c^2 = 68,9 \cdot 10^{-10}$ А, $F(M) = 39,8$, величину заряда электрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ Кл и $B = 41,242 \cdot 10^6$ бит/с и, определим величину дробовых шумов:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\text{др}}^2 &= 4 \cdot e \cdot \bar{I}_c^2 \cdot F(M) \cdot B = \\ &= 4 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 68,9 \cdot 10^{-10} \cdot 39,8 \cdot 41,242 \cdot 10^6 = 7,25 \cdot 10^{-18} \text{ А}^2 \end{aligned}$$

Темновые шумы, возникающие независимо от внешнего оптического сигнала из-за случайной тепловой генерации носителей под воздействием *фонового* излучения, не связанного с полезным сигналом, и среднеквадратическое значение которых равно:

$$\bar{I}_t^2 = 2 \cdot e \cdot \bar{I}_t \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot B \quad (17)$$

здесь, \bar{I}_T - среднее значение темнового тока, величина которого для германиевых фотодиодов равна $(1... 8) \cdot 10^{-7} \text{ А}$, а для кремниевых - $(1... 8) \cdot 10^{-9} \text{ А}$.

7. Для рассматриваемого примера 4 определим величину темновых шумов, подставив в (17) значения заряда электрона $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, величину темнового тока $\bar{I}_T = 5 \cdot 10^{-7}$ (для выполнения контрольной работы значения темнового тока берутся из исходных данных табл.1), величины $M=100$ и $F(M) = 39,8$, скорость передачи линейного цифрового сигнала $V = 41,242 \cdot 10^6 \text{ бит/с}$:

$$\begin{aligned} \bar{I}_T^2 &= 2 \cdot e \cdot \bar{I}_T \cdot M^2 \cdot F(M) \cdot V = \\ &= 2 \cdot 1,602 \cdot 10^{-19} \cdot 5 \cdot 10^{-7} \cdot 100^2 \cdot 41,242 \cdot 10^6 = 6,61 \cdot 10^{-14} \text{ А}^2 \end{aligned}$$

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

$$\bar{I}_{\text{сш}}^2 = 4 \cdot k \cdot T \cdot F_{\text{ш}} \cdot V / R_{\text{вх}} \quad (18)$$

где, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}$ – постоянная Больцмана; T - температура по шкале Кельвина; $F_{\text{ш}}$ - коэффициент шума предварительного усилителя ППМ или ПРОМ; $R_{\text{вх}}$ - входное сопротивление предварительного усилителя ППМ или ПРОМ, равная $1... 5 \text{ МОм}$ (при выполнении контрольной работы значение $R_{\text{вх}}$ выбирается в указанных пределах).

8. Для рассматриваемого примера 4 определим величину собственных шумов, положив $T=300^\circ\text{К}$, $F_{\text{ш}} = 8$, $V = 41,242 \cdot 10^6 \text{ бит/с}$ и $R_{\text{вх}} = \text{Ом}$. Подставив численные значения величин в (18), получим:

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\text{сш}}^2 &= 4 \cdot k \cdot T \cdot F_{\text{ш}} \cdot V / R_{\text{вх}} = \\ &= 4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300 \cdot 10 \cdot 41,242 \cdot 10^6 / 10^6 = 68,83 \cdot 10^{-18} \text{ А}^2 \end{aligned}$$

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

Среднеквадратическое значение токов суммарных шумов будет равно:

$$\bar{I}_{\text{ш}}^2 = \bar{I}_{\text{др}}^2 + \bar{I}_T^2 + \bar{I}_{\text{сш}}^2 \quad (19)$$

9. Для примера 4 сумма среднеквадратических значений токов шумов различного происхождения получится после подстановки в (19):

$$\begin{aligned} \bar{I}_{\text{др}}^2 &= 7,25 \cdot 10^{-18} \text{ А}^2, \bar{I}_T^2 = 6,61 \cdot 10^{-14} \text{ А}^2 \text{ и } \bar{I}_{\text{сш}}^2 = \text{А}^2 \\ \bar{I}_{\text{ш}}^2 &= \bar{I}_{\text{др}}^2 + \bar{I}_T^2 + \bar{I}_{\text{сш}}^2 = \\ &= 7,25 \cdot 10^{-18} + 6,61 \cdot 10^{-14} + 68,83 \cdot 10^{-18} = 6,62 \cdot 10^{-14} \text{ А}^2 \end{aligned}$$

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

2. Расчет вероятности или коэффициента ошибки одиночного регенератора

Расчет допустимой вероятности ошибки

Первоначально рассчитывается *допустимая вероятность ошибки* $P_{\text{ош, доп}}$, приходящаяся на один регенерационный участок, исходя из норм на различные участки первичной сети: магистральной, внутризонавой, местной. Если в исходных данных задана ЦСП типа ТС-БСС 16Е1 или Поликом-300Т, то следует пользоваться нормами, приходящимися на внутризонавые первичные сети; если задана ВОСП типа "Акула", то следует пользоваться нормами, приходящимися на магистральные первичные сети. Эти нормы приведены в табл.5.

Таблица 5

Допустимая вероятность ошибки, приходящаяся на один километр	Тип участка первичной сети		
	Магистральная	Внутризоновая	Местная
$p_{\text{ош.км.}} \text{ 1/км}$	10^{-11}	$1,67 \cdot 10^{-10}$	10^{-9}

Допустимая вероятность одной регенерационной ошибки определяется по формуле:

$$p_{\text{ош.доп}} = p_{\text{ош.км}} \cdot L_{\text{py}} \quad (20)$$

где, $p_{\text{ош км}}$ - вероятность ошибки, приходящаяся на 1 километр линейного тракта; L_{py} - длина регенерационного участка, км.

Если длина оптического линейного тракта равна L_{T} , то общая допустимая вероятность ошибки равна:

$$p_{\text{доп}} = p_{\text{ош.км}} \cdot L_{\text{T}} = p_{\text{ош.доп}} \cdot n_{\text{py}} \quad (21)$$

здесь, $n_{\text{py}} = L_{\text{T}} / L_{\text{py}}$ - число регенерационных участков.

Пример 6. Рассчитать допустимую вероятность ошибки для ЦСП *внутризоновой первичной сети* примера 4, приняв длину оптического линейного тракта $L_{\text{T}} = 552$ км и длину регенерационного участка $L_{\text{py}} = 24$ км.

Порядок решения:

Подставив в формулу (20) значение $p_{\text{ош.доп}} = 1,67 \cdot 10^{-10}$ (см. табл.5) и $L_{\text{py}} = 24$ км, получим **допустимую вероятность ошибки одиночного регенератора:**

$$p_{\text{ош.доп}} = p_{\text{ош.км}} \cdot L_{\text{py}} = 1,67 \cdot 10^{-10} \cdot 24 = 40 \cdot 10^{-10} = 0,4 \cdot 10^{-8}$$

Для линейного тракта длиной $L_{\text{T}} = 552$ км допустимая вероятность ошибки определится по формуле (21), если в нее подставить $p_{\text{ош.доп}} = 40,1 \cdot 10^{-10}$ или $n_{\text{py}} = 552/24 = 23$, т.е.:

$$p_{\text{доп}} = p_{\text{ош.км}} \cdot L_{\text{T}} = 1,67 \cdot 10^{-10} \cdot 552 = 40,1 \cdot 10^{-10} \cdot 552/24 = 0,92 \cdot 10^{-7}$$

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, которая равна:

$$A_{\text{з.ож}} = 10 \lg(\bar{I}_{\text{с}}^2 / \bar{I}_{\text{ш}}^2) \quad (23)$$

здесь, $\bar{I}_{\text{с}}^2$ - среднеквадратическое значение тока на выходе ППМ или ПРОМ, определяемой по формуле (18); $\bar{I}_{\text{ш}}^2$ - суммарное среднеквадратическое значение токов дробовых, темновых и собственных шумов, определяемой по формулам (19), (15), (17) и (18).

Вероятность ошибки одиночного регенератора (ожидаемая, допустимая) p_{r} может быть получена из данных табл. 6 соответствующим интерполированием.

Таблица 6

$P_{\text{ож}}$	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}	10^{-11}	10^{-12}
$A_{\text{з}}, \text{ дБ}$	18,8	19,7	20,5	21,1	21,7	22,2	22,6	23

Как следует из табл.6 величина допустимой защищенности одиночного регенератора для примера должна отвечать условию $A_{з,доп} \geq 20,8$ дБ (определяется линейным интерполированием на интервале 20,5... 21,1).

Пример 7. Определить ожидаемую вероятность ошибки одиночного регенератора для исходных данных примеров 4 и 5.

Порядок решения:

Подставив в формулу (23) значение:

$$\bar{I}_c^2 = 68,9 \cdot 10^{-10} \text{ A}^2 \text{ и } \bar{I}_{ш}^2 = 6,62 \cdot 10^{-14} \text{ A}^2$$

(из примера 5), получим:

$$A_{з,ож} = 10 \lg(\bar{I}_c^2 / \bar{I}_{ш}^2) = 10 \lg(68,9 \cdot 10^{-10} / 6,62 \cdot 10^{-14}) = 50,2 \text{ дБ}$$

Так как ожидаемая защищенность больше защищенности допустимой, т.е. $A_{з,ож} \geq A_{з,доп}$, то ожидаемая вероятность ошибки будет меньше допустимой и, следовательно, энергетический потенциал ЦСП распределен правильно.

Для ожидаемой защищенности $A_{з,ож} = 50,2$ дБ, как следует из табл.6, ожидаемая вероятность ошибки менее 10^{-12} и для числа регенерационных участков $n_{рв} = 23$ ожидаемая вероятность ошибки будет менее $p_{доп} = 0,92 \cdot 10^{-7}$, т.е. условие (22) выполняется. Следовательно, размещение регенерационных пунктов и использование энергетического потенциала ЦВОСП выполнены, верно.

ЗАДАНИЕ 3

1. Рассчитать быстродействие волоконно-оптической линии (ЦСП).

2. Рассчитать порог чувствительности приемного оптического модуля.

После выполнения дайте письменный ответ на один из сформулированных вопросов (в соответствие с последней цифрой номера студенческого билета):

0. Объяснить физическую сущность понятий "минимально-детектируемая мощность (МДМ)" и "квантовый предел". Связь между ними.

1. Физическая сущность параметра ВОЛП "быстродействие", от чего зависит этот параметр?

2. Обобщенная структурная схема ВОСП, назначение ее основных элементов.

3. Классификация ВОСП.

4. Принципы построения двусторонних линейных трактов ВОСП.

5. Методы уплотнения волоконно-оптических линий связи.

6. Обобщенная структурная схема оптического линейного тракта. Назначение ее основных элементов.

7. Классификация ретрансляторов волоконно-оптических систем передачи.

8. Оценка качества работы регенератора с помощью "глаз-диаграмм".

9. Эквивалентная схема ПРОМ для определения различного вида шумов.

Методические указания к выполнению третьего задания и краткая теория вопроса

1. Расчет быстродействия ВОЛП

Быстродействие ВОЛП определяется инертностью элементов волоконно-оптической системы передачи и дисперсионными свойствами оптического волокна. Расчет

быстродействия сводится к определению *допустимого быстродействия*, *ожидаемого быстродействия* и их сравнения.

Допустимое быстродействие цифровых ВОЛП зависит от характера передаваемого сигнала, скорости передачи линейного цифрового сигнала и определяется по формуле:

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

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 цифрового линейного тракта.

Общее *ожидаемое* быстродействие ВОЛП (как совокупности волоконно-оптической системы передачи и оптического кабеля) равно:

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

где $t_{\text{пер}}$ - быстродействие передающего оптического модуля (ПОМ), зависящее от скорости передачи информации и типа источника излучения; $t_{\text{пр}}$ - быстродействие приемного оптического модуля (ПРОМ), определяемое скоростью передачи информации и типом фотодетектора; $t_{\text{ов}}$ - уширение импульса оптического излучения импульса при его прохождении по оптическому волокну оптического кабеля (ОК) регенерационного участка, которое равно:

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

здесь, $\sigma_{\text{ов}}$ - дисперсия оптического волокна, определяемая по формуле (8).

Быстродействие ПОМ и ПРОМ для типовых скоростей передачи ЦВОСП приведены в табл. 7 (при выполнении задания следует брать значения, соответствующие типовым цифровым потокам, передаваемым с помощью заданной в табл.1 ЦВОСП).

Таблица 7

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 $t_{\text{ож}\Sigma} < t_{\text{доп}\Sigma}$, то выбор типа кабеля и длины регенерационного участка выполнены верно. Величина $t_{\text{доп}\Sigma} - t_{\text{ож}\Sigma} = \Delta t$ называется *запасом по быстродействию*. При достаточно большом его значении можно ослабить требования к компонентам ВОСП. Если условие $t_{\text{ож}\Sigma} < t_{\text{доп}\Sigma}$ не выполняется, то следует выбрать ПОМ, ПРОМ и ОК с другим и параметрам и.

Пример8. Определить быстродействие ЦСП, если длина регенерационного участка $L_{\text{ру}} = 80$ км, среднеквадратическое значение дисперсии $\sigma_{\text{ов}} = 9,1 \cdot 10^{-3}$ нс/км. Система передачи типа "Акула", для которой скорость информационного потока $B = 140$ Мбит/с, линейный код типа (см. табл. 2).

Порядок решения:

1. По формуле (24) найдем значение допустимого быстродействия $t_{\text{доп}\Sigma}$, положив в ней $\beta = 0,35$, так как используется линейный код типа 10В1Р1R, и $B = 140$ Мбит/с:

$$t_{\text{доп}\Sigma} = \beta / B = 0,35 / 140 = 2,5 \text{нс.}$$

2. Подставив в формулу (26) значения $\sigma_{\text{ов}} = 9,1 \cdot 10^{-3}$ нс /км и $L_{\text{ру}} = 80$ км, найдем величину уширения импульса на длине регенерационного участка:

$$t_{\text{ов}} = \sigma_{\text{ов}} \cdot L_{\text{пу}} = 9,1 \cdot 10^{-3} \cdot 80 = 0,728 \text{ нс}$$

3. По формуле (25) найдем ожидаемую величину быстродействия $t_{\text{ож.}\Sigma}$, подставив в нее значения $t_{\text{пер}} = 0,5$ нс, $t_{\text{пр}} = 0,4$ нс и $t_{\text{ов}} = 0,728$ нс, получим:

$$t_{\text{ож.}\Sigma} = \sqrt{t_{\text{пер}}^2 + t_{\text{пр}}^2 + t_{\text{ов}}^2} = 0,5 + 0,4 + 0,728 = 1,628 \text{ нс}$$

Сравнение полученных значений $t_{\text{ож.}\Sigma}$ и $t_{\text{доп.}\Sigma}$ показывает, что условие $\Delta t = t_{\text{доп.}\Sigma} - t_{\text{ож.}\Sigma} = 2,5 - 1,628 = 0,872$ нс выполняется. Это условие будет выполняться, если использовать $V = 168$ Мбит/с, соответствующее скорости пере дачи линейного цифрового сигнала. При выполнении контрольной работы это следует обязательно проверить.

2. Расчет порога чувствительности ПРОМ

Одной из основных характеристик приемника оптического излучения является его чувствительность, т.е. минимальная детектируемая (обнаруживаемая) мощность (МДМ) оптического сигнала длительностью $\tau = 1/B$ (здесь B - скорость передачи линейного цифрового сигнала, при которой обеспечиваются заданные значения вероятности ошибки или защищенности (или отношения сигнал/шум).

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

$$p_{\text{мин}} \begin{cases} -55 + 11 \lg B & \text{при } B < 50 \text{ Мбит/с} \\ -55 + 10 \lg B & \text{при } B > 50 \text{ Мбит/с} \end{cases} \quad (27)$$

для p-i-n фотодиодов и

$$p_{\text{мин}} \begin{cases} -70 + 10,5 \lg B & \text{при } B < 50 \text{ Мбит/с} \\ -70 + 10 \lg B & \text{при } B > 50 \text{ Мбит/с} \end{cases} \quad (28)$$

для лавинных фотодиодов (ЛФД).

Зная абсолютный уровень МДМ $p_{\text{мин}}$ и уровень передачи ПОМ, можно получить приближенную оценку энергетического потенциала ВОСП:

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = p_{\text{пер}} - p_{\text{мин}}, \text{ дБ} \quad (29)$$

Пример 9. Определить уровень минимально детектируемой мощности $p_{\text{мин}}$ для ЦВОСП типа "Сопка - 3" (технические данные см. табл. 1).

Решение:

Для ЦСП типа "ТС-БСС 16Е1" $B = 41,242$ Мбит/с, фотодетектор реализован на основе лавинного фотодиода, $p_{\text{пер}} = -4$ дБ. Подставив значение $B = 41,242$ Мбит/с в соответствующую формулу (28), получим значение уровня МДМ:

$$p_{\text{мин}} = -70 + 10,5 \lg B = -70 + 10,5 \lg 41,242 = -53 \text{ дБ}$$

Приближенное значение энергетического потенциала будет равно (33):

$$\mathcal{E}_{\text{пр}} = p_{\text{пер}} - p_{\text{мин}} = -4 - (-53) = 49 \text{ дБ}$$

Полученное значение энергетического потенциала соответствует идеальному приему.

На этом выполнение контрольной работы завершается. Следует ее оформить согласно приведенным выше требованиям.

Вопросы к экзамену по дисциплине «Цифровые системы передачи»

1. Обобщенная структурная схема ОЛТ, назначение ее основных элементов и требования к ним.
2. Принципы построения двусторонних линейных трактов ЦСП.

3. Методы уплотнения волоконно-оптических линий связи: временное уплотнение, пространственное уплотнение, частотное (гетеродинное) уплотнение, спектральное уплотнение.
4. Требования к источникам оптического излучения и их основные параметры и характеристики.
5. Принцип действия некогерентных источников оптического излучения.
6. Принцип действия когерентных источников оптического излучения.
7. Принцип работы светоизлучающих диодов (СИД), их структура. Понятия о гетероструктурах. Классификация СИД.
8. Параметры и характеристики СИД. Схема источника оптического излучения на основе СИД.
9. Принцип работы источников оптического излучения на основе полупроводниковых лазерных диодов (ПЛД).
10. Основные параметры источников оптического излучения на основе ПЛД.
11. Передающие оптические модули, их основные параметры и характеристики.
12. Принцип действия полупроводниковых фотодиодов (ФД).
13. Принцип действия полупроводниковых p-i-n фотодиодов.
14. Принцип действия полупроводниковых лавинных фотодиодов (ЛФД).
15. Основные характеристики и параметры приемников оптического излучения.
16. Шумы фотодиодов, причины их возникновения и оценка.
17. Приемные оптические модули, их основные параметры и характеристики.
18. Модуляция оптической несущей, способы модуляции.
19. Прямая модуляция и демодуляция оптической несущей.
20. Способы компенсации нелинейности оптического излучателя при модуляции аналоговым сигналом.
21. Схема приема оптического излучения, промодулированного цифровым сигналом.
22. Схема непосредственного приема оптических сигналов с аналоговой модуляцией интенсивности.
23. Модуляция и демодуляция оптического излучения с использованием поднесущей частоты.
24. Структурная схема когерентной ВОСП.
25. Гетеродинное обнаружение оптического излучения. Структурная схема гетеродинного обнаружения оптического сигнала.
26. Гомодинное обнаружение оптического излучения. Структурная схема гомодинного обнаружения оптического сигнала.
27. Обобщенная структурная схема оптического линейного тракта (ОЛТ).
28. Обобщенная структурная схема ретранслятора. Классификация ретрансляторов.
29. Обобщенная структурная схема цифрового регенератора и временные диаграммы его работы.
30. Обобщенная структурная схема аналогового ретранслятора ОЛТ.
31. Необходимость линейного кодирования. Требования к линейным кодам.
32. Типы линейных кодов и принципы их формирования.
33. Шумы в оптических линейных трактах.
34. Расчет вероятности ошибки одиночного регенератора.
35. Оценка качества работы регенератора с помощью глаз-диаграммы.
36. Квантовый предел и минимально детектируемая мощность. Эквивалентная схема фотодетектора для расчета отношения сигнал/шум.
37. Ретрансляторы оптических линейных трактов: оптические усилители, оптические регенераторы, регенерация оптических сигналов на электрическом уровне. Сравнение.

Д.Н

38. Принцип спектрального уплотнения. Структурная схема
39. Преимущества технологии спектрального уплотнения
40. Технология DWDM. Схема. Принцип работы
41. Основные требования к узлам оборудования DWDM.
42. Основные узлы технологии DWDM: оптические усилители, транспондеры, оптические мультиплексоры. Схемы. Принцип работы. Д.Н.
43. Технология CWDM. Схема. Принцип работы
44. Основные требования к узлам оборудования CWDM
45. Сравнение технологий DWDM и CWDM. Область применения
46. История, состояние и перспективы развития волоконно-оптических систем передачи.