

Министерство образования Республики Беларусь
Учреждение образования
«Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники»

Факультет инфокоммуникаций

Кафедра инфокоммуникационных технологий

ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

*Рекомендовано УМО по образованию в области
информатики и радиоэлектроники в качестве пособия
для направлений специальности*

*1-45 01 01-01 «Инфокоммуникационные технологии
(системы телекоммуникаций)»,*

*1-45 01 01-03 «Инфокоммуникационные технологии
(системы телекоммуникаций специального назначения)»,*

*1-45 01 01-04 «Инфокоммуникационные технологии
(цифровое теле- и радиовещание)»,*

*1-45 01 01-06 «Инфокоммуникационные технологии
(лазерные информационно-измерительные системы)»*

УДК 621.391.6(076.5)
ББК 32.811.3я73
В68

Авторы:

В. Н. Кийко, С. А. Лукашевич, Н. В. Тарченко, В. Н. Урядов

Рецензенты:

кафедра связи учреждения образования
«Военная академия Республики Беларусь»
(протокол №12 от 13.02.2017);

доцент кафедры робототехнических систем
Белорусского национального технического университета,
кандидат технических наук, доцент Ф. Л. Сиротин

Волоконно-оптические сети. Лабораторный практикум : пособие /
В68 В. Н. Кийко [и др.]. – Минск : БГУИР, 2017. – 66 с. : ил.
ISBN 978-985-543-365-2.

Рассмотрены вопросы по измерению параметров линейного тракта цифровых волоконно-оптических транспортных систем передачи, в том числе и систем со спектральным разделением каналов. Предназначено для студентов, обучающихся по специальностям телекоммуникационного направления, может быть использовано при дипломном проектировании.

УДК 621.391.6(076.5)
ББК 32.811.3я73

ISBN 978-985-543-365-2

© УО «Белорусский государственный
университет информатики
и радиоэлектроники», 2017

СОДЕРЖАНИЕ

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1	
Измерение коэффициента ошибок в линейном оптическом тракте анализатором цифровых трактов.....	4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2	
Измерение энергетического потенциала волоконно-оптической системы передачи	16
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3	
Измерение джиттера в волоконно-оптических системах передачи	29
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4	
Изучение принципов построения и измерение параметров оптических мультиплексов CWDM	50
ЛИТЕРАТУРА.....	65

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ИЗМЕРЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ОШИБОК В ЛИНЕЙНОМ ОПТИЧЕСКОМ ТРАКТЕ АНАЛИЗАТОРОМ ЦИФРОВЫХ ТРАКТОВ

1.1 Цель работы

Измерение коэффициента ошибок в линейном оптическом тракте и оценка работоспособности тракта.

Примечание – В системе передачи должно быть обеспечено выполнение общих требований к количеству ошибок, измеренных в течение определенного интервала времени. При соблюдении этих норм система будет удовлетворять требованиям, предъявляемым к интегрированной цифровой сети (Integrated Digital Network-IDN). После устранения неисправности, или в процессе установки, или во время ввода в эксплуатацию необходимо проверить линию передачи на соответствие характеристик ошибок нормам.

1.2 Задание к работе

- 1 Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности.
- 2 Изучить причины, вызывающие появление ошибок в оптическом линейном тракте.
- 3 Изучить принцип работы прибора НР 37717С и методику по измерению коэффициента ошибок.
- 4 Изучить структурные схемы и принципы измерения коэффициента ошибок в оптическом линейном тракте.
- 5 Произвести измерения.
- 6 Сделать выводы о проделанной работе и составить отчет.

1.3 Описание лабораторного макета

Структурная схема лабораторного макета приведена на рисунке 1.1.



Рисунок 1.1 – Схема измерения характеристик ошибок по шлейфу

Шлейфовое соединение – измерение характеристик ошибок по шлейфу, выполняемое в трактах обоих направлений, соединенных последовательно друг с другом на дальнем конце линии при помощи шлейфа. Измерение часто выполняется без визуального контроля, поэтому результаты измерений, различные события и, например, тревожные сигналы или регистрируются на печатающем устройстве, или записываются на диск, а отсчет интервалов времени осуществляется по часам реального времени. Для проведения данного измерения необходимо иметь один прибор HP 37717C на одном конце линии (рисунок 1.2).

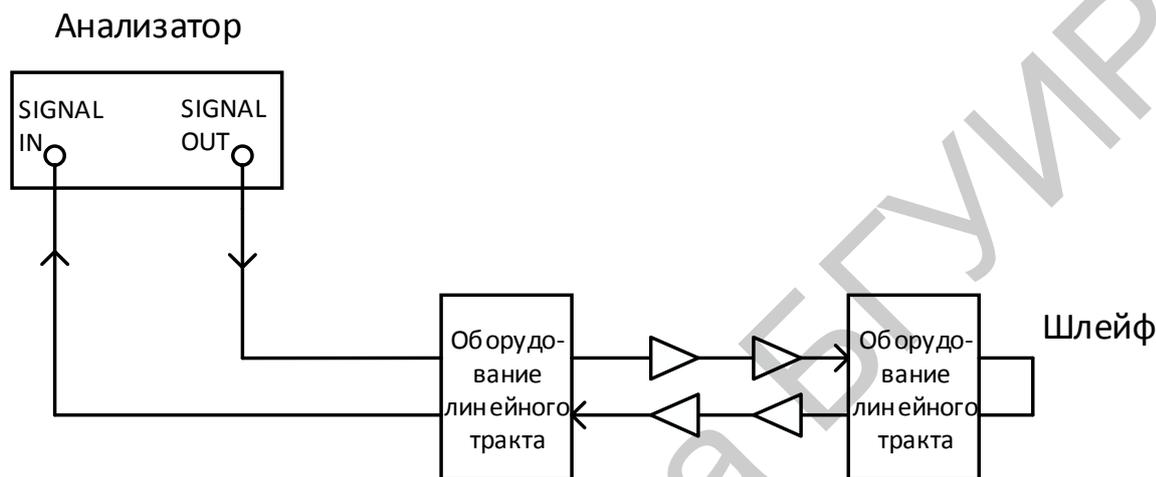


Рисунок 1.2 – Обобщенная схема измерения по шлейфу

1.4 Нормирование параметров качества цифровых каналов и групповых трактов

1.4.1 Классификация норм на параметры качества

В настоящее время для каналов и трактов цифровых сетей связи разработаны нормы на следующие важнейшие параметры, определяющие качество передачи:

- показатели ошибок;
- показатели дрожания и дрейфа фазы;
- показатели проскальзывания;
- время распространения в каналах;
- показатели надежности.

Показатели ошибок являются основным фактором, определяющим возможность ввода в эксплуатацию новых цифровых сетей или их фрагментов.

При нормировании параметров цифровых каналов и трактов за основу, как уже отмечалось, принимаются параметры основного цифрового канала (ОЦК).

Возникающие в линейном тракте ошибки при приеме отдельных элементов цифрового сигнала приводят к искажениям восстановленного в процессе цифроаналогового преобразования (ЦАП) речевого сигнала. Такие ошибки оцениваются отношением сигнал/шум (ОСШ). Определим связь между коэффициентом ошибки в линейном тракте p и ОСШ на выходе ЦАП. Для этого воспользуемся следующими параметрами речевого сигнала и аналого-цифрового преобразования (АЦП):

U_c – действующее напряжение речевого сигнала, В;

U_m – амплитудное напряжение речевого сигнала, соответствующее напряжению ограничения АЦП, В;

$k_n = U_m/U_c$ – пик-фактор речевого сигнала;

m – число разрядов кодовой комбинации (разрядность АЦП);

$L = 2^m$ – количество уровней квантования речевого сигнала;

$\Delta = 2U_m/2^m$ – шаг квантования;

$P_c = U_m^2/k_n^2$ – средняя мощность речевого сигнала на сопротивлении 1 Ом.

Если i -й символ в m -разрядной кодовой комбинации принят ошибочно, то при декодировании сигнала напряжение ошибки составит

$$U_i = 2^{i-1}\Delta, \text{ В,}$$

а мощность шума на сопротивлении 1 Ом будет равна

$$P_{\text{ш}} = \sum_{i=1}^m U_i^2 p_i = \sum_{i=1}^m 4^{i-1} \Delta^2 p_i, \quad \text{Вт}$$

где p_i – вероятность ошибочного приема i -го символа кодовой комбинации.

Как правило, коэффициент ошибки в линейном тракте цифровых систем передачи (ЦСП), работающих по направляющим системам, очень мал ($p_{\text{ош}} = 10^{-8 \dots -12}$). В кодовых словах отдельных основных цифровых каналов будут появляться единичные ошибки, при этом вероятность искажения i -го символа кодовой комбинации не будет зависеть от номера разряда и будет численно равна коэффициенту ошибок линейного тракта $p_i \sim p_{\text{ош}}$. С учетом этого условия можно записать, что мощность шума будет равна

$$P_{\text{ш}} = p\Delta^2 \sum_{i=1}^m 4^{i-1} = p\Delta^2 \frac{(4^m - 1)}{3}.$$

Тогда отношение сигнал/шум после ЦАП при наличии ошибок в линейном тракте будет

$$\text{ОСШ} = 10\lg P_c/P_{\text{ш}} = 10\lg(3/(4pk_n^2)), \text{ дБ.}$$

Значения ОСШ при величине пик-фактора $k_n = 12$ дБ в зависимости от коэффициента ошибки линейного тракта приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Значения ОСШ в зависимости от коэффициента ошибки линейного тракта

P	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}	10^{-10}
ОСШ, дБ	26,75	36,75	46,75	56,75	66,75	76,75	86,75

При передаче речевого (телефонного) сигнала ошибки, возникающие в линейном тракте, проявляются для абонента в виде щелчков. Для сохранения удовлетворительного качества (ОСШ > 40 дБ) можно допустить в телефонном канале не более одного щелчка в минуту, что для ОЦК соответствует допустимой вероятности битовой ошибки 10^{-6} в условном эталонном тракте (УЭТ) протяженностью 27 500 км. Эта вероятность ошибки всегда должна обеспечиваться при проектировании цифровых трактов.

1.4.2 Параметры качества ОЦК

В течение длительного времени единственным параметром ошибок для ОЦК являлся коэффициент ошибок по битам (Bit Error Ratio, BER, BIT ER) – отношение числа неправильно принятых битов к общему числу принятых битов в течение интервала наблюдения. Однако этот параметр пригоден для оценки качества передачи, если в тракте преобладают случайные одиночные ошибки. В случае, когда ошибки могут образовывать пакеты, для оценки используются дополнительные параметры, определенные в Рекомендации МСЭ-Т G.821.

В качестве основных показателей для нормирования ошибок в ОЦК используются:

- секунда с ошибками (Errored Second, ES) – период в одну секунду, в течение которого наблюдалась хотя бы одна ошибка;
- коэффициент секунд с ошибками (Errored Second Ratio, ESR) – отношение числа секунд с ошибками к общему числу секунд в период готовности за интервал измерения;
- секунда без ошибки (Errored Free Second, EFS) – период в одну секунду, в течение которого не наблюдалось ни одной ошибки;
- коэффициент секунд без ошибок (Errored Free Second Ratio, EFSR) – отношение числа секунд без ошибок к общему числу секунд в период готовности за интервал измерения;
- секунды, пораженные ошибками (Severely Errored Second, SES), – период в одну секунду, в течение которого коэффициент ошибок по битам $BER > 10^{-3}$;
- коэффициент секунд, пораженных ошибками (Severely Errored Second Ratio, SESR), – рассчитывается только для времени готовности канала и определяется как отношение числа секунд, пораженных ошибками, к общему числу секунд за интервал измерения.

В соответствии с Рекомендацией G.821 предусмотрено деление времени работы канала на два периода – готовности (Available Second, AS) и неготовно-

сти (Unavailable Second, UAS UNAV) канала (рисунок 1.3, а). Период неготовности канала – период, начинающийся с 10 последовательных секунд, пораженных ошибками (SES), и заканчивающийся до 10 последовательных секунд без SES, которые уже относятся к периоду готовности. Нормирование качества производится только в период готовности канала. Период неготовности для двустороннего канала – это период, когда хотя бы одно из направлений находится в состоянии неготовности (рисунок 1.3, б).



Рисунок 1.3 – К определению времени неготовности одностороннего и двустороннего тракта

Алгоритм определения параметров ОЦК: времени готовности и неготовности канала, а также подсчет секунд с ошибками (ES) и секунд, пораженных ошибками (SES), приведен на рисунке 1.4. При этом надо помнить, что SES являются частью ES.

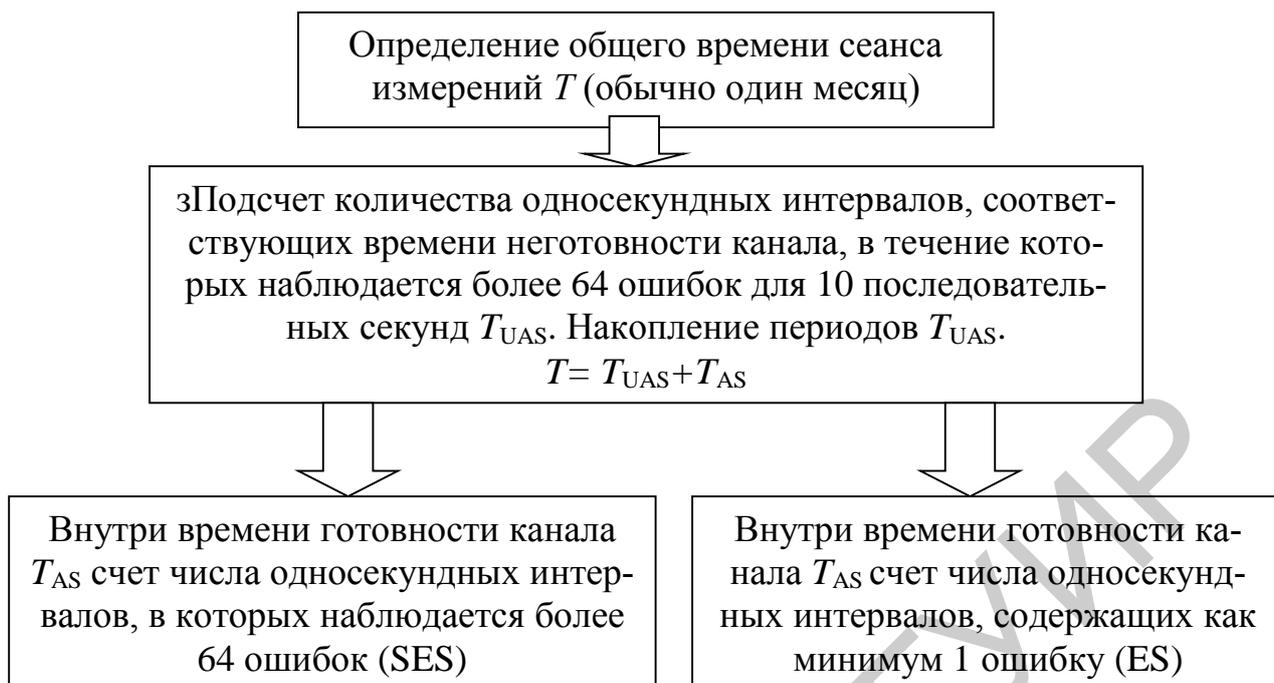


Рисунок 1.4 – Алгоритм определения параметров ОЦК

1.4.3 Нормирование параметров качества ОЦК

При расчете непосредственно параметров ОЦК за основу взяты нормы на показатели качества для цифрового условного эталонного тракта протяженностью 27 500 км (Рекомендации МСЭ-T G.821), приведенные в таблице 1.2.

Таблица 1.2 – Нормы на параметры качества УЭТ ОЦК

Параметр	Норма	Примечание
Секунды с ошибками	$\frac{ES}{T_{AS}} < 8 \%$	Менее 8 % односекундных интервалов должны иметь ошибки или не менее чем в 92 % измерений при оценке односекундных интервалов должны отсутствовать ошибки
Секунды, пораженные ошибками	$\frac{SES}{T_{AS}} < 0,2 \%$	Менее 0,2 % односекундных интервалов должны иметь коэффициент ошибок $k_{ош} > 10^{-3}$ или не менее чем в 99,8 % измерений при оценке односекундных интервалов должно быть не более 64 ошибок

В соответствии с данными таблицы 1.2 определяется часть общих норм на параметр качества, отведенная на отдельный участок номинальной цепи (НЦ) ОЦК. Пересчет норм на участки НЦ ОЦК приведен в таблице 1.3. Таким образом, нормируется процент измерений, в которых число ошибок может превышать некоторое заданное пороговое значение. Нормы на параметры ошибок НЦ ОЦК рассчитываются без учета абонентских участков на обоих концах соединения.

Таблица 1.3 – Пересчет норм параметров ошибок на участки НЦ ОЦК

Участок	Номинальная протяженность, L_n , км	Норма, %	Значение показателя качества	
			SESR, %	ESR, %
Международное соединение	27 500	100	0,2	8
НЦ ОЦК *	13 900	50	0,1	4
Магистральный участок первичной сети (ПС)	12 500	20	0,04	1,6
Внутризоновый участок ПС	600	7,5	0,015	0,6
Местный участок ПС	100	7,5	0,015	0,6
Абонентский участок	до 10	15	0,03	1,2

* Без учета абонентского участка.

При протяженности участка менее номинальной (L_n) расчет норм на показатели качества проводится по формуле

$$\alpha = \alpha_n(L/L_n),$$

где α_n – номинальное значение показателя качества соответствующего участка (см. таблицу 1.3);

L и L_n – реальная и номинальная протяженности соответствующего участка, км.

1.5 Руководство по измерению коэффициента ошибок при помощи прибора НР 37717С

1.5.1 Установки по умолчанию

Перед установкой прибора в требуемый режим измерений рекомендуется установить НР 37717С в исходное состояние. При этом все ранее сделанные установки отменяются и устанавливается корректно определенное состояние прибора.

1.5.2 Процедура установки режима испытаний (измерение коэффициента ошибок)

Для проведения испытания необходимо использовать сигнал со скоростью передачи 2 Мбит/с с линейным кодом HDB-3 и полезной нагрузкой в виде псевдослучайной двоичной последовательности PRBS. Измерительный прибор должен иметь сопротивление 120 Ом. Допустимо использовать SINGLE (одиночный) период измерения длительностью 24 HOURS (24 часа) с возможностью использования принтера или диска для записи результатов измерений и тревожных

сигналов. Графическое изображение записанных результатов может быть выведено в окне **GRAPH** анализатора HP 37717C в конце периода измерения.

1 Установить в окне **OTHER** значения параметров **SETTING CONTROL**, как приведено на рисунке 1.5.

Любые изменения установок, произведенные в одном из окон **TRANSMIT** или **RECIEVE**, автоматически появляются в другом окне.

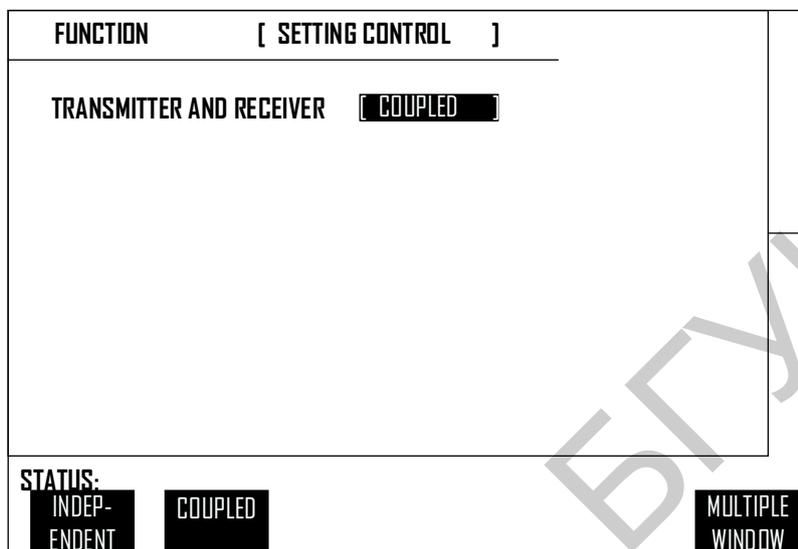


Рисунок 1.5 – Установки параметров в окне **OTHER**

2 Подсоединить анализатор HP 37717C к линейному оборудованию и установить значения параметров в окне **TRANSMIT** так, как показано на рисунке 1.6.

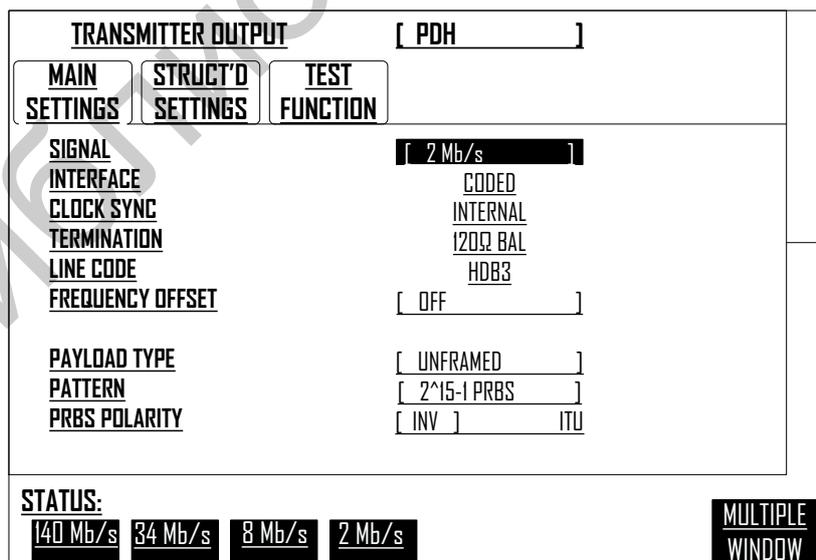


Рисунок 1.6 – Установки параметров в окне **TRANSMIT**

3 Выбрать функцию **LOGGING** в окне **OTHER**, установить параметры, как это показано на рисунке 1.7.

FUNCTION	[LOGGING]
LOGGING SETUP	[CONTROL]
LOGGING	[OFF]
LOG ON DEMAND	SCREEN DUMP
STATUS:	
OFF	10 MINS
1 HOUR	24 HOURS
USER PROGRAM	MULTIPLE WINDOW

Рисунок 1.7 – Установки параметров функции **LOGGING** в окне **OTHER**

4 Установить параметры **PDH**, **ERROR ANALYSIS** и выбрать вкладку **G.821** в окне **RESULTS**, как показано на рисунке 1.8.

RESULTS	[PDH]	[ERROR ANALYSIS]
G. 821	G. 826	M. 2100
		M. 2110
		M. 2120
	[BIT]	
EC	And ES	%
ES		%
EFS		%
SES		%
UNAV		%
DEG MIN		%
CODE ES		
ELAPSED TIME		
STATUS:		
CUMUL-ATIVE	SHORT TERM	ERROR ANALYSIS
		ALARM SECONDS
		MORE
		MULTIPLE WINDOW

Рисунок 1.8 – Установки параметров в окне **RESULTS**

Тип, устанавливаемый для параметра **RESULTS**, может быть изменен во время измерения без прекращения испытания.

1.5.3 Выполнение испытаний (измерение коэффициента ошибок)

Нажать клавишу **RUN**. Во время проведения испытания результаты измерений и тревожные сигналы отображаются в окне **RESULTS**. Графическое представление измерений и тревожных сигналов размещается в энергозависимой памяти для дальнейшего просмотра в окне **GRAPH**. Испытание может быть прервано в любое время нажатием клавиши **RUN**.

1.5.4 Окончание испытаний (измерение коэффициента ошибок)

Дата и время начала испытания, а также установки анализатора записываются в выбранное устройство регистрации через десятиминутные интервалы времени. Все тревожные сигналы, возникающие в течение процесса измерений, записываются на диск или распечатываются на принтере. В течение процесса измерений графическое представление результатов может быть отображено в окне **GRAPH**. Если установлен блок дистанционного управления **A3B** или **A3D**, графическое представление результатов может быть распечатано позднее на внешнем принтере.

Итоговые результаты измерений и тревожные сигналы можно наблюдать в окне **GRAPH**. Обычно может быть сохранено до 20 000 событий. Если в меню **MISCELLANEOUS** окна **OTHER** для параметра **GRAPH STORAGE RESOLUTION** выбрано значение **FULL**, количество хранимых событий сокращается до 10 000. Разрешающая способность, определяемая выбором значения параметра **STORAGE** в окне **RESULTS TIMING**, влияет на возможности режима масштабирования **ZOOM** при графическом представлении результатов. При выборе значения **1 SECOND** изменение масштаба изображения возможно для любой шкалы. При выборе значения **1 MIN** становятся доступными шкалы **1 MIN/BAR**, **15 MIN/BAR** и **60 MIN/BAR**. При выборе значения **15 MIN** становятся доступными шкалы **15 MIN/BAR** и **60 MIN/BAR**. При выборе значения **1 HOUR** доступной является только шкала **60 MIN/BAR**.

Может быть сохранено до десяти наборов графического представления результатов. При попытке сохранить больший объем результатов, более ранние из них будут утрачены. Если при выполнении измерений объем графических данных будет превышать имеющиеся размеры свободной памяти, то часть хранившихся данных будет потеряна.

1.6 Порядок выполнения работы

1 Проверить соответствие схемы макета схеме, приведенной на рисунке 1.1.

2 Провести конфигурирование выходных и входных интерфейсов прибора, выбрать соответствующий режим измерения и работы.

3 Выбрать в окне **RESULTS** → **PDH** → **CUMULATIVE** → **BIT**, запустить измерения кнопкой **RUN**.

4 Установить путем внесения затухания в оптический тракт коэффициент ошибки, приблизительно равным 10^{-6} .

5 Перезапустить измерения, дважды нажав кнопку **RUN**.

6 Провести измерения параметров в течение 10 мин, затем остановить измерения, нажав кнопку **RUN**.

7 Занести результаты измерений в таблицу 1.4 из окон **RESULTS** → **PDH** → **CUMULATIVE** → **BIT**, **RESULTS** → **PDH** → **ERROR ANALYSIS** → **G.821**, **RESULTS** → **PDH** → **ALARM SECONDS**.

8 Повторить этапы 3–7 для коэффициентов ошибок 10^{-3} , 10^{-4} , 10^{-5} .

Таблица 1.4 – Результаты измерений

Расчетный BER	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Длительность проведения измерения (мин, с)				
Фактический BER				
Количество ошибок – BIT EC				
ES				
ESR				
EFS				
EFSR				
SES				
SESR				
UNAV				
UNAVR				
DEGMIN				

1.7 Содержание отчета

1 Структурная схема метода измерения.

2 Таблицы результатов измерения.

3 Выводы по работе.

1.8 Контрольные вопросы

- 1 Каковы причины возникновения ошибок в оптическом тракте?
- 2 Как зависит ОСШ от коэффициента ошибки?
- 3 Как проявляются ошибки для абонента при передаче речевого сигнала?
- 4 Что показывает параметр секунды с ошибками? Как он обозначается?
- 5 Чем отличается коэффициент секунд с ошибками от ES?
- 6 Что такое время готовности канала?
- 7 Какое количество времени обычно длится сеанс измерений при определении параметров ОЦК?

Библиотека БГУИР

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ИЗМЕРЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПЕРЕДАЧИ

2.1 Цель работы

Изучение параметров оптических интерфейсов передачи (точка S) и приема (точка R), экспериментальное исследование энергетического потенциала волоконно-оптических систем передачи (ВОСП).

2.2 Задание к работе

- 1 Изучить инструкцию по технике безопасности.
- 2 Изучить структурную схему лабораторного макета.
- 3 Изучить устройство, принцип работы и инструкцию использования следующих приборов:
 - ОЛТ (оптический линейный терминал) 2×16 ;
 - оптический измеритель мощности;
 - осциллограф;
 - анализатор ошибок.
- 4 Произвести измерения параметров ВОСП.

2.3 Параметры волоконно-оптических систем передачи

В цифровых ВОСП можно выделить линейный оптический тракт, который может работать на одной длине волны оптического излучения (рисунок 2.1, а) или на нескольких волнах с использованием аппаратуры спектрального уплотнения (рисунок 2.1, б). Оборудование оконечных пунктов (ОП) линейного оптического тракта, не использующего аппаратуру спектрального уплотнения, содержит:

- преобразователь кода ПК1 аппаратуры импульсно-кодовой модуляции (ИКМ) в линейный код, который предотвращает появление «длинных» «1» и «0», приводящих к межсимвольным искажениям;
- преобразователь кода ПК2, выполняющий обратное преобразование кодов;
- источники излучения (ИИ) с усилителями накачки;
- фотоприемные устройства (ФП).

Для компенсации вносимого затухания в оптическом кабеле между точками S (передатчик) и R (приемник) используются регенерационные пункты (РП), которые восстанавливают ослабленный и зашумленный сигнал. В состав РП помимо ИИ и ФП входят решающие устройства (РУ), определяющие характер принятого сигнала («1» или «0»).

Точки T и T' являются точками стыка канала передачи цифрового группового тракта соответствующей цифровой иерархии с оптическим линейным трактом. Параметры цифровых групповых трактов в точках стыка нормированы с учетом рекомендаций Международного Союза электросвязи (МСЭ). Определены параметры входного и выходного сигналов в точках T и T' , типы кодов, сопротивления нагрузок, скорости передачи в электрическом и оптическом трактах, коэффициент ошибок, характеристики дрожания фазы.

Точки R и S являются оптическими стыками ВОСП. Оптические параметры отнесены для передатчика к точке S , для приемника – к точке R , а длина оптического пути определяется расстоянием между точками S и R .

Линейный оптический тракт (рисунок 2.1, б) позволяет передавать по двум волокнам несколько высокоскоростных цифровых потоков на разных длинах волн ($\lambda_1 \dots \lambda_n$), которые объединяются в один поток с помощью мультиплексора MX DWDM. В связи с тем, что в мультиплексоре при объединении потоков возникают значительные потери, на его выходе устанавливается выходной оптический усилитель (ОУ). На приемном конце ослабленный сигнал перед поступлением на демультиплексор DMX DWDM также усиливается во входном ОУ.

К основным оптическим параметрам передающего устройства в точке S относятся:

- Средняя длина волны излучения λ_0 и ширина спектра излучения $\Delta\lambda$, которая может определяться как среднеквадратичное значение или на уровне 0,5 от максимальной величины. Так обычно определяют ширину спектра излучения для светоизлучающих диодов (СИД) и многомодовых лазеров. Для одномодовых, одночастотных лазеров чаще ширину спектра излучения определяют на уровне минус 20 дБ (1 % от максимальной величины). Для определения длины волны λ_0 и ширины спектра $\Delta\lambda$ излучения используют анализаторы оптического спектра, основанные на оптической фильтрации с помощью дифракционной решетки или интерферометра.

- Средняя мощность излучения P_0 , вводимого в волоконный световод (ВС), при равной вероятности передачи «1» и «0», которая может измеряться в единицах мощности (Вт – ватты) или логарифмических единицах (дБм – уровень мощности по отношению к одному милливатту, выраженный в децибелах). В качестве испытательного сигнала для определения параметров передающего устройства можно использовать псевдослучайные последовательности (ПСП). Важным параметром излучателя является нестабильность излучаемой мощности, которая может характеризоваться среднеквадратичным отклонением средней мощности. Эта величина также может измеряться в единицах мощности (Вт) или в относительных логарифмических единицах (дБ – децибелы). Измерения проводят оптическими ваттметрами, которые градуируют на фиксированных длинах волн излучения (0,85; 1,3; 1,55 и 1,64 мкм) в абсолютных и логарифмических единицах. Часто оптические ваттметры совмещают в одном корпусе с ис-

точником излучения. Такие приборы называют мультиметрами, или оптическими тестерами. Комплект из двух таких приборов позволяет проводить измерения затухания в ВС и пассивных элементах ВОСП.

– Коэффициент гашения (экстинкции), который определяется отношением мощности излучения при передаче «1» к мощности излучения при передаче «0». Его можно выразить просто отношением или в относительных логарифмических единицах (дБ), наблюдая глаз-диаграмму, получающуюся при подаче выходного оптического сигнала на собственный оптический вход. Для исключения возможной перегрузки фотоприемника (ФП) между оптическим входом и выходом включают оптический аттенюатор. При выборе испытательной ПСП для измерений по глаз-диаграмме необходимо, чтобы число регистров в генераторе ПСП было равно максимально возможному числу единиц, которые могут идти подряд в используемом линейном коде. Например, для ВОСП, использующей код *B4B5*, подряд может идти не более пяти «1» или «0».

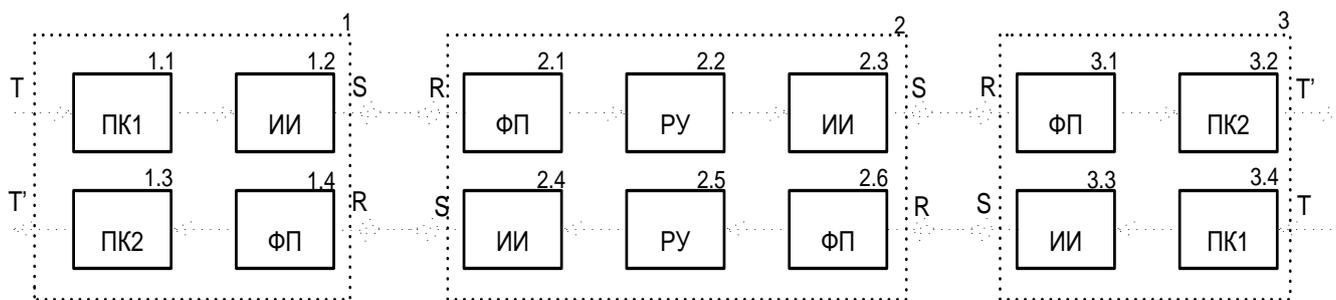
– Форма выходных оптических импульсов (время нарастания и спада, длительность, колебательность), определяемая по глаз-диаграмме, которая должна соответствовать шаблону глаз-диаграммы для данной ВОСП.

К основным оптическим параметрам фотоприемного устройства (ФПУ) можно отнести:

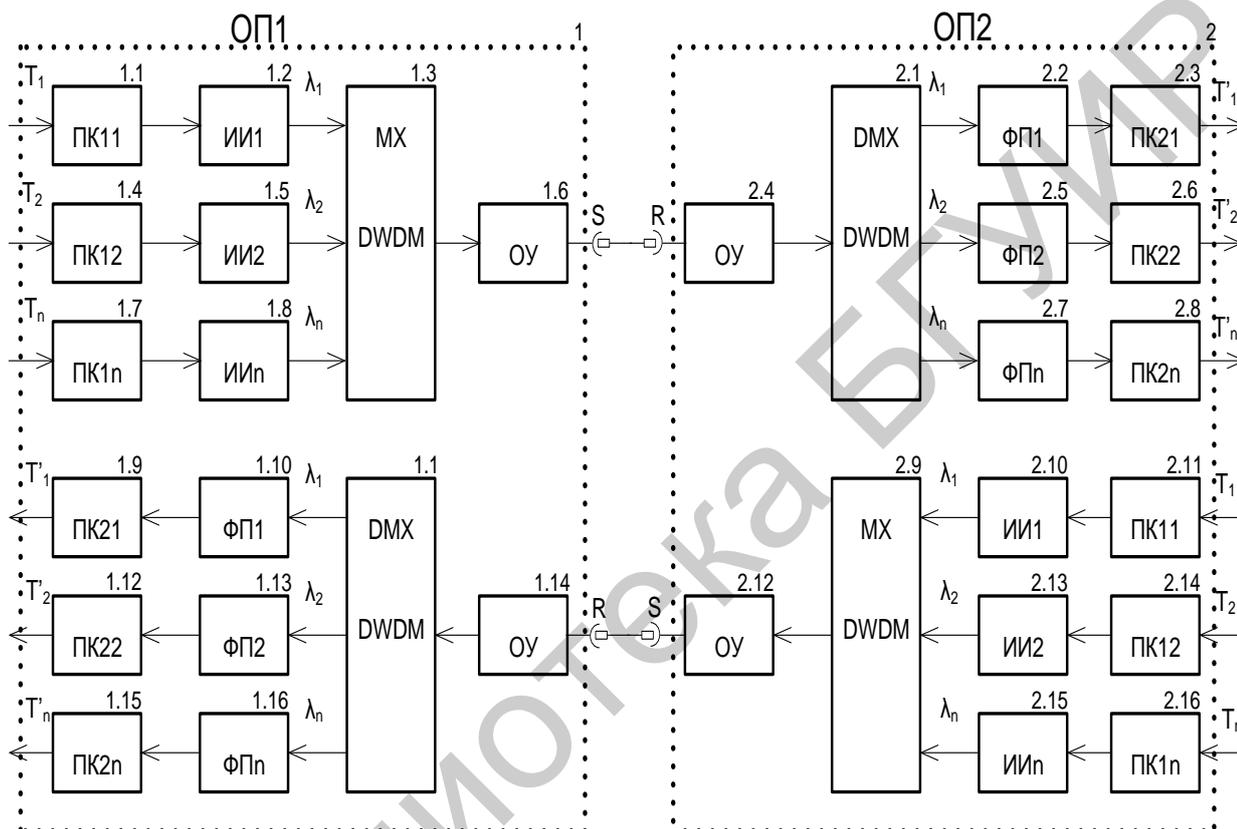
– Чувствительность, которая определяется как минимальное среднее значение мощности оптического излучения в точке *R*, при котором обеспечивается заданный коэффициент ошибок (обычно 10^{-10}). Чувствительность ФПУ может быть выражена в единицах мощности (Вт) или логарифмических единицах (дБм). Для измерения чувствительности необходимы: оптический ваттметр, измеритель коэффициента ошибок (ИКО) и регулируемый аттенюатор.

– Динамический диапазон, который определяется как отношение максимальной мощности излучения в точке *R*, при которой обеспечивается заданный коэффициент ошибок, к чувствительности. Динамический диапазон обычно выражают в логарифмических единицах (дБ). При определении динамического диапазона используются те же приборы, что и для определения чувствительности. Оба параметра могут быть определены в одной измерительной процедуре.

– Коэффициент отражения в точке *R*, определяемый отношением отраженной от ФПУ мощности к падающей на него мощности. Для его определения может использоваться оптический рефлектометр (ОР) или специальный прибор. При количественной оценке коэффициента отражения с помощью ОР возникают сложности при учете затухания в волоконном тракте между ОР и ФПУ. Коэффициент отражения может быть выражен отношением или в относительных логарифмических единицах (дБ).



а



б

а – оптический линейный тракт ЦСП с плезиохронной и синхронной иерархиями; б – оптический линейный тракт ЦСП со спектральным уплотнением

Рисунок 2.1 – Общая схема передачи ИКМ-сигналов по волоконному тракту (ВТ)

К основным параметрам линейного оптического тракта можно отнести:

– Вносимое затухание (ослабление оптического сигнала в линейном тракте между точками S и R). Для измерения вносимого затухания используют оптические тестеры, которые могут представлять собой комплект из источника и приемника излучения. Однако чаще для этой цели используют оптические мультиметры, объединяющие в одном корпусе источник и приемник излучения.

Основными причинами погрешности измерения являются неодинаковость потерь в рабочем разьеме излучателя ВОСП и разьеме излучателя оптического тестера и отличие длин волн излучателя ВОСП и оптического тестера.

– Дисперсионные искажения (уширение оптических импульсов), которые могут выявляться и измеряться при эксплуатации путем сравнения глаз-диаграмм в точках S и R . Сложность этих измерений определяется тем, что при малых затуханиях и расстояниях само уширение очень мало и его трудно измерить, а при больших затуханиях и расстояниях мало отношение сигнала к шуму на дальнем конце, что снижает точность измерений по глаз-диаграмме.

Возвратные потери (отражения от неоднородностей в ВТ) нормируются, так как в одномодовых ВТ обратно отраженные импульсы интерферируют в резонаторе полупроводникового лазера с излучаемыми, что изменяет амплитуду и искажает форму излучаемых импульсов. Это приводит к увеличению коэффициента ошибок, что недопустимо. Возвратные потери, так же как и коэффициент отражения от ФПУ, измеряются ОР или специальными приборами. Их, как правило, выражают в логарифмических единицах.

Энергетический потенциал – это разность между уровнем оптического сигнала на выходе передающего и чувствительностью приемного оптических модулей (ПОМ и ПРОМ соответственно), измеряемая в децибелах:

$$W = p_{\text{ПОМ}} - p_{\text{ПРОМ}}, \quad (2.1)$$

где $p_{\text{ПОМ}}$ – уровень мощности оптического излучения передатчика ВОСП, дБм;
 $p_{\text{ПРОМ}}$ – уровень чувствительности приемника, дБм.

Чувствительность приемного оптического модуля – это минимальный уровень оптического сигнала на входе приемного оптического модуля, при котором обеспечивается требуемый коэффициент ошибок.

Величину энергетического потенциала можно определить как разность между измеренными уровнями средней мощности цифрового оптического сигнала на выходе ПОМ и входе ПРОМ, соединенных оптической линией связи, при таком максимальном значении вносимого затухания, при котором обеспечивается максимально допустимое значение коэффициента ошибок. Соответственно для измерения энергетического потенциала необходимо иметь линию с регулируемым затуханием. В качестве такой линии обычно используют оптический аттенюатор. При проведении измерений анализатор ошибок контролирует коэффициент ошибок. Аттенюатор может быть включен между ПОМ и ПРОМ одного пункта. Если при этом используется калиброванный аттенюатор, то нет необходимости измерять указанные мощности на выходе передающего и входе приемного модулей, так как энергетический потенциал в данном случае будет равен затуханию, вносимому аттенюатором. Аттенюатор может быть включен между стационарным и линейным кабелем. Энергетический потенциал при этом измеряется по направлению от одного пункта к другому.

Аналогично измеряют чувствительность ПРОМ. С помощью оптического аттенюатора на входе ПРОМ устанавливают такой минимальный уровень мощности, при котором коэффициент ошибок равен требуемому. После этого измеряют этот уровень мощности и находят чувствительность ПРОМ.

Таким образом, для оценки энергетического потенциала системы передачи необходимо измерить выходную мощность передатчика и чувствительность приемного устройства при заданных вариантах ошибок.

2.4 Описание схемы и конструкции

Структурная схема комплекса для измерения энергетического потенциала представлена на рисунке 2.2. В состав комплекса входят: измеритель оптической мощности 1, оптический аттенюатор 2, блок питания 3, оптический линейный терминал 4, осциллограф 5, анализатор цифровых трактов 6.

Далее приведено краткое описание оборудования, которое включает в себя измерительный комплекс.

Измеритель оптической мощности ОТ-2-5/ИМ для одномодовых и многомодовых волокон позволяет с высокой точностью произвести измерение оптической мощности и затухания в ВОЛС. Этот измеритель является столь же распространенным прибором для инженеров, связанных с оптоволоконными системами, как мультиметр для инженеров-электронщиков. Оптический измеритель мощности обеспечивает как измерение кабельных линий, так и анализ работы терминального оборудования, передающего сигнал в оптическую линию. В паре со стабилизированным источником сигнала измеритель оптической мощности обеспечивает измерение затухания – основного параметра качества оптической линии. Особенно важным классом измерений для прибора является измерение параметров узлов оптической линии (участков кабеля, интерфейсов, сварочных узлов, аттенюаторов и т. д.). Оптический измеритель мощности позволяет сохранять результаты измерений в энергонезависимой памяти с указанием времени и даты проведения измерений (256 ячеек памяти), отображает как абсолютный, так и относительный уровень (есть режим измерения относительных уровней, которым можно управлять с помощью ПЭВМ). Измеритель ОТ-2-5/ИМ может работать в трех основных длинах волн (850, 1310 и 1550 нм) и есть возможность изменения значения длины волны измеряемого оптического излучения на ± 40 нм с шагом 5 нм около выбранной центральной длины волны с целью повышения точности измерения. Также устройство может работать в двух режимах – непрерывном и импульсном – с частотой модуляции 2 кГц.

Основные достоинства ОТ-2-5/ИМ:

- высокие технические и метрологические характеристики;
- простота в использовании;
- удобен для работы в полевых условиях;
- герметичный малогабаритный корпус, соответствующий стандарту

IP65.

Программируемый оптический attenuator FOD-5418 предназначен для внесения задаваемого оператором затухания в одномодовый волоконно-оптический тракт на длинах волн 1310 и 1550 нм. Attenuаторы позволяют установить значения затуханий от 0 до минимум 80 дБ с разрешением 0,05 дБ. Имеется возможность оперативного изменения значения вносимого затухания.

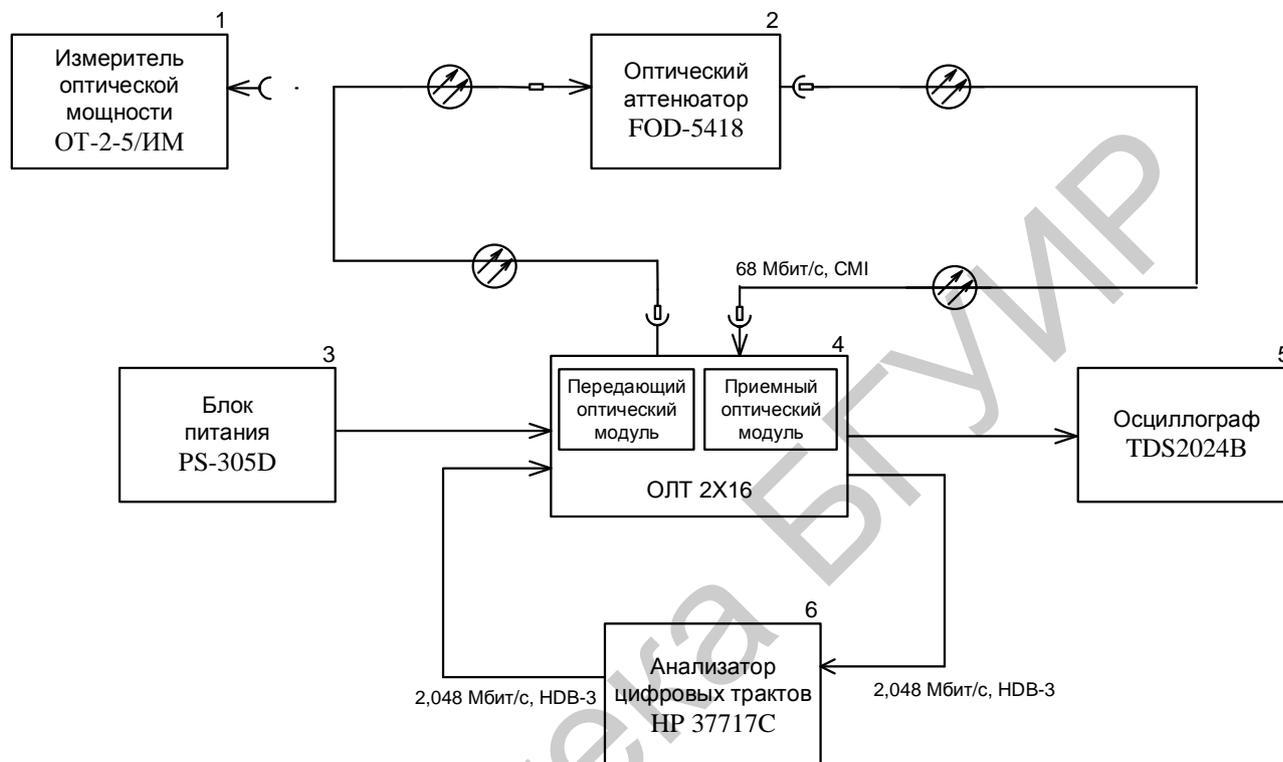


Рисунок 2.2 – Структурная схема комплекса для измерения энергетического потенциала ВОСП

Все attenuаторы, как правило, широкополосные. В attenuаторах используются различные методы внесения затухания: осевое и радиальное смещение, использование различных фильтров и призм. На входе attenuатора расположены две линзы для преобразования светового потока. Основным элементом attenuатора является призма с низким уровнем потерь, связанных с поляризацией. Уровень затухания, вносимого attenuатором, зависит от положения призмы и регулируется позиционером. Важными условиями являются отсутствие при работе attenuатора краевых эффектов и точность позиционирования. Для достижения приемлемой точности работы устройства в его состав включены цифровые цепи управления и микропроцессор. Все эти характеристики проверяются в ходе обязательной калибровки прибора, частота которой также является важным техническим параметром attenuаторов.

Линейностью аттенюатора называется разница между задаваемым и измеряемым в ходе поверки затуханием, вносимым этим прибором во всем динамическом диапазоне. Соответственно, точность работы определяется как линейность в заданном диапазоне. Потери, связанные с дисперсией призмы (PDL), зависят, главным образом, от качества стекла, из которого она изготовлена. Сдвиг фазы, обусловленный дисперсией, приводит к уменьшению мощности передаваемого сигнала и, как следствие, к дополнительному затуханию, связанному с PDL.

Еще одним важным параметром оптического аттенюатора, помимо диапазона вносимых потерь и точности, является уровень возвратных потерь, связанных с отражением части сигнала в линию. Основное требование к аттенюаторам – требование наиболее низкого собственного уровня отражения, который достигается покрытием интерфейсных линз антиотражающим материалом. Остаточное вносимое затухание – это минимальное затухание, вносимое аттенюатором. Описанная модель аттенюатора, подключенная к волокну, содержит призму и не может не вносить затухание, поэтому параметр остаточного затухания определяет начало отсчета вносимых потерь.

Блок питания PS-305D разработан для использования в научно-исследовательской деятельности при конструировании новых изделий, а также для ремонта ноутбуков и других электронных изделий. Номинальные величины напряжения и силы тока плавно регулируются в процессе (рисунок 2.3). Данный прибор обладает высокой точностью и надежностью, выполняет функцию защиты от перегрузки.

Основные технические параметры:

- напряжение питания – 110 В/220 В переменного тока с частотой 50 или 60 Гц;
- выходное напряжение – регулируется в пределах от 0 до 30 В;
- стабильность выходного напряжения – не хуже 0,01 %;
- время восстановления – не более 100 мкс;
- уровень пульсаций – не более 1 мВ;
- выходной ток – регулируется в пределах от 0 до 5 А;
- стабильность тока – не хуже 0,1 %;
- уровень пульсаций – не более 2 мА.

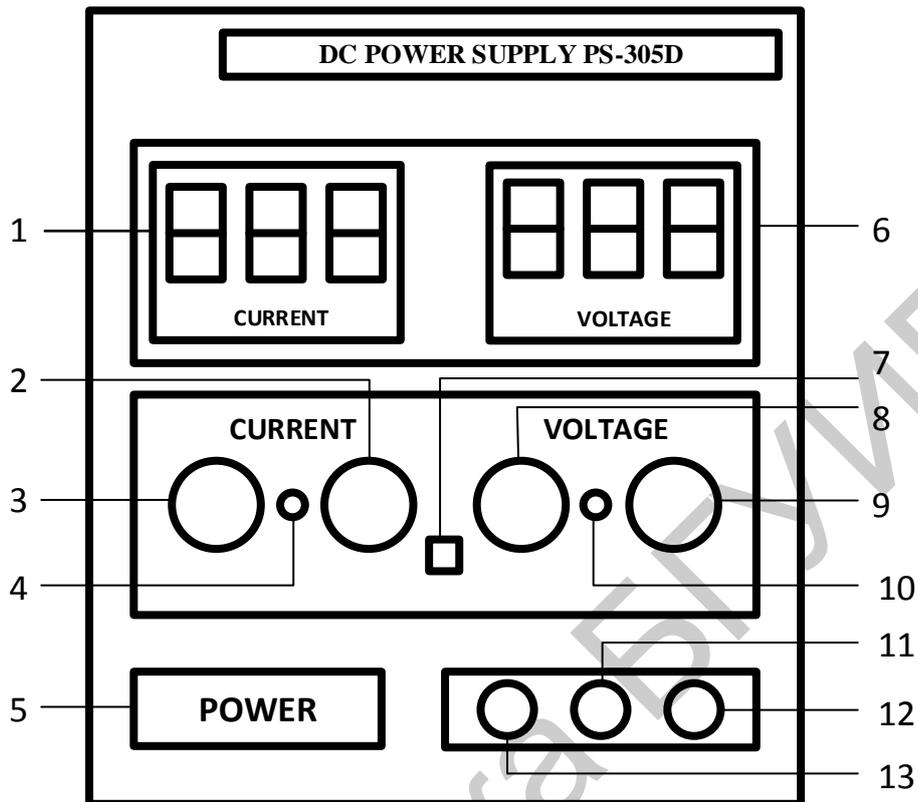
Порядок работы с прибором:

1 Подключить блок питания к сети. Блок питания будет вырабатывать стабилизированное напряжение с величиной, установленной ручками регулировки.

2 Включить блок питания, при этом индикаторы активируются автоматически (ручки регулировки силы тока «Грубо» и «Плавно» установлены на отметке «0»), на дисплеях амперметра и вольтметра отобразятся цифры «000», затем на дисплее вольтметра отобразится значение выходного напряжения.

3 Выставить ручками регулировки напряжения необходимое значение (ручки регулировки тока «Грубо» и «Плавно» установлены на отметке «0»), выходной диапазон напряжения: 0–30 В DC.

4 Подключить внешнюю нагрузку к клеммам вывода «+» и «-»; ток, отдаваемый в нагрузку, определяет потребляемую мощность.



1 – дисплей амперметра; 2 – ручка регулятора тока «Грубо»; 3 – ручка регулятора тока «Плавно»; 4 – индикатор состояния; 5 – выключатель питания; 6 – дисплей вольтметра; 7 – переключатель отображения диапазонов выходного тока; 8 – ручка регулятора напряжения «Плавно»; 9 – ручка регулятора напряжения «Грубо»; 10 – индикатор состояния регулятора напряжения; 11 – клемма заземления; 12 – положительная клемма вывода; 13 – отрицательная клемма вывода.

Рисунок 2.3 – Внешний вид и органы управления блоком питания PS-305D

При проведении измерений в диапазонах выше средних значений помимо клемм вывода «+» и «-» должна использоваться клемма заземления с надежным контактом, который позволит снизить уровень пульсаций на выходе.

Для работы в режиме стабилизации тока необходимо:

1 Сначала установить ручками регулировки напряжения «Плавно» и «Грубо» значение 2–5 В (ручками регулировки тока «Грубо» и «Плавно» установлены любые значения, кроме «0»).

2 Установить ручками регулировки тока «Грубо» и «Плавно» значение «0» (путем поворота ручек против часовой стрелки).

3 Подключить внешнюю нагрузку к клеммам «+» и «-» выхода прибора, соблюдая полярность.

4 После этого путем поворота ручек «Плавно» и «Грубо» по часовой стрелке установить требуемый показатель напряжения.

Анализатор HP 37717C является многофункциональным средством измерения параметров сигналов линий связи, построенным на основе модульного принципа с использованием базового блока и сменных блоков. Этот модульный переносной прибор поддерживает оптические и электрические интерфейсы для PDH, SDH, ATM, джиттера и приложений для ЛВС (LAN) от 64 кбит/с до 2,4 Гбит/с (STM-16). Анализатор имеет специализированные слоты для оптического интерфейса и модуля «принтер/удаленное управление» и до восьми слотов для модулей других интерфейсов и измерений. Возможно конфигурировать анализатор с одновременным наличием PDH, SDH, ATM или с наличием только PDH, только SDH, только ATM, а также возможна любая комбинация. Имеется возможность фрейминга заголовков PDH/SDH, тестирования четности и тревог, тестирования допуска смещения частоты, измерения частоты и оптической мощности. Анализатор HP 37717C обеспечивает структурированные возможности PDH, покрывающие тестирование FAS в рабочем режиме и тестирование по ITU-T M.2100/M.2110/M.2120 до 140 Мбит/с со всесторонним анализом по ITU-T G.821 и G.826. Кроме того, он может тестировать SDH с электрическими интерфейсами. Для тестирования приема и передачи коротких, средних и длинных оптических систем передачи имеется выбор оптических модулей 1310 и/или 1550 нм STM-1/4/16. Также можно добавлять SDH (линейную) и PDH (базовую) генерацию и измерения джиттера, что особенно важно при инсталляции оборудования.

Поддерживаемые тестовые, интерфейсные, периферийные модули:

- тестирование сервисного слоя асинхронного способа передачи ATM (англ. *Asynchronous Transfer Mode*) с/без местной связывающей локальной сети;
- генерация селлового слоя ATM и измерения по стандартам ETSI (E1/E3/E4/STM-1);
- измерения STM-1 и STM-4;
- оптические интерфейсы STM-1 и STM-4 (1310 и 1550 нм);
- PDH NRZ-интерфейсы;
- STM-1 и STM-4 NRZ-интерфейсы;
- PDH и SDH Tx и Rx;
- размноженные выходы PDH;
- тестирование PDH (от 64 кбит/с до 140 Мбит/с);
- внешние интерфейсы принтер/удаленное управление;
- графический 80-колоночный принтер.

Оптический линейный терминал 2×16 предназначен для использования на городских, зонавых, магистральных и технологических линиях связи в составе комплексов связи плезиохронной и синхронной цифровой иерархии. Его функциональные возможности заключаются в мультиплексировании/демультиплексировании 16 асинхронных цифровых сигналов со скоростью

2 Мбит/с; для передачи/приема по ВОЛС на расстояние до 170 км (в зависимости от типа излучателя и используемого кабеля).

ОЛТ 2×16 может применяться для организации оптических линейных трактов и соединительных линий на местных, внутризональных и магистральных сетях связи. Одновременно с передачей 16 сигналов со скоростью 2048 кбит/с ОЛТ 2×16 позволяет организовать дополнительный канал для передачи данных терминального оборудования, имеющего интерфейс V.36, со скоростью 64 кбит/с. Принцип работы ОЛТ 2×16 заключается в следующем. В мультиплексоре МХ1 происходит объединение/разделение 16 сигналов E1, поступающих на ОЛТ 2×16 и формирование группового сигнала «16E1». Сигнал LAN поступает на встроенный MAC-коммутатор, в котором формируется групповой сигнал передачи данных – WAN. В мультиплексоре МХ2 происходит объединение сигналов 16E1 и WAN. В приемопередающем модуле происходит формирование линейного оптического сигнала.

Оборудование обеспечивает формирование сигнала индикации аварийного состояния (СИАС) в сторону линии и в сторону станции. В сторону линии СИАС формируется при пропадании сигнала 2048 кбит/с на цифровом входе. В сторону станции СИАС формируется на выходах всех 16 стыков 2048 кбит/с в двух случаях:

- при пропадании сигнала на оптическом входе;
- при превышении коэффициентом ошибок линейного сигнала значения 10^{-3} .

СИАС представляет собой сигнал, состоящий из «1». Частота СИАС составляет $(2048,0 \pm 0,1)$ кГц.

Осциллограф цифровой TDS2024B предназначен для исследования формы и измерения амплитудных и временных параметров электрических сигналов. Основной областью применения осциллографа являются электрорадиоизмерения при проведении исследовательских и испытательных работ в лабораторных и производственных условиях. Осциллограф выполнен в виде моноблока и является многофункциональным средством измерений электрических параметров сигналов.

Принцип действия осциллографа основан на аналого-цифровом преобразовании входного сигнала с последующей его цифровой обработкой. Встроенный микропроцессор обеспечивает диалоговое управление работой прибора, задает режимы функционирования, выводит на экран изображение сигнала и результаты измерений. Вывод результатов измерений осуществляется через USB-порт, расположенный на передней панели, на съемное записывающее устройство или на внешний принтер, а также через USB-порт, расположенный на задней панели, на компьютер. Осциллограф обладает полосой пропускания до 200 МГц и частотой дискретизации 2 Гвыб/с (гигавыборки в секунду).

Осциллограф серии TDS2024B обеспечивает точную регистрацию данных в реальном масштабе времени, вплоть до полного значения полосы пропускания, одинаковую длину памяти при всех значениях временной развертки, сложные

режимы синхронизации, позволяющие выделить необходимые сигналы, и 11 видов стандартных автоматических измерений во всех моделях. Возможности выполнения быстрого преобразования Фурье, а также математические функции сложения, вычитания и перемножения осциллограмм позволяют анализировать работу схем, определять их характеристики и устранять неполадки.

2.5 Описание работы

Экспериментальные исследования комплекса для измерения энергетического потенциала волоконно-оптической системы передачи проводятся по схеме, представленной на рисунке 2.3.

С анализатора цифровых трактов 6 на ОЛТ 2×16 подается псевдослучайная последовательность импульсов со скоростью 2,048 Мбит/с. ОЛТ 2×16 осуществляет преобразование входного электрического сигнала в оптический и передает его в волоконно-оптическую линию связи со скоростью 68 Мбит/с. При помощи измерителя оптической мощности 1 производится измерение выходной оптической мощности передающего модуля. С помощью аттенюатора 2 в волоконную линию вносится затухание, что приводит к снижению мощности передаваемого сигнала. При помощи измерителя оптической мощности 1 производится измерение мощности на входе приемного оптического модуля и таким образом определяется чувствительность приемного оптического модуля. На приемную часть модуля поступает маломощный сигнал, что может привести к неверному его приему и дешифрированию. Принятый сигнал подается на анализатор цифровых трактов 6 и сравнивается с исходным, так определяется достоверность принятого сигнала.

Любое различие между двумя символами в анализаторе интерпретируется как битовая ошибка. Для большинства цифровых коммуникационных протоколов устанавливаются максимальное значение коэффициента ошибок. На анализаторе цифровых трактов 6 производится измерение джиттера, которое показывает, удовлетворяет ли система заданным параметрам.

Включенный в экспериментальную установку осциллограф позволяет наглядно убедиться в зависимости параметров глаз-диаграммы от BER. При закрытии «глаза» схема оказывается подверженной шуму и ухудшается качество сигнала, в этом случае появляется BER.

2.6 Порядок выполнения работы

Подготовить к работе измерительный комплекс.

1 Включить все необходимые для проведения измерений приборы путем установки переключателей «Сеть» в положение «вкл».

2 На измерителе оптической мощности установить длину волны равной 1300 нм.

3 Подсоединить выход ОЛТ 2×16 к измерителю оптической мощности и измерить выходную мощность передающего модуля.

4 Собрать схему в соответствии с рисунком 2.2.

5 Внося затухание оптическим аттенюатором, на анализаторе ошибок установить коэффициент ошибок 10^{-7} .

Примечание – Работа с прибором НР 37717С по измерению ошибок приведена в лабораторной работе №1.

6 Подсоединить выход аттенюатора ко входу измерителя оптической мощности и измерить чувствительность приемника. Измерения повторить пять раз. Результаты распечатать.

7 Рассчитать энергетический потенциал ОЛТ 2×16 .

8 Используя цифровой осциллограф, снять глаз-диаграмму, определить параметры импульсов линейного сигнала: длительность импульса, длительность фронта и спада. Зарисовать глаз-диаграмму.

9 На цифровом осциллографе посмотреть изменение глаз-диаграммы при изменении затухания, зарисовать и определить, раскрыв глаз-диаграммы.

2.7 Содержание отчета

1 Схема комплекса для измерения энергетического потенциала ВОСП.

2 Результаты измерений.

3 Графики глаз-диаграмм.

4 Выводы по работе.

2.8 Контрольные вопросы

1 Перечислите и дайте определения параметров в точке *S*.

2 Дайте определение чувствительности цифрового приемного оптического модуля.

3 Назовите параметры оптического интерфейса в точке *R*.

4 Перечислите параметры оптического линейного тракта.

5 От чего зависит затухание в оптическом линейном тракте?

6 Каковы причины возникновения дисперсии в волоконных световодах?

7 Назовите причины уширения импульсов в одномодовых волоконных световодах.

8 Дайте определение энергетического потенциала волоконно-оптической системы передачи.

9 На что тратится энергетический потенциал волоконно-оптической системы передачи?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИЗМЕРЕНИЕ ДЖИТТЕРА В ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

3.1 Цель работы

Изучение и экспериментальное исследование джиттера в ВОСП.

3.2 Задание к работе

- 1 Изучить инструкцию по технике безопасности.
- 2 Изучить структурную схему лабораторного макета.
- 3 Изучить устройство, принцип работы и инструкции использования следующих приборов:
 - ОЛТ (оптический линейный терминал) 2×16;
 - осциллограф;
 - анализатор ошибок.
- 4 Произвести измерения параметров джиттера ВОСП.

3.3 Методы и устройства измерения джиттера

Фазовые отклонения являются специфическим видом искажений, которые возникают в процессе формирования и передачи цифровых сигналов и оказывают существенное влияние на качество передачи информации в цифровой сети связи. Источники цифровых сигналов вырабатывают элементы цифрового сигнала с равномерной скоростью. Однако при последующих операциях с цифровым сигналом регулярность следования элементов сигнала нарушается: их фактическое положение не совпадает с временными позициями, которые имели место в источнике сигнала.

Различают два вида фазовых отклонений: дрожание и дрейф фазы. Фазовые дрожания (jitter – джиттер) определяются как кратковременные, с частотой более или равной 10 Гц, фазовые отклонения значащих моментов цифрового сигнала от их идеальных временных положений. Значимой может быть любая легко определяемая точка сигнала (передний или задний фронты импульсов). Дрейф фазы (wander – вандер) определяется как долговременное, с частотой менее 10 Гц, фазовое отклонение значащих моментов цифрового сигнала от их идеальных временных положений. Необходимость деления на дрожание и дрейф фазы связана с различными причинами их возникновения и различным влиянием на качество передачи.

Функция фазового дрожания может быть получена путем графического отображения во времени отклонений положений фронтов импульсов на выходе контролируемой системы по отношению к фронтам соответствующих импуль-

сов входного цифрового сигнала. Иллюстрация такого подхода приведена на рисунке 3.1, где представлены: а – цифровой сигнал на входе контролируемой системы; б – цифровой сигнал на выходе контролируемой системы; в – серия отсчетов, амплитуда которых равна величине отклонения от значащих моментов, описываемая непрерывной функцией времени, характеризующей модуляцию фазы цифрового сигнала.

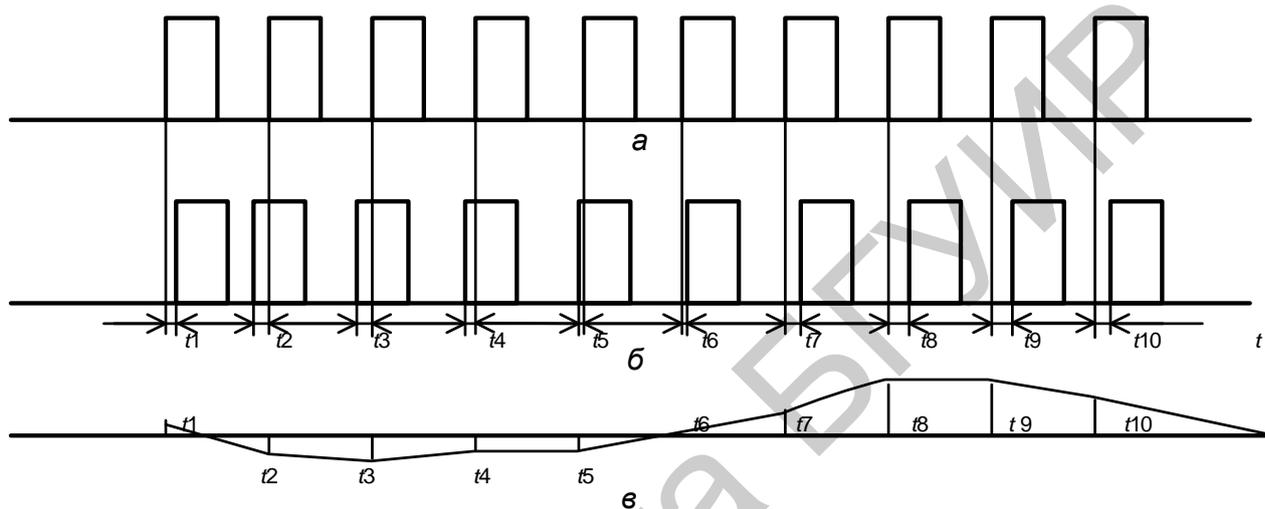


Рисунок 3.1 – Определение фазовых дрожаний

Амплитуда фазовых отклонений выражается как в единицах абсолютного времени Δt_i , так и в относительных единицах $a(t_i) = \Delta t_i / T$ – единичных интервалах (ЕИ) (Unit Interval – UI), где T – временной интервал, соответствующий длительности одного элемента цифрового сигнала. Измерение фазовых отклонений в относительных единицах позволяет нормировать и сравнивать амплитуды фазовых отклонений на различных сетевых иерархических стыках.

Рост амплитуды фазовых отклонений цифрового сигнала, передаваемого по сети, приводит к следующим ухудшениям качества передачи:

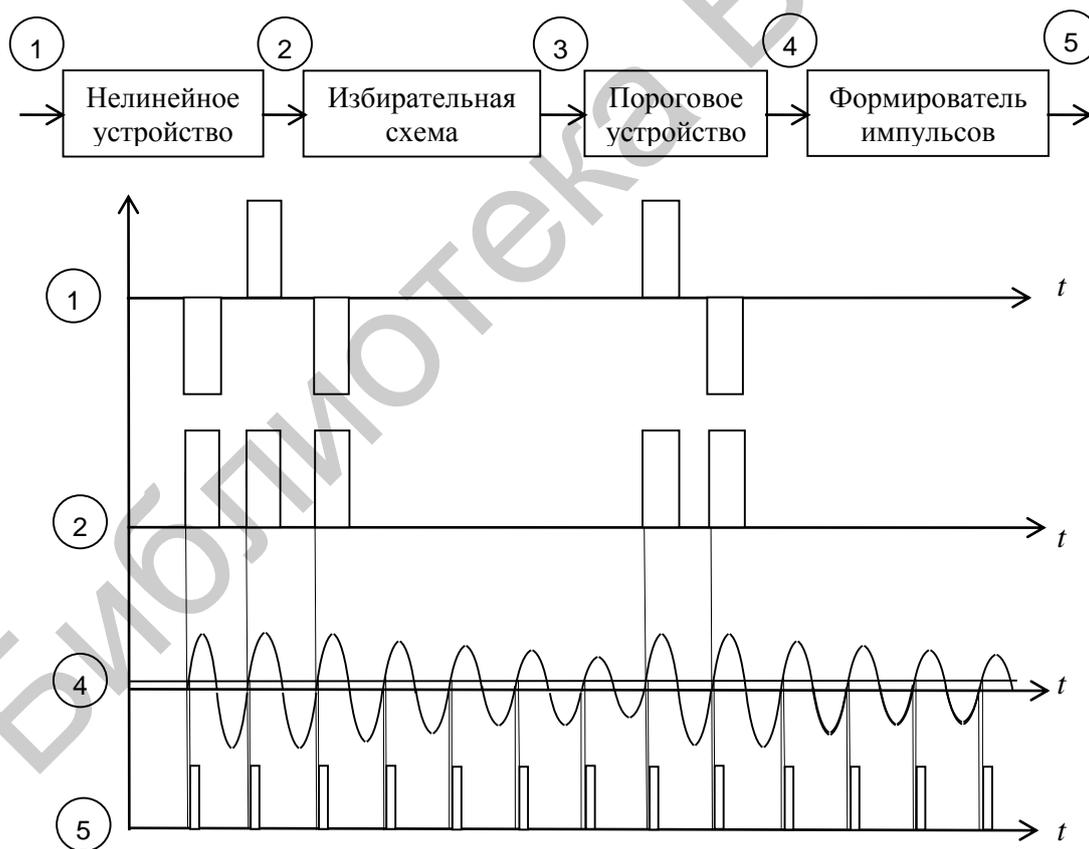
- увеличению коэффициента битовых ошибок при регенерации цифрового сигнала, что связано со смещением моментов стробирования информационного сигнала относительно оптимальных положений, в которых информационный сигнал имеет или максимальные, или минимальные значения;
- искажению аналогового сигнала, передаваемого цифровыми методами, вследствие фазовых отклонений отсчетов АИМ-сигнала при цифроаналоговом преобразовании;
- появлению неуправляемых проскальзываний в цифровых сигналах в результате переполнения устройств памяти, используемых в определенных видах оконечного оборудования.

Меры по предотвращению первого вида ухудшений предпринимаются на этапе разработки оборудования цифровых систем передачи и реализуются в процессе его настройки.

Снижение ухудшений второго типа достигается путем ограничения амплитуды дрожаний фазы до уровня, субъективно допустимого для данной аналоговой службы. Для сетей связи общего пользования нормы установлены в соответствии с требованиями служб телефонии.

Для предотвращения влияния ухудшений третьего типа требуется понимание как механизма возникновения фазовых дрожаний и законов их накопления в разнообразном оборудовании цифровой сети, так и принципов работы всего сетевого комплекса в процессе установления различных, часто весьма сложных, соединений.

Для недопущения снижения качества передачи ниже допустимого уровня необходимы контроль и нормирование фазовых отклонений. Определим основные источники фазовых дрожаний. Как уже отмечалось, возникновение фазовых дрожаний обусловлено принципами обработки и передачи цифрового сигнала, в связи с чем различают фазовые дрожания линейного тракта и фазовые дрожания, возникающие в оборудовании временного группообразования.



- 1 – трехуровневый линейный сигнал; 2 – двухуровневый сигнал;
- 3 – гармонический сигнал с АМ;
- 4 – выделенное гармоническое колебание тактовой частоты;
- 5 – последовательность импульсов с тактовой частотой

Рисунок 3.2 – Иллюстрация работы схемы выделения тактовой частоты

Фазовые дрожания, возникающие в линейном тракте, делятся на систематические (регулярные) и несистематические (нерегулярные). Регулярные фазовые дрожания коррелированы с передаваемой последовательностью символов линейного сигнала, одним из основных источников которого является неидеальность работы схем выделения тактовой частоты (ВТЧ) регенераторов. Для проведения полной регенерации цифрового сигнала (по амплитуде и временному положению) ВТЧ выделяет из линейного сигнала хранирующее колебание. Типовая структурная схема ВТЧ на основе метода пассивной фильтрации приведена на рисунке 3.2.

Принятый и скорректированный сигнал из контрольной точки 1 в нелинейном устройстве подвергается нелинейной обработке, в результате чего формируется импульсная последовательность, содержащая в своем спектре дискретную составляющую с тактовой частотой (контрольная точка 2). В зависимости от случайного содержания передаваемой информации (группирования одноуровневых символов) уровень этой составляющей будет случайно меняться. Таким образом, на выходе избирательной схемы (резонансный контур или полосовой фильтр) будет гармонический сигнал с амплитудной модуляцией (контрольная точка 3). В пороговом устройстве, следующем за избирательной схемой, определяются моменты пересечения этим квазигармоническим сигналом порогового уровня. В практических схемах уровень порога отличен от нуля, так что малые изменения амплитуды сигнала приводят к вариациям момента срабатывания порогового детектора, иначе говоря, имеет место амплитудно-фазовое преобразование (контрольная точка 4). Формирователь импульсов необходим для формирования стробирующих импульсов, определяющих моменты принятия решения (контрольная точка 5).

Другим источником фазовых дрожаний является неидеальность коррекции линейных искажений, появляющихся при прохождении цифрового сигнала по среде передачи, что приводит к появлению межсимвольных помех, длительность и амплитуда которых определяются информационным содержанием сигнала. Их воздействие вызывает смещение временных положений импульсов в последовательности на выходе нелинейного устройства.

Асимметрия импульсов, воздействующих на избирательную схему, которая связана с неидеальностью коррекции и последующим нелинейным преобразованием, также приводит к появлению временных флуктуаций на выходе этой цепи. Изменения длительности импульсов составляют еще один источник систематических фазовых дрожаний, зависящий от содержания передаваемой информации.

В зависимости от способа реализации выделителя тактовой частоты (активной фильтрации на основе фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) или пассивной фильтрации) величина дрожаний фазы на выходе цепи из N аналогичных регенераторов пропорциональна N^d , где показатель степени d лежит в пределах $0,5 \dots 1$.

Выделение хронизирующего колебания пассивными избирательными цепями из-за их неточного выполнения приводит к появлению случайных (нерегулярных) временных сдвигов, величина которых зависит от степени расстройки и характера фазовой характеристики избирательной цепи.

Несистематические фазовые сдвиги вносят в сигнал тактовой синхронизации переходные помехи от других цифровых линейных трактов, работающих в этом же электрическом кабеле. Так как каждая влияющая цепь вносит независимую помеху, то вызываемые ими дрожания фазы являются некоррелированными и их уровень растет пропорционально корню квадратному от числа регенераторов в линейном тракте.

В оборудовании временного группообразования формируются цифровые сигналы высших уровней иерархии на основе объединения нескольких низкочастотных цифровых сигналов. Формирование группового сигнала производится путем периодического чередования битов/байтов поступающих компонентных потоков на стороне передачи, его разделение на исходные компонентные низкоскоростные потоки выполняется на стороне приема. Для правильного распределения компонентных сигналов по соответствующим каналам в групповом сигнале необходимо реализовать цикловую синхронизацию, вводя сигнал цикловой синхронизации.

Как правило, компонентные потоки поступают от независимых источников информации с одинаковыми номинальными скоростями передачи, но фактически отличающимися друг от друга на величину, нормируемую соответствующими допусками на эти скорости. Непосредственное объединение таких сигналов может быть выполнено только после их синхронизации от общего задающего генератора с использованием процедуры цифрового выравнивания (согласования скоростей). При цифровом выравнивании скоростей передачи в компонентный сигнал вводят дополнительные временные интервалы – биты выравнивания, которые используются для передачи или информационных битов, или битов вставки в зависимости от вида цифрового выравнивания, а в групповой цифровой сигнал вводятся служебные биты управления выравниванием, на основе которых на приемной стороне обрабатываются биты цифрового выравнивания.

В структуре цикла группового цифрового сигнала также должны быть предусмотрены позиции для передачи необходимого для функционирования оборудования объема служебной информации.

Таким образом, возникновение фазовых дрожаний в компонентных цифровых сигналах при аппаратной реализации временного группообразования на основе описанных принципов вызывается следующими явлениями:

- периодическим (с частотой цикла/подцикла) удалением из равномерного потока хронизирующих импульсов компонентных сигналов тех из них, которые определяют временные положения служебных битов в цикле группового цифрового сигнала: циклового синхросигнала, битов управления выравниванием и др.;

– исключением из этого же потока импульсов, определяющих положение выравнивающих временных интервалов с частотой, определяемой фактическим расхождением между частотами приема входной информации (записи) и передачи этой информации в составе группового сигнала (считывания);

– проведением операции выравнивания не в тот момент времени, когда она требуется, а в момент времени, предопределенный принятой структурой цикла группового сигнала.

Первые два явления вызывают относительно высокочастотную фазовую модуляцию импульсов хронирования при усреднении частоты, которая в определенной мере подавляется в цепях выделения хронирования линейного тракта и узкополосной ФАПЧ приемного оборудования временного группообразования.

Наибольший вред приносят дрожания фазы, обусловленные последней из перечисленных причин (фазовые дрожания времени ожидания), так как они имеют составляющие с частотами, лежащими внутри полосы пропускания ФАПЧ, и поэтому могут появиться в сигналах компонентных потоков на выходе устройств разделения и передаваться по линейным трактам.

В оборудовании SDH при передаче виртуальных контейнеров по сети как неделимых модулей необходима подстройка их частоты под частоту сигнала STM-n конкретного мультиплексора. Подстройка реализуется на основе механизма смещения указателей, что приводит к дополнительным фазовым дрожаниям по смещению указателя (pointer jitter).

Основными параметрами джиттера являются амплитуда и частота. Джиттер измеряется как пиковая величина отклонения фазы (частоты), приведенная к длине периода передачи данных. Основной единицей джиттера является единичный интервал UI. Использование относительных единиц UI позволяет сравнивать параметр джиттера для каналов различных уровней иерархии PDH/SDH.

Для точного измерения джиттера необходимо точно определить ширину полосы частот измерений. В противном случае невозможно оценить влияние джиттера на параметры системы передачи в силу различных свойств на разных частотах прохождения джиттера по каналам связи и различной степени воздействия на информационные и синхронизирующие сигналы. Наиболее естественным способом организации измерений джиттера в этом случае можно было бы считать спектральный анализ джиттера с использованием частотно-селективного приемника. Однако такой метод измерения джиттера не нашел распространения в практике эксплуатационных измерений, так как его реализация в приборах оказалась слишком дорогостоящей. В настоящее время метод спектрального анализа используется в нескольких измерительных системах для лабораторного анализа джиттера.

В практике эксплуатационных измерений получила распространение методика, состоящая из двух измерений, различающихся используемыми фильтрами. Этот метод измерений дает меньше информации о джиттере, чем

спектральный анализ джиттера, однако он позволяет получить важные результаты и экономически более эффективен.

Метод был одобрен ИТУ-Т, который разработал рекомендации по параметрам фильтров. Для проведения измерений были определены фильтры, обеспечивающие измерения низкочастотных и высокочастотных компонентов джиттера (фильтры НР1 и НР2 соответственно). Параметры фильтров представлены на рисунке 3.3.

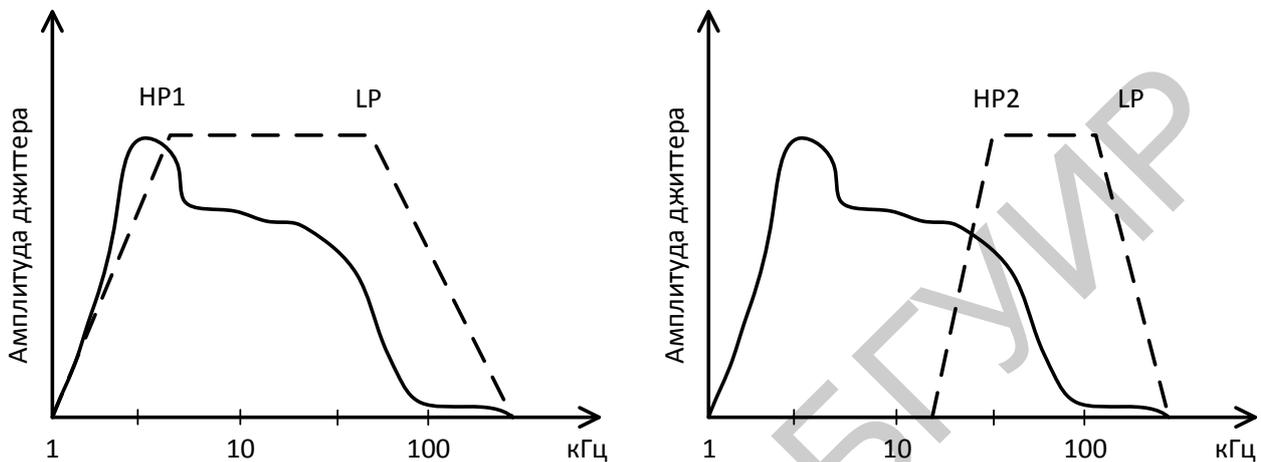


Рисунок 3.3 – Фильтры, использующиеся при измерениях джиттера

При измерениях джиттера различают следующие измерения: 1 – собственного джиттера системы передачи; 2 – максимально допустимого джиттера (МТД); 3 – передаточной характеристики джиттера (ЖТФ).

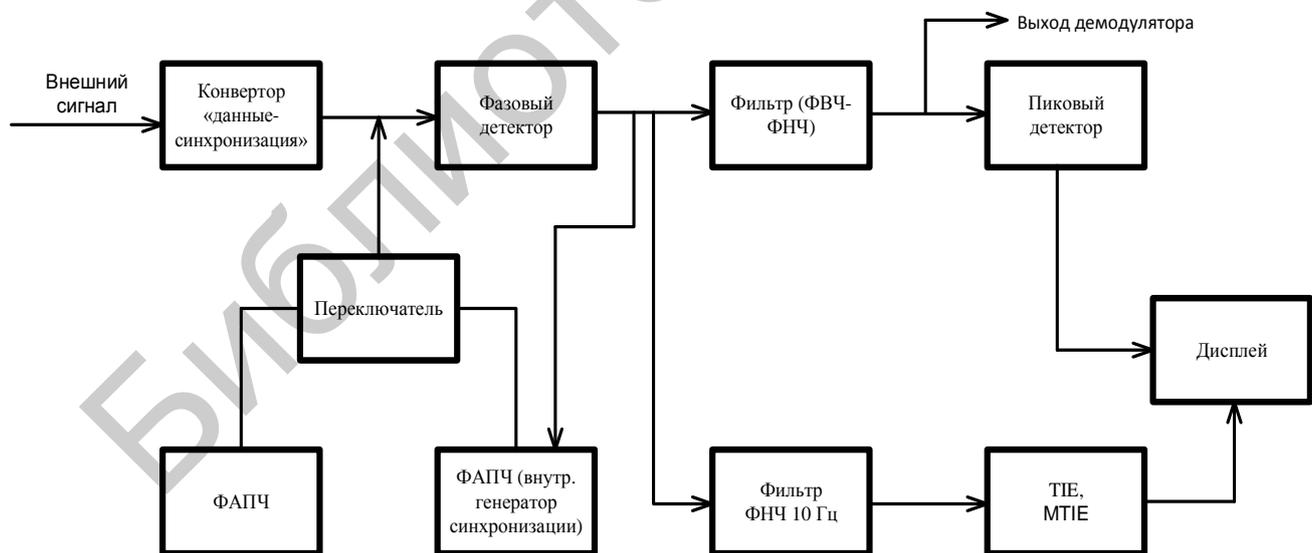


Рисунок 3.4 – Структурная схема анализатора джиттера

Структурная схема анализатора джиттера представлена на рисунке 3.4. Внешний сигнал, содержащий джиттер, может содержать длинные последовательности нулей. Поэтому на входе анализатора джиттера ставится конвертор «данные – сигнал синхронизации», который преобразует произвольный цифровой сигнал в сигнал с регулярно изменяющимся состоянием (например, альтернативную последовательность 1010). В основе устройства конвертора лежит принцип быстродействующей петли ФАПЧ. В результате конвертор обеспечивает выделение информации о джиттере на фазовом детекторе, однако сам конвертор вносит собственный джиттер некоторого уровня. Для измерения джиттера используется опорный фазостабильный сигнал. Для его первичной обработки в состав анализатора включена медленная петля ФАПЧ, определяющая фазу внутреннего генератора синхросигнала (опорного сигнала фазового детектора). Зависимость параметра джиттера от времени получается путем простого сравнения фаз двух сигналов. Полученная информация фильтруется, данные о положительном и отрицательном джиттере обрабатываются отдельно. Фильтр нижних частот (ФНЧ) 10 Гц выделяет сигнал для измерения вандера. Для обнаружения импульсного джиттера в системах SDH используется цифровая фильтрация с высоким разрешением. Некоторые компании используют аналоговые фильтры джиттера. В этом случае время обработки данных сильно увеличивается, точность измерений уменьшается, вероятно ситуация, когда анализатор, построенный на таком принципе, не обеспечивает измерения импульсного джиттера.

3.4 Нормирование фазовых дрожаний

МСЭ-Т на основе результатов многолетних исследований, проведенных в разных странах, рекомендует следующую методологию нормирования фазовых отклонений в цифровых сетях:

- максимальный предел фазовых отклонений для сети должен определяться так, чтобы он не был превышен на любом иерархическом стыке;
- должны быть ограничения на дрожание фазы в отдельных видах цифрового оборудования (временного группообразования, цифровых линейных трактах);
- измерения нормируемых показателей должны иметь единую технологическую основу, обеспечивающую сопоставимость результатов измерений дрожаний фазы и их накоплений в национальных и международных сетях любой конфигурации.

С учетом сказанного установлены следующие виды требований к показателям дрожаний и дрейфа фазы:

- предельные нормы на дрожание и дрейф фазы на выходе цифровых каналов (трактов);
- нормы на допустимые дрожания и дрейф фазы на входе цифровых каналов (трактов), при которых цифровой канал (тракт) должен работать устойчиво;

– нормы на характеристики передачи дрожания и дрейфа фазы цифровых каналов (трактов).

Выходные фазовые дрожания подразделяются на две категории:

- выходные фазовые дрожания сети на типовых иерархических стыках;
- собственное фазовое дрожание, генерируемое конкретным оборудованием.

Уровень выходных фазовых дрожаний аппаратуры временного группообразования, цифровых участков и сетевых трактов регламентируется в виде предельных норм, которые не должны превышать при любых условиях эксплуатации независимо от количества включенного оборудования.

Данные, приведенные в таблице 3.1, представляют собой сводку требований из нескольких нормативных документов:

- a) для иерархических стыков сетевых трактов – по Рекомендациям G.823 и G.825;
- b) для стандартного оборудования временного группообразования – по Рекомендациям G.742 и G.751;
- c) для цифровых участков – по Рекомендации G.921.

Таблица 3.1 – Нормы на выходные фазовые дрожания

Тракт		Предельная норма на фазовые дрожания, ЕИ		Частота среза измерительного фильтра			Длительность ЕИ, нс
		B_1	B_2	f_1 , Гц	f_3 , кГц	f_4 , кГц	
Обозн.	Скорость, Мбит/с						
E1	2,048	1,5	0,2	20	18	100	488
E2	8,448	1,5	0,2	20	3	400	118
E3	34,368	1,5	0,15	100	10	800	29,1
E4	139,264	1,5	0,075	200	10	3500	7,18
STM-1	155,52	1,5	0,15	500	65	1300	6,43
STM-4	622,08	1,5	0,15	1000	250	5000	1,607
STM-16	2488,32	1,5	0,15	5000	1000	20 000	0,402
STM-64	9953,28	1,5	0,15	20 000	4000	80 000	0,100

Нормативные требования на фазовые дрожания аппаратуры временного группообразования и цифровых участков должны обеспечиваться в отсутствие фазового дрожания на их входах.

Максимальные фазовые дрожания на иерархических стыках цифровой сети должны удовлетворять приведенным нормам независимо от состава и количества оборудования, включенного в тракт перед рассматриваемым стыком.

Нормы на выходные дрожания фазы цифровых участков относятся к условным эталонным цифровым трактам.

Измерение фазового дрожания на типовом стыке проводится без отключения от полезной нагрузки по схеме, приведенной на рисунке 3.5.

Рекомендуется следующий порядок проведения измерений:

а) установить соединения в соответствии с рисунком 3.4 и убедиться, что измеряемый тракт работает без ошибок;

б) выбрать нужный измерительный фильтр и измерить пиковую амплитуду выходного фазового дрожания в данной полосе частот, регистрируя максимальную величину в течение заданного интервала измерения;

с) повторить операцию по предыдущему пункту для необходимых полосовых фильтров.

Дополнительный анализатор спектра, подключенный к выходу измерительного фильтра, позволяет наблюдать частотный спектр выходного фазового дрожания в установленной фильтром полосе частот.

Измерение собственного фазового дрожания конкретного цифрового оборудования выполняется с использованием реальной или имитируемой нагрузки. Измерения с имитацией реальной нагрузки псевдослучайной последовательностью позволяют совмещать измерения фазовых дрожаний и параметров ошибки с отключением канала при проведении приемосдаточных и сертификационных испытаний. Измерения в этом случае проводятся по схеме, изображенной на рисунке 3.5, при подключении на вход измеряемого объекта источника сигнала без фазовых дрожаний и при подключении к его выходу соответствующего полосового фильтра и измерителя фазового дрожания.

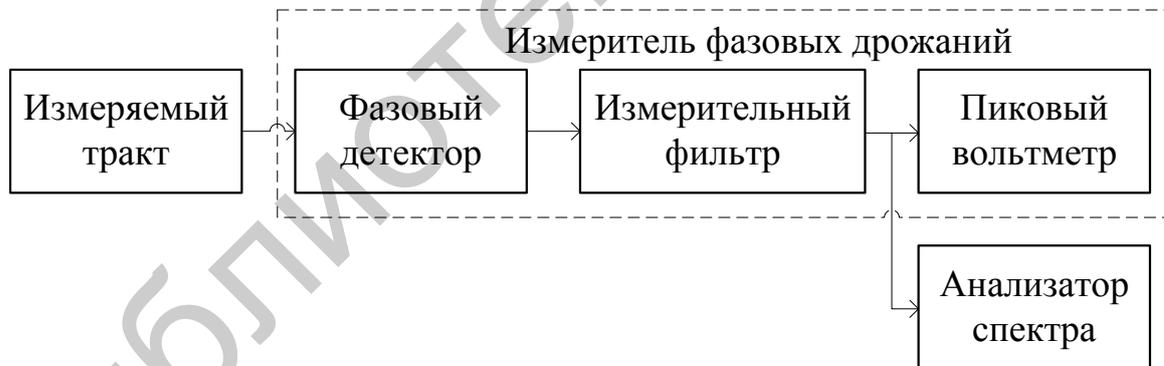


Рисунок 3.5 – Измерение выходного фазового дрожания на иерархическом стыке

Цифровая сеть представляет собой совокупность соединенных между собой элементов, включающих в себя цифровые участки, аппаратуру временного группообразования и цифровые станции. Каждый из этих сетевых элементов имеет свойственный ему верхний предел по входным фазовым дрожаниям, превышение которого сопровождается сбоями и отказами в работе. Поэтому в процессе эксплуатации сети необходимо знать, каковы эти пределы, определить для них нормы и проводить их измерение на согласованной основе.

Нормы на допустимые дрожания и дрейф фазы на входе цифрового тракта или оборудования (Maximum Tolerable Jitter, MTJ) определяют нижний предел максимально допустимого входного дрожания и дрейф фазы, при котором оборудование должно работать устойчиво. Нормирование допусков на входные фазовые дрожания основано на испытаниях с помощью испытательного сигнала, имеющего синусоидальное дрожание фазы. Любое цифровое оборудование различных иерархических уровней должно без существенного ухудшения своей работы выдерживать на своих входах цифровой псевдослучайный испытательный сигнал, регламентированный Рекомендацией O.150, который модулирован по фазе синусоидальными сигналами с амплитудой, определяемой маской, представленной на рисунке 3.6, и значениями, приведенными в таблице 3.2.

Синусоидальные фазовые дрожания, не моделируя шумоподобные случайные дрожания фазы цифровых сигналов, вырабатываемых внутри сети, позволяют создать четкую нормативную базу для оценки показателей дрожаний, которая обеспечивает устойчивую работу комплекса сетевого оборудования. Допускаемые амплитуды определяются как все амплитуды до (но не включая) той, которая вызывает нормированное ухудшение показателей ошибок.

Нормированное ухудшение показателя ошибок может выражаться в виде двух критериев: увеличения коэффициента ошибок по битам (BER) и момента появления ошибок. При проведении измерений необходимо рассмотреть оба критерия, поскольку допуск на входное фазовое дрожание измеряемого объекта определяется в основном двумя факторами:

- способностью схемы восстановления хранимого сигнала точно восстанавливать этот сигнал из информационного потока, подверженного фазовому дрожанию, и, возможно, другому ухудшению качества (искажение импульсов, переходное влияние, шум и т. д.);

- способностью выдерживать динамически меняющуюся скорость входного цифрового информационного сигнала (например, способностью к цифровому выравниванию и емкостью буферного запоминающего устройства (ЗУ) по входу и выходу из синхронизма в асинхронной цифровой аппаратуре группообразования).

Критерий увеличения BER позволяет определить воздействие фазового дрожания на схему восстановления хранимого сигнала приемника, что очень важно для оценки первого фактора. Критерий появления ошибок рекомендуется для оценки второго фактора.

Методология измерений следующая:

- 1) на измеряемое оборудование/канал подается тестовый сигнал (обычно ПСП) с внесенным дрожанием фазы на определенной частоте;

- 2) амплитуда вносимого фазового дрожания варьируется, а на выходе измеряемого оборудования/канала измеряется параметр ошибки;

- 3) по одному из указанных критериев делается вывод о максимально допустимом дрожании фазы для данной частоты;

- 4) измерения повторяются для другой частоты;

5) в результате получается зависимость амплитуды максимально допустимого дрожания фазы от частоты для данного измеряемого оборудования, которая и является предметом измерений.

Метод по критерию увеличения параметра BER

Критерий увеличения BER для измерений МТJ определяется как амплитуда дрожания фазы (на заданной частоте), удваивающая коэффициент битовых ошибок BER, что обусловлено определенным уменьшением отношения сигнал/шум. Процедура метода разделяется на два этапа.

На первом этапе определяются два значения BER в зависимости от отношения сигнал/шум в эталонных точках измеряемого канала. При нулевом фазовом дрожании к сигналу добавляется шум или сигнал ослабляется до получения нужного первоначального BER1. Затем шум или затухание сигнала снижается до момента, когда коэффициент битовых ошибок уменьшится в два раза и становится равным $BER2 = BER1/2$.

На втором этапе на определенной частоте в испытательный сигнал с отношением сигнал/шум, обеспечивающим BER2, вводится дрожание фазы до момента получения первоначально выбранного значения BER1. Введенное эквивалентное дрожание фазы представляет собой точную и воспроизводимую меру параметра МТJ. Второй этап метода повторяется для достаточного количества частот, чтобы измерение точно показывало постоянный допуск синусоидального входного дрожания фазы для испытываемого объекта в используемом диапазоне частот. Измерительное устройство должно обеспечивать генерирование сигнала с изменяемым фазовым дрожанием, получение необходимого отношения сигнал/шум в информационном сигнале и измерение BER испытываемого объекта.

На рисунке 3.7 представлена схема измерения, применяемая для метода по критерию увеличения BER. Синтезатор частот обеспечивает более точное определение частот, используемых для измерения. Анализатор фазового дрожания применяется для контроля амплитуды вырабатываемого фазового дрожания.

Метод с использованием критерия появления ошибок

Критерий появления ошибок для измерения параметра МТJ определяется как наибольшая амплитуда фазового дрожания на заданной частоте, обеспечивающая в конечном счете не более двух секунд с ошибками. Секунды суммируются в последовательных 30-секундных интервалах, в течение которых амплитуда фазового дрожания возрастала.

Рассматриваемый метод заключается в изменении частоты вносимого фазового дрожания и определении критической амплитуды допустимого дрожания фазы для каждой частоты и амплитуды фазового дрожания испытательного сигнала, обеспечивающего соблюдение критерия появления ошибок.

Таблица 3.2 – Значения параметров допусков на дрожание и дрейф фазы на входе тракта

Условное обозначение	Скорость, кбит/с	Полный размах, ЕИ							Частота, Гц							ПСП
		A_0	A_1	A_2	A_3	f_0	f_{10}	f_9	f_8	f_1	f_2	f_3	f_4			
ОЦК	64	1,15	0,25	0,05		$1,2 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	20	600	$3 \cdot 10^3$	$20 \cdot 10^3$	$2^{11}-1$		
E1	2048	36,9	1,5	0,2	18	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$4,88 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$	1,67	20	2400	$18 \cdot 10^3$	$100 \cdot 10^3$	$2^{15}-1$		
E2	8448	152	1,5	0,2	–	$1,2 \cdot 10^{-5}$	–	–	–	20	400	$3 \cdot 10^3$	$400 \cdot 10^3$	$2^{15}-1$		
E3	34 368	618,6	1,5	0,15	–	–	–	–	–	100	1000	$10 \cdot 10^3$	$800 \cdot 10^3$	$2^{23}-1$		
E4	139 264	2506,6	1,5	0,075	–	–	–	–	–	200	500	$10 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^6$	$2^{23}-1$		
STM-1	–	–	1,5	0,15	–	–	–	–	–	500	3300	$65 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^6$	$2^{23}-1$		
STM-4	–	–	1,5	0,15	–	–	–	–	–	100	1000	$25 \cdot 10^4$	$5 \cdot 10^6$	$2^{23}-1$		
STM-16	–	–	1,5	0,15	622	–	–	10	12,1	5000	$1 \cdot 10^5$	$1 \cdot 10^6$	$20 \cdot 10^6$	$2^{23}-1$		
STM-64	–	–	1,5	0,15	2490	–	–	10	12,1	$20 \cdot 10^3$	$4 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^6$	$80 \cdot 10^6$	$2^{31}-1$		

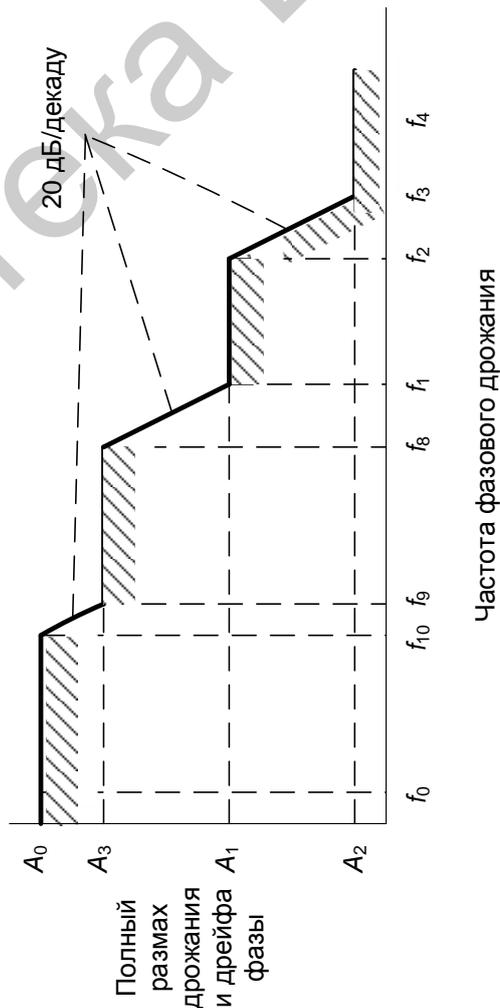


Рисунок 3.6 – Нижний предел максимально допустимого входного дрожания и дрейфа фазы

Метод включает в себя следующие операции:

- исключение «переходной области» амплитуды фазового дрожания, в которой прекращается безошибочная работа;
- измерение отдельных секунд с ошибками в течение 30 с для каждого увеличения амплитуды фазового дрожания, исключая «переходную область»;
- определение для каждой частоты наибольшей амплитуды дрожания фазы, при которой суммарное число секунд с ошибками не превышает двух.

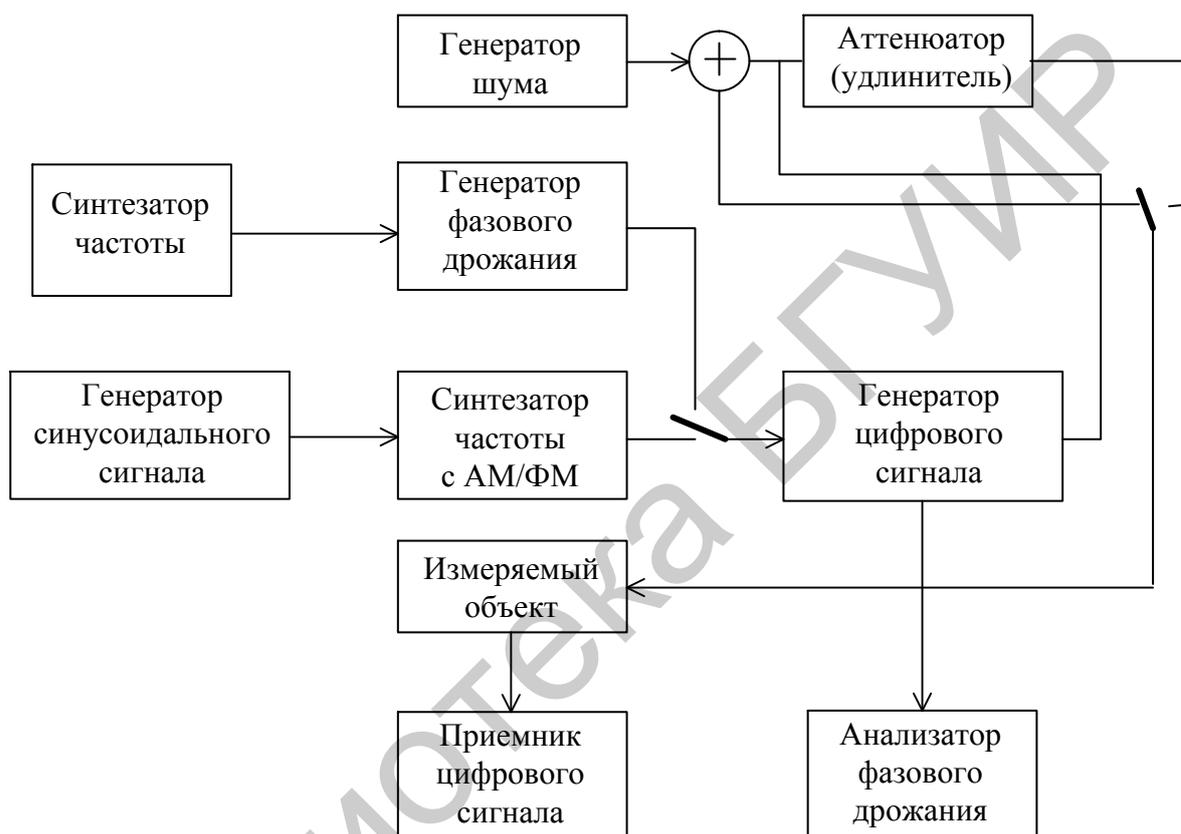


Рисунок 3.7 – Схема организации измерений параметра МТJ по критерию увеличения ошибок

Процесс повторяется для числа частот, достаточного для того, чтобы измерение точно отражало допустимое для испытываемого объекта синусоидальное входное фазовое дрожание в заданном диапазоне частот. Измерительное устройство должно при этом вырабатывать сигнал с управляемым фазовым дрожанием и измерять количество секунд с ошибками, обусловленных фазовым дрожанием во входном сигнале.

Схема измерений указанным методом приведена на рисунке 3.8. Последовательность измерений следующая:

- а) установить частоту входного дрожания фазы на нужное значение и отрегулировать его амплитуду на ноль единичных интервалов;

б) увеличить амплитуду фазового дрожания и определить область, в которой прекращается безошибочная работа; снизить амплитуду дрожаний до уровня, при котором начинается эта область;

с) зарегистрировать число секунд с ошибками за 30-секундный измерительный интервал (первоначальное измерение должно показывать отсутствие секунд с ошибками);

д) увеличить амплитуду фазовых дрожаний до удовлетворения критерия появления ошибок и зарегистрировать установленный размах фазового дрожания и его частоту;

е) повторить операции а...е с нужным числом частот;

ф) амплитуды измеренных таким образом дрожаний должны располагаться в области выше кривой маски, изображенной на рисунке 3.6, которая является нижним пределом допустимого входного фазового дрожания.

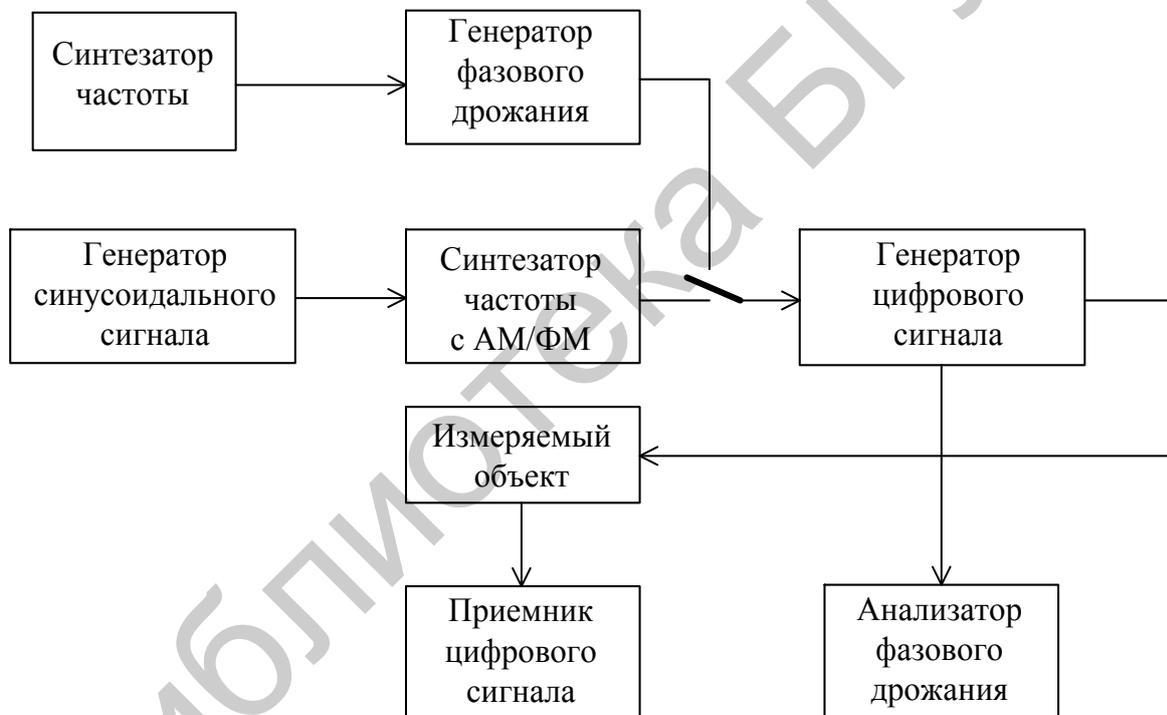


Рисунок 3.8 – Схема измерений параметра МТJ по критерию появления ошибок

Характеристика передачи фазового дрожания определяет частотную зависимость отношения амплитуды синусоидального выходного фазового дрожания к амплитуде синусоидального входного фазового дрожания для данной скорости передачи. При обработке цифрового сигнала в большинстве видов оборудования происходит затухание высокочастотных фазовых дрожаний, имеющих на входе. Но некоторые виды оборудования, имеющие цепи синхронизации на ос-

нове ФАПЧ или на основе пассивных избирательных систем с выбросами амплитудно-частотной характеристики, имеют тенденцию усиливать низкочастотные фазовые дрожания. Нормативные документы жестко определяют ограничительные пределы для характеристики передачи фазовых дрожаний.

Характеристика передачи фазового дрожания определяет частотную зависимость отношения амплитуды выходного фазового дрожания к амплитуде входного фазового дрожания для данной скорости передачи.

Типовая характеристика передачи фазового дрожания в виде маски определена Рекомендациями МСЭ-Т и приведена на рисунке 3.9. В любом случае норма на уровень усиления передачи (X) не должна превышать 1 дБ. Норма на характеристику передачи дрейфа фазы разрабатывается.

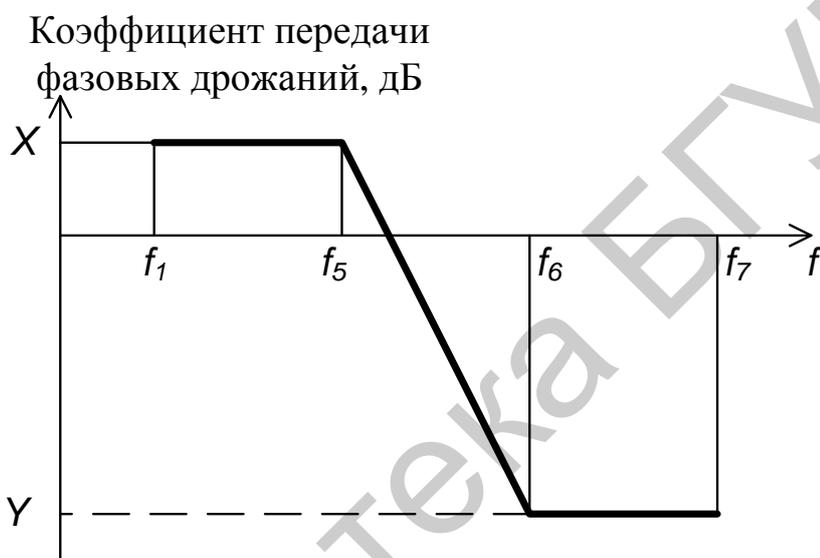


Рисунок 3.9 – Типовая характеристика передачи фазового дрожания

Значения уровней X (усиления) и Y (ослабления) и частот f_1, f_5, f_6, f_7 определены требованиями к конкретным видам оборудования:

а) для компонентных потоков при временном группообразовании – Рекомендациями МСЭ-Т G.743, G.751;

б) для цифровых участков – Рекомендацией G.921.

В таблице 3.3 приведены нормы на характеристики передачи фазовых дрожаний компонентных потоков при временном группообразовании.

Таблица 3.3 – Нормирование характеристик передачи фазовых дрожаний при временном группообразовании

Скорость, кбит/с	X , дБ	Y , дБ	Частота, Гц			
			f_1	f_5	f_6	f_7
2048	0,5	- 19,5	< 20	40	400	100
8448	0,5	- 19,5	< 20	100	1000	400
34 368	0,5	- 19,5	< 20	300	3000	800

Нижний предел частоты (f_1) должен быть по возможности более низким: значение 5...10 Гц считается приемлемым. Для цифровых участков Рекомендация G.921 упоминает лишь одно требование на величину усиления X : в любом случае норма на усиление не должна превышать 1 дБ.

Измерение характеристики передачи фазового дрожания (Jitter Transfer Function – JTF) производится с помощью испытательного псевдослучайного сигнала, модулированного синусоидальным фазовым дрожанием по схеме, изображенной на рисунке 3.10, при подключенном к выходу измерителя фазовых дрожаний в соответствии с выражением

$$JTF(f) = 20 \lg((J_{\text{ВЫХ}}(f) - J_{\text{ВХ}}(f)) / J_{\text{ВХ}}(f)),$$

где $J_{\text{ВЫХ}}(f)$, $J_{\text{ВХ}}(f)$ – фазовые дрожания цифрового сигнала на выходе и входе цифрового тракта соответственно.

В настоящее время методика проведения таких измерений не определена, поэтому в сложившихся условиях считается целесообразным проводить их при уровне входных дрожаний в районе 1/2 от предельных норм.

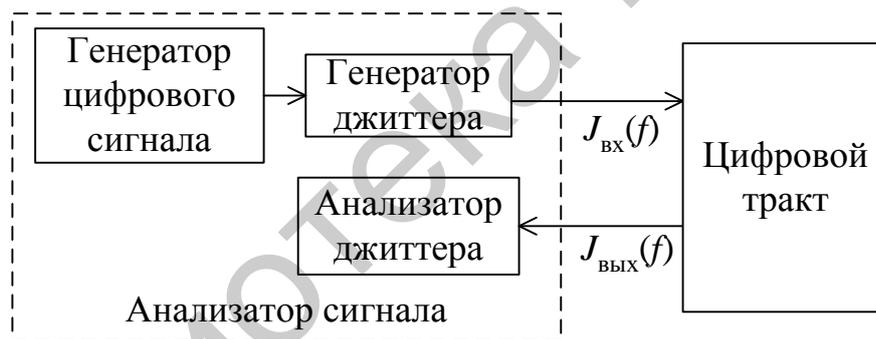


Рисунок 3.10 – Схема измерений характеристики передачи фазового дрожания

3.5 Описание схемы и конструкции

Структурная схема комплекса для измерения джиттера представлена на рисунке 3.11.

В состав стенда входят: оптический аттенюатор 1, блок питания 2, оптический линейный терминал 3, осциллограф 4, анализатор цифровых трактов 5.

Описание оборудования, которое включает в себя измерительный стенд, приведено в лабораторной работе №2 (подраздел 2.4).

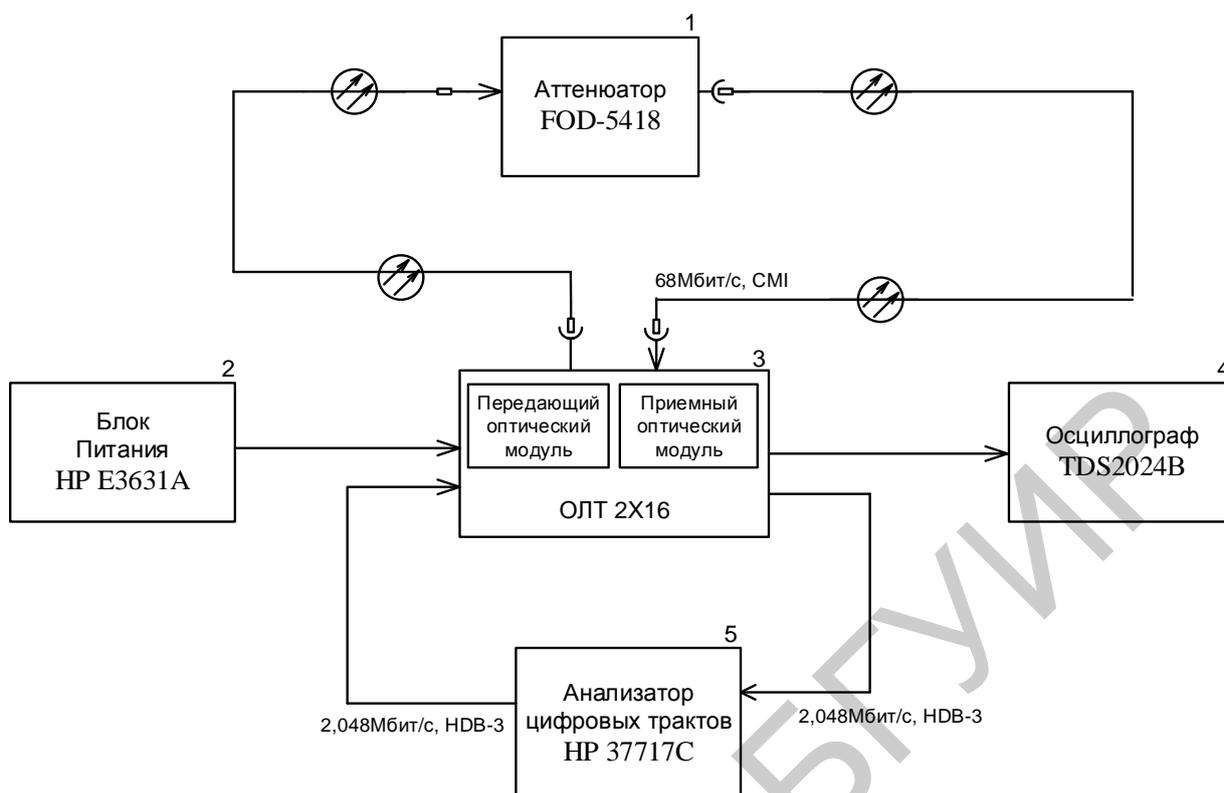


Рисунок 3.11 – Структурная схема стенда для тестирования параметров качества ВОСП

3.6 Описание работы

Экспериментальные исследования измерительного стенда для тестирования джиттера волоконно-оптической системы передачи проводятся по схеме, представленной на рисунке 3.11.

С анализатора цифровых трактов 5 на ОЛТ 2×16 подается псевдослучайная последовательность импульсов определенной частоты. ОЛТ 2×16 осуществляет преобразование входного электрического сигнала в оптический и передает его в волоконно-оптическую линию связи со скоростью 68 Мбит/с. На приемную часть модуля поступает маломощный сигнал, что может привести к неверному его приему и дешифрированию. Принятый сигнал подается на анализатор цифровых трактов и сравнивается с исходным, таким образом определяется достоверность принятого сигнала.

Любое различие между двумя символами в анализаторе интерпретируется как битовая ошибка. Для измерения джиттера устанавливается номинальное для системы значение коэффициента ошибок. На анализаторе цифровых трактов производится измерение джиттера, которое показывает, удовлетворяет ли система заданным параметрам.

Включенный в экспериментальную установку осциллограф 4, позволяет наглядно убедиться в воздействии джиттера на сигнал.

3.7 Порядок выполнения работы

Подготовить к работе измерительный комплекс.

1 Собрать макет по схеме, приведенной на рисунке 3.11.

2 При помощи переключателей «Сеть» включить все приборы, входящие в установку.

3 Ознакомиться с пунктами 1.5.1, 1.5.4 лабораторной работы №1. Провести конфигурирование выходных и входных интерфейсов прибора, выбрать соответствующий режим измерения и работы в соответствии с рисунком 1.5. Затухание аттенюатора установить в положение, соответствующее работе без ошибок. При этом должны погаснуть все светодиоды, сигнализирующие об авариях и ошибках на приборе HP 37717C.

4 Провести измерение собственного фазового дрожания, генерируемого оборудованием ОЛТ 2×16:

– В окне выбрать вкладку **JITTER**, выбрать в параметре **JITTER/WANDER** значение **JITTER**. Параметр **JITTER** установить в положение **OFF**.

– В окне **RECIEVE** выбрать вкладку **JITTER**, установить параметр **RECIEVER RANGE** в значение **1.6 UI**, параметр **HIT THRESHOLD** – в значение **1.0 UI**, параметр **FILTER** – в положение **OFF**, параметр **ADDITIONAL RMS FILTER** – в положение **OFF**, параметр **WANDER** – в положение **OFF**.

– В окне **RESULTS** установить параметр **JITTER** → **CUMULATIVE**, выбрать вкладку **AMPLITUDE**.

– Запустить измерения нажатием кнопки **RUN**, измерения проводить в течение 5 мин, остановить измерения повторным нажатием кнопки **RUN**.

– Результаты измерений занести в отчет.

5 Измерить устойчивость системы ко входному фазовому дрожанию:

– В окне **TRANSMIT** выбрать вкладку **JITTER**, выбрать в параметре **JITTER/WANDER** значение **JITTER**, параметр **JITTER** установить в положение **TOLERANCE**, параметр **Q-FACTOR** – в положение **LOW Q**, параметр **PATTERN** – в положение **2¹⁵-1**, параметр **NUMER OF POINTS** – в положение **15**, параметр **DWELL TIME** – в положение **20.0s**, параметр **DELAY TIME** – в положение **5.0s**, параметр **ERROR THRESHOLD** – в положение **ANY ERRORS**.

– В окне **RECIEVE** выбрать вкладку **JITTER**, установить параметр **RECIEVER RANGE** в значение **1.6 UI**, параметр **HIT THRESHOLD** – в значение **1.0 UI**, параметр **FILTER** – в положение **OFF**, параметр **ADDITIONAL RMS FILTER** – в положение **OFF**, параметр **WANDER** – в положение **OFF**.

– В окне **RESULTS** установить параметр **JITTER** → **CUMULATIVE**, выбрать вкладку **AMPLITUDE**.

– Перейти в окно **TRANSMIT**, запустить измерения нажатием кнопки **RUN**, во время измерения в окне **TRANSMIT** видна маска по G.823, измерение завершится автоматически приблизительно через 15 мин.

– Результаты измерения занести в отчет.

6 Распечатать результаты измерений на встроенном термопринтере, для чего выбрать окно **OTHER**, значение параметра **FUNCTION** установить в **LOGGING**, параметр **LOGGING SETUP** – в значение **CONTROL**, параметр **LOGGING** – в положение **OFF**, параметр **LOG ON DEMAND** – в положение **SCREEN DUMP**. После чего можно распечатать любое изображение экрана нажатием кнопки **PRINT NOW**. Если необходимо распечатать только одно окно, то для этого выбрать соответствующее окно кнопками **TRANSMIT**, **RESULTS** и т. д., после чего нажать кнопку **SINGLE WINDOW**.

7 На цифровом осциллографе посмотреть изменение сигнала на выходе ОЛТ 2×16 при измерении джиттера.

8 Измерить передаточную функцию фазового дрожания:

– Для выполнения автоматического измерения передаточной функции фазового дрожания передатчик и приемник должны быть настроены на одно и то же значение скорости передачи и других параметров.

– Провести калибровку прибора: для этого соединить вход с выходом, в окне **TRANSMIT** выбрать вкладку **JITTER**, выбрать в параметре **JITTER/WANDER** значение **JITTER**, параметр **JITTER** установить в положение **TRANSFER FUNCTION**, параметр **NUMER OF POINTS** – в положение **10**, параметр **DWELL TIME** – в положение **20.0s**, параметр **DELAY TIME** – в положение **5.0s**, параметр **INPUT MASK** – в положение **G.823 LOW Q**, параметр **PATTERN** – в положение **2¹⁵-1**, параметр **ERROR THRESHOLD** – в положение **ANY ERRORS**.

– В окне **RECIEVE** выбрать вкладку **JITTER**, установить параметр **RECIEVER RANGE** – в значение **1.6 UI**, параметр **HIT THRESHOLD** – в значение **1.0 UI**, параметр **FILTER** – в положение **OFF**, параметр **ADDITIONAL RMS FILTER** – в положение **OFF**, параметр **WANDER** – в положение **OFF**.

– В окне **RESULTS** установить параметр **JITTER** → **TRANSFER FUNCTION**.

– После установления перейти в окно **TRANSMIT** и нажать кнопку **RUN**. Окно джиттера на время выполнения процесса калибровки заменяется информационным окном. По завершении на экране вновь будет отражаться окно **TRANSMIT**, процесс занимает около 10 мин.

– Для измерения передаточной функции фазового дрожания в окне **TRANSMIT** вкладки **JITTER** для параметра **MODE** выбрать значение

MEASURE (происходит автоматически после калибровки). Восстановить исходную схему измерения. Нажать кнопку **RUN**. Процесс построения графика можно наблюдать в окне **TRANSMIT**. По окончании измерения результаты в графической или текстовой форме в зависимости от значения параметра **FORMAT** можно наблюдать в окне **RESULTS**. Для распечатки результатов выбрать режим **SINGLE WINDOW**, нажать кнопку **PRINT NOW**.

3.8 Содержание отчета

- 1 Структурная схема стенда для тестирования параметров качества ВОСП.
- 2 Результаты измерений.
- 3 Выводы по работе.

3.9 Контрольные вопросы

- 1 Дайте определение дрожания и дрейфа фазы.
- 2 Какие существуют источники дрожания и дрейфа фазы в цифровых каналах и трактах транспортной сети?
- 3 Какое влияние оказывают фазовые дрожания на работу цифровых систем и сетей телекоммуникаций?
- 4 Назовите единицы измерения джиттера.
- 5 Поясните структурную схему прибора для измерения джиттера.
- 6 Каковы нормы на дрожание и дрейф фазы на выходе цифровых каналов (трактов)?
- 7 Какие существуют нормы на допустимые дрожания и дрейф фазы на входе цифровых каналов (трактов), при которых цифровой канал (тракт) должен работать устойчиво?
- 8 Назовите нормы на характеристики передачи дрожания и дрейфа фазы цифровых каналов (трактов).
- 9 Поясните структурную схему измерительного макета.
- 10 Поясните принцип работы с оборудованием ОЛТ 2×16.
- 11 Поясните процедуру измерения дрожания и дрейфа фазы на выходе цифровых каналов (трактов).
- 12 Поясните процедуру измерения устойчивости системы ко входному фазовому дрожанию.
- 13 Поясните процедуру измерения передаточной функции фазового дрожания.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИЗУЧЕНИЕ ПРИНЦИПОВ ПОСТРОЕНИЯ И ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОПТИЧЕСКИХ МУЛЬТИПЛЕКСОРОВ CWDM

4.1 Цель работы

Изучение технологии уплотнения сигналов по длинам волн; рассмотрение методов измерения параметров; измерение параметров исследуемого оптического мультиплексора.

4.2 Задание к работе

- 1 Ознакомиться с инструкцией по технике безопасности.
- 2 Изучить технологии уплотнения сигналов по длинам волн.
- 3 Изучить методы измерения параметров оптических мультиплексоров CWDM.
- 4 Изучить устройство, принципы работы и инструкции по эксплуатации тестера OT-2-5 и оптического рефлектометра.
- 5 Измерить параметры оптического мультиплексора CWDM: вносимые потери, переходное затухание между каналами и возвратные потери.

4.3 Спектральное разделение каналов

Спектральное разделение каналов – это способ транспортировки по одному физическому оптоволокну нескольких каналов передачи данных путем разнесения длин волн (цветов), основанный на способности оптического волокна одновременно передавать свет различных длин волн (цветов) без взаимной интерференции. Каждая длина волны представляет отдельный оптический канал. При помощи мультиплексирования в едином световом потоке, пересылаемом по оптическому волокну, можно объединить от четырех до 80 и более информационных каналов с разной длиной волны. Эта технология предназначена для передачи данных, поступающих в единую транспортную магистраль от различных источников на разной скорости и с использованием разных протоколов.

Структурная схема волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов приведена на рисунке 4.1.

Приемно-передающим модулем служит транспондер, который производит регенерацию входящего клиентского оптического сигнала. Транспондер может производить также конвертацию клиентского трафика из одного протокола передачи (зачастую Ethernet) в другой, более помехозащищенный, и передавать сигнал в линейный порт. Оптические мультиплексоры предназначены для объединения отдельных WDM-каналов в групповой сигнал для одновременной их передачи по одному оптическому волокну. Оптические демультиплексоры предназначены для разделения принятого группового сигнала на приемной стороне.

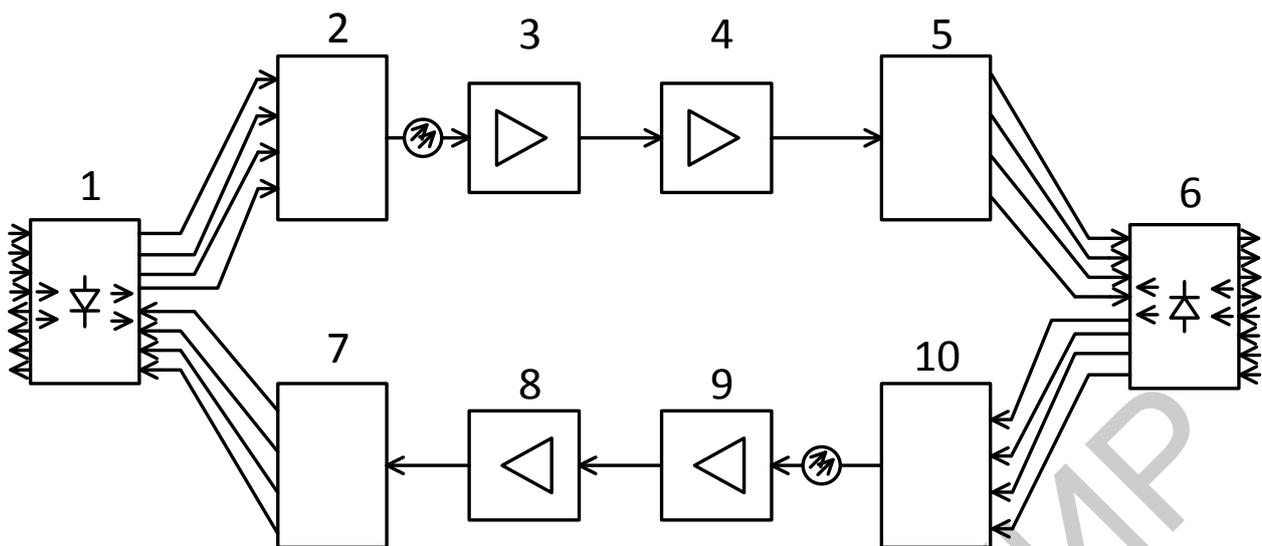


Рисунок 4.1 – Обобщенная структурная схема волоконно-оптической системы передачи со спектральным разделением каналов

В современных системах уплотнения функции мультиплексирования и демультиплексирования выполняет одно устройство – мультиплексор/демультиплексор (MUX/DEMUX). Оптические усилители широко применяются на протяженных линиях передачи данных с системами спектрального уплотнения DWDM.

Также в линии присутствует компенсатор хроматической дисперсии (Dispersion Compensation Module), предназначенный для исправления формы оптических сигналов, передаваемых в оптическом волокне, которые, в свою очередь, искажаются под влиянием хроматической дисперсии. Хроматическая дисперсия – физическое явление в оптическом волокне, заключающееся в том, что световые сигналы с разными длинами волн проходят одно и то же расстояние за разный промежуток времени и в результате чего происходит уширение передаваемого оптического импульса. Таким образом, хроматическая дисперсия является одним из основных факторов, ограничивающих протяженность ретрансляционного участка трассы. Стандартное волокно имеет значение хроматической дисперсии около 17 пс/нм.

Системы со спектральным уплотнением имеют несколько вариантов своей реализации. В таблице 4.1 приведен наиболее распространенный вариант их классификации.

Технология CWDM характеризуется достаточно большим интервалом между каналами (20 нм или 25 нм), что обеспечивает ей более широкую полосу частот по сравнению с другими WDM-технологиями. Это позволяет иметь несколько стандартных для оптических систем связи диапазонов частот («окон прозрачности»). В CWDM-системах можно организовать до 18 каналов и использовать как многомодовые, так и одномодовые оптические волокна [1]. Однако в CWDM-системах существуют две проблемы: 1) на более коротких длинах волн потери излучения почти вдвое больше, что заметно снижает дальность передачи;

2) существует ограничение по числу получаемых каналов из-за пика поглощения на длине волны 1383 нм, обусловленного наличием в волокне гидроксильной группы ОН (рисунок 4.2).

Таблица 4.1 – Классификация систем со спектральным уплотнением

Параметр	CWDM (неплотное СУ)	DWDM (плотное СУ)	HDWDM (высокоплотное СУ)
Расстояние между каналами	20,25 нм	1,6 нм	0,4 нм
Диапазон	О, Е, S, С, L	S, С, L	С, L
Число каналов	Максимум 18	Десятки/сотни	Десятки
Стоимость	Низкая	Высокая	Высокая

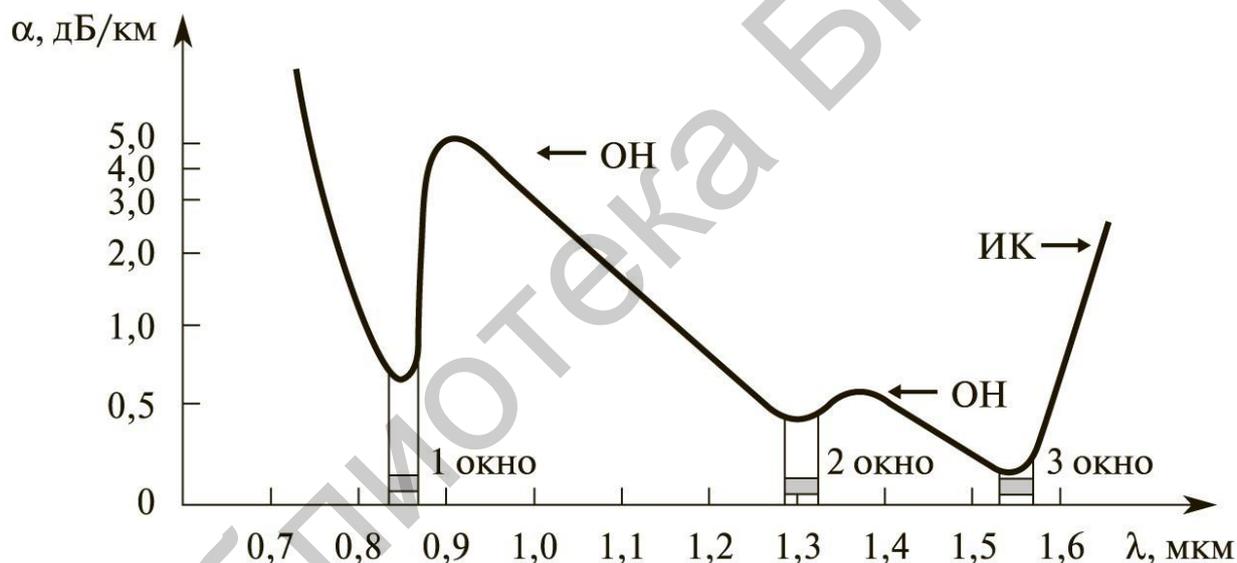


Рисунок 4.2 – Зависимость затухания от длины волны

Изначально, согласно рекомендации ITU - T G.694.2, использовался только диапазон волн 1470...1610 нм (восемь длин волн), а область 1260...1360 вообще не использовалась из-за увеличения затухания на длинах менее 1310 нм (увеличивается коэффициент рэлеевского рассеяния). Для компенсации эффекта поглощения на длине волны 1383 нм стали применять специальные волокна с нулевым «водяным пиком» (ZWPF, LWPF).

На практике число каналов обычно не превышает 16. В CWDM-системах при скорости передачи в одном канале 2,5 Гбит/с по 16 каналам обеспечивается скорость до 40 Гбит/с. Если система использует весь диапазон волн 1270...1610 нм, то ее называют FS-CWDM-системой (Full-spectrum CWDM).

В настоящее время технология CWDM получает все большее распространение на городских и региональных сетях MAN. Крупные операторы при модернизации существующих сетей дополнительно к системам SDH/ATM/IP начинают активно использовать CWDM-системы.

Технология CWDM позволяет значительно увеличить экономическую эффективность использования сети с минимальными затратами на реализацию данного решения. В настоящее время технология CWDM по параметру дальности может обеспечить выполнение тех же требований, что и DWDM-технология. Но если сравнивать технологии CWDM и DWDM, то важными преимуществами систем CWDM являются габариты, энергопотребление и стоимость оборудования.

Сегодня DWDM-оборудование для метросетей (например, система WDM-21 производства компании «OlenCom Electronics») потребляет небольшое количество энергии и имеет приемлемые габариты, но остается достаточно дорогостоящими.

Обобщая преимущества CWDM-систем, выделим следующие:

- компактность оборудования;
- низкое потребление электроэнергии;
- возможность использования многомодовых волокон;
- существенное уменьшение капитальных затрат;
- снижение эксплуатационных расходов.

Системы CWDM обеспечивают относительно малое число оптических каналов (16...18), но это не следует считать недостатком, так как такое количество обычно превышает современные потребности операторов связи в полосе пропускания.

Относительно большое расстояние между волнами соседних каналов в системах CWDM позволяет создавать дешевые коммутационные элементы для оптических мультиплексоров ввода/вывода (OADM – Optical Add-Drop Multiplexer) и оптических кросскоммутаторов (OXC – Optical cross Connector).

Дальнейшая перспектива развития CWDM-систем – это создание гибридных систем. Важной характеристикой сети является ее способность к масштабированию, то есть к наращиванию сети в процессе ее эксплуатации без замены всего оборудования. Создание гибридных систем является наилучшим способом увеличения числа каналов системы без замены оборудования. Теоретически в диапазоне волн для одного канала CWDM можно разместить до 15 каналов DWDM с шагом между несущими 0,8 нм. Это позволяет увеличить емкость 8-канальной CWDM-системы до 120-канальной. Практически уже реализованы системы, заполняющие один CWDM-канал восьмью каналами DWDM, что увеличивает емкость 8-канальной системы CWDM до 64 каналов. На рисунке 4.3 приведен рисунок оптического 4-канального мультиплексора с CWDM.

Таким образом, технология CWDM предлагает современные, надежные и дешевые решения для увеличения полосы пропускания при сохранении и даже увеличении гибкости и масштабируемости городских и региональных сетей.

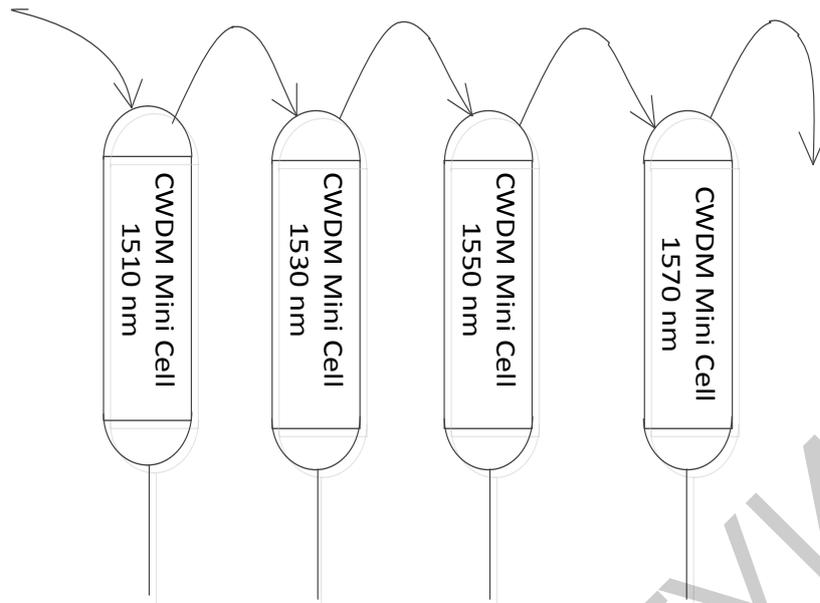


Рисунок 4.3 – Четырехканальный оптический мультиплексор

DWDM (Dense Wavelength-division multiplexing) – технология спектрального уплотнения, позволяющая одновременно передавать несколько информационных каналов по одному оптическому волокну на разных несущих частотах.

Суть технологии спектрального уплотнения заключается в объединении группы каналов, каждый из которых обладает своей длиной волны (λ) и частотой (f), в единый сигнал с помощью специального устройства – оптического мультиплексора – и передать по оптическому волокну. На приемной стороне происходит обратный процесс демультиплексирования.

Технология DWDM осуществляет передачу данных в C и L оптических диапазонах: 1530...1560 нм и 1570...1600 нм соответственно. Канальный «шаг» при этом составляет 0,8 или 0,4 нм (100 или 50 ГГц). Таким образом, применение данной технологии позволяет организовать до 88 каналов связи, используя пару волокон (прием-передача). Однако типовыми являются 40 каналов.

Канальная скорость сети, построенной по технологии DWDM, может достигать 100 Гбит/с, а общая пропускная способность – 8,8 Тбит/с.

4.4 Параметры оптических мультиплексоров и методы их измерения

Существует множество параметров оптических мультиплексоров: полоса пропускания, изоляция и дальние перекрестные помехи, направленность, вносимые потери, потери на отражение и т. д.

Полоса пропускания канала:

1) центральная длина волны канала – это среднее арифметическое значение верхней и нижней длин волны отсечки: $(\lambda_1 + \lambda_2)/2$;

2) интервал между каналами должен соответствовать частотному плану системы WDM;

- 3) полоса пропускания по уровню – минус 3 дБ;
- 4) неравномерность пика мощности в спектре канала.

Изоляция и дальние перекрестные помехи FEXT (Far-End Crosstalk). Изоляция определяется как минимальная величина ослабления мощности сигнала с выборкой по всем неосновным выходным каналам по отношению к основному входному каналу, измеряется в децибелах (для демультимплексора) [1]. Перекрестные помехи определяют превышение уровня мощности входного сигнала на длине волны λ над всей суммарной утекающей мощностью этого сигнала в неосновные каналы, измеряются в децибелах (для мультимплексора).

Направленность (Directivity), или ближние перекрестные помехи NEXT (Near-End Crosstalk), является мерой изоляции входных портов многопортового устройства. Эта характеристика присуща мультимплексорам.

Вносимые потери (IL) количественно определяют потери мощности на какой-то конкретной длине волны или в заданном спектральном диапазоне.

Потери на отражение возникают при вводе оптического излучения в оптический компонент (соединитель, мультимплексор или само волокно), при этом основная часть мощности передается по физическому каналу, часть поглощается, а часть отражается.

В оптических системах излучение отражается по двум причинам: в результате *рэлеевского рассеяния* и в результате *френелевского отражения*.

Рэлеевское рассеяние – когерентное рассеяние света без изменения длины волны на частицах, неоднородностях или других объектах, когда частота рассеиваемого света существенно меньше собственной частоты рассеивающего объекта или системы. Рэлеевское рассеяние возникает внутри волокна в результате неизбежного взаимодействия передаваемых световых волн с молекулами материала волокна. Поэтому рэлеевское рассеяние зависит от состава материала волокна, а также от длины волны. Амплитуда рэлеевского рассеяния составляет около минус 75 дБ на метр обычного волокна на длине волны 1550 нм, и на больших расстояниях его влияние может оказаться существенным.

Френелевское отражение возникает на границе раздела сред (разъемы, соединители и др.) в результате воздушных зазоров, рассогласования или несовпадения показателей преломления по обе стороны границы раздела.

Широко распространены следующие методы определения параметров:

- а) измерение затухания методом вносимых потерь;
- б) измерение затухания методом обратного рассеяния;
- в) измерение полосы пропускания канала;
- г) измерение изоляции и дальних перекрестных помех;
- д) измерение ближних перекрестных помех.

Измерение затухания методом вносимых потерь основано на измерении одного значения оптической мощности излучения относительно другого. Метод реализуется по схеме, представленной на рисунке 4.4.

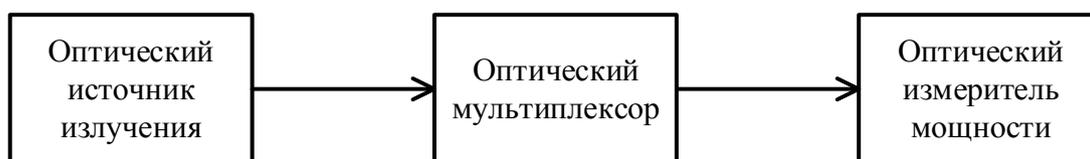


Рисунок 4.4 – Структурная схема измерения затухания методом вносимых потерь

Оптический источник излучения генерирует оптический сигнал на определенной длине волны, который поступает на мультиплексор. Ослабленный мультиплексором сигнал поступает на приемник оптического излучения. Положения и интенсивность источника излучения должны быть стабильны в течение всего времени проведения измерений. Длина волны и спектральная ширина источника излучения должны соответствовать требованиям, указанным в стандартах на мультиплексор.

Приемник излучения должен иметь фоточувствительную площадку, достаточную для регистрации всего конуса излучения, выходящего из оптического волокна. Приемник должен быть чувствительным к излучению во всем спектральном диапазоне, используемом в измерениях. Чувствительность приемника должна быть однородна по всей его площади.



Рисунок 4.5 – Схема для измерения параметров затухания методом обратного рассеяния

Метод обратного рассеяния (МОР) основан на регистрации обратного рассеянного излучения в оптическом волокне измеряемого кабеля при прохождении через него оптического импульса и измерении зависимости рассеяния от интенсивности этого затухания (рисунок 4.5). Метод пригоден для определения распределения оптических потерь по длине кабеля, распределенных и локальных неоднородностей типа обрыва, мест сварки и расстояния до неоднородностей, а также длины волокна, целостности волокна и расстояния до мест обрыва. Метод вносимых потерь основан на измерении одного значения оптической мощности излучения относительно другого (опорного).

Оптический рефлектометр – прибор для измерения параметров волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП). Принцип работы прибора основан на анализе отраженных оптических импульсов, излучаемых рефлектометром в оптическое волокно.

Структурная схема рефлектометра приведена на рисунке 4.6.

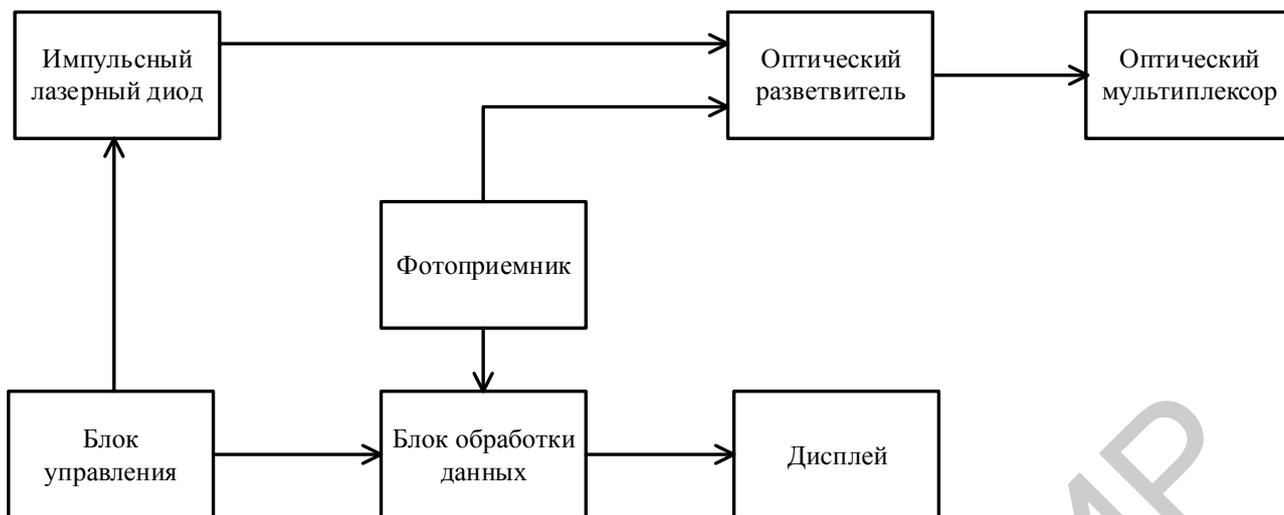


Рисунок 4.6 – Структурная схема оптического рефлектометра

Принцип работы ОР основан на реализации метода обратного рэлеевского рассеяния. Зондирующие импульсы от лазера относительно высокой мощности вводятся в исследуемое оптическое волокно (ОВ) через оптический разветвитель. Высокочувствительный фотоприемник регистрирует и измеряет временную зависимость той части оптического излучения, которая возвращается из ОВ в результате рассеяния и отражений обратно в рефлектометр. Источником зондирующих импульсов является мощный полупроводниковый лазер с прямой модуляцией по току накачки. При фиксированном токе накачки лазер генерирует световые импульсы фиксированной мощности и переменной длительности, задаваемой длительностью импульса тока накачки, вырабатываемого блоком управления. Блок управления вырабатывает импульсы тока накачки с частотой, устанавливаемой оператором вручную или определяемой автоматически по установленной максимальной длине тестируемого участка ВОЛС. Одновременно на блок обработки данных подаются синхронизирующие электрические импульсы. Зондирующий световой импульс попадает в тестируемое оборудование через оптический разветвитель. С помощью этого разветвителя сигнал обратного рассеяния от ВОЛС попадает на фотоприемник, который преобразует оптические сигналы в электрические таким образом, что величина электрического тока прямо пропорциональна мощности светового сигнала.

Для измерения требуемой полосы пропускания используются перестраиваемый лазер, подающий требуемую длину волны, и анализатор спектра.

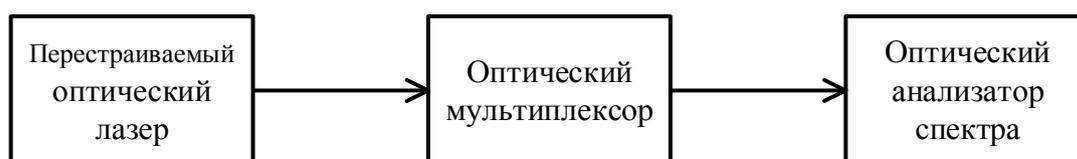


Рисунок 4.7 – Схема для измерения полосы пропускания канала

4.5 Порядок проведения лабораторной работы

Подготовить лабораторный макет. Для этого:

- подключить оптический рефлектометр, измеритель оптической мощности к сети переменного напряжения 220 В;
- снять защитные колпачки с оптических разъемов исследуемого мультиплексора CWDM;
- включить компьютер, подсоединить USB-кабель к разьему оптического рефлектометра и к соответствующему разьему компьютера.

В качестве оптического мультиплексора используется 4-канальный оптический мультиплексор DC20C04, основные технические параметры которого приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Основные технические параметры оптического мультиплексора DC20C04

Длина волны, нм	Вносимые потери, дБ	Полоса пропускания по уровню 0,5дБ, нм	Изоляция между каналами, дБ	Возвратные потери, дБ
1510	1,14	18,72	42,74	>45
1530	1,51	17,64	42,37	>45
1550	1,38	18,00	41,51	>45
1570	1,03	16,77	36,46	>45

В качестве экспериментального исследования измерим несколько параметров и сравним их с заявленными.

4.5.1 Измерение вносимых потерь на длине волны 1550 нм

Метод вносимых потерь основан на измерении одного значения оптической мощности излучения относительно другого. Сначала необходимо измерить мощность источника излучения. Для этого нужно соединить отрезком оптического волокна, имеющим на обоих концах разьемы FC/APC, источник излучения и измеритель мощности. В качестве источника излучения и измерителя мощности используются приборы ОТ-2-5/ИИ и ОТ-2-5/ИМ соответственно. Снимаются показания $p_{вх}$. Далее собрать схему измерения согласно рисунку 4.4, подсоединив вход мультиплексора с длиной волны 1550 нм к источнику излучения, а выход СОМ к измерителю мощности. Снимем показания $p_{вых}$. Разность между эталонным и измеренным уровнями и дает потери оптического мультиплексора $p = p_{вх} - p_{вых}$.

4.5.2 Измерение переходного затухания

Для измерения переходного затухания используем источник оптического излучения, мультиплексор и измеритель оптической мощности. Подсоединим источник оптического излучения на один из входов оптического коммутатора. На выход другого оптического коммутатора подсоединим измеритель оптической мощности. На источнике оптического излучения формируем длину волны излучения, равную 1550 нм, и подаем ее на вход СОМ оптического мультиплексора. Измеряем переходное затухание на остальных выходах мультиплексора 1510, 1530 и 1570 нм.

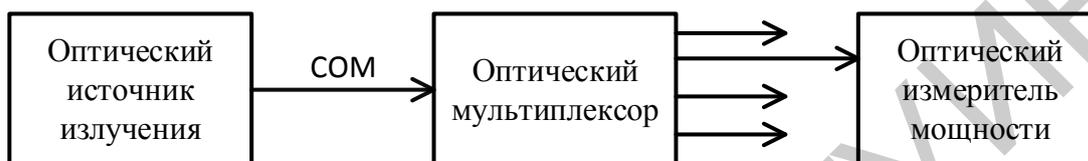


Рисунок 4.8 – Схема для измерения переходного затухания

Полученные результаты занести в таблицу и сравнить с заводскими параметрами, представленными в таблице 4.4.

4.5.3 Измерение возвратных потерь

Программное обеспечение для рефлектометра поддерживает работу с операционными системами Microsoft до Windows XP SP3, во всех более поздних версиях операционных систем требуется включать виртуальную машину, которая эмулирует работу операционной системы Windows XP. Для этого предварительно необходимо проделать следующие процедуры.

1 Включить рефлектометр.

2 Включить программу Пуск → Все программы → Oracle VM VirtualBox → Oracle VM VirtualBox.

3 Нажать кнопку старт (стрелочка «зеленого» цвета). Произойдет загрузка виртуальной системы.

4 После загрузки виртуальной системы XP выбрать в нижнем левом углу ярлык ОР-2-2 и активировать данное приложение мышью.

Примечание – Порядок выключения виртуальной машины такой же, как и в обычной операционной системе.

Следующие действия в программе доступны лишь в случае, если к ПЭВМ подключен рефлектометр и при загрузке программного обеспечения была проведена успешная инициализация рефлектометра.

1 *Установка параметров измерения*

Перед началом процесса измерений следует установить параметры измерений. Для этого требуется выбрать пункт меню *Измерение* → *Параметры* либо

нажать кнопку  на панели кнопок. После этого на экране появится окно, представленное на рисунке 4.9, в котором необходимо установить численные значения соответствующих параметров.

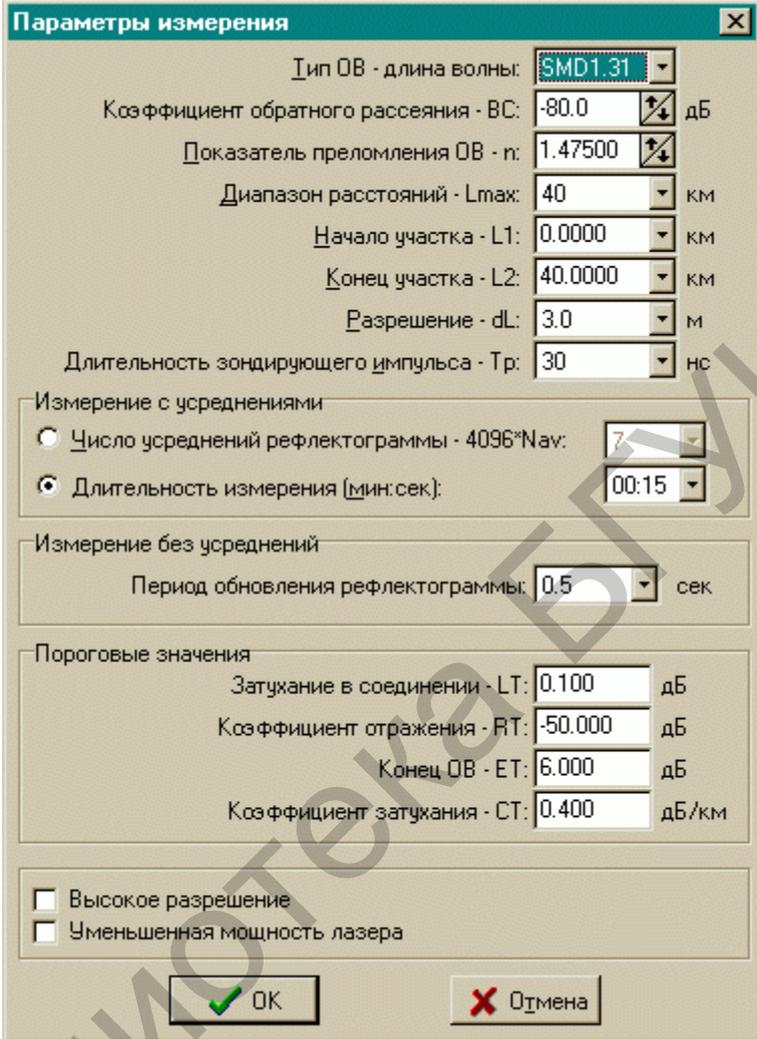


Рисунок 4.9 – Отображение параметров проводимых измерений

Тип ОВ – длина волны – тип сменного оптического блока (СОБ), установленного в рефлектометре. Определение типа блока производится программой при инициализации рефлектометра и отображается автоматически, при этом для СОБ ММ-0.85 мкм, ММ-1.31 мкм, ОМ-1.31 мкм и ОМ-1.55 мкм эта строка недоступна. Если установлен СОБ на две длины волны, то отображается **SMD-1.31** или **SMD-1.55** для **ОМ СОБ** и **MMD-0.85** или **MMD-1.31** для **ММ СОБ**, и оператор выбирает в этой строке длину волны.

Коэффициент обратного рассеяния – ВС – доля мощности оптического импульса в децибелах, рассеиваемая в ОВ и распространяющаяся к его началу. В программном обеспечении, поставляемом пользователю, установлены следующие значения:

- минус 81 дБ для одномодового (ОМ) ОВ и длины волны 1,55 мкм;

- минус 80 дБ для ОМ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- минус 75 дБ для многомодового (ММ) ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- минус 72 дБ для ММ ОВ и длины волны 0,85 мкм.

Коэффициент обратного рассеяния можно изменять с шагом 0,1 дБ.

Показатель преломления ОВ – n – значение показателя преломления ОВ, изменяемое с шагом 0,00001. В программном обеспечении, поставляемом пользователю, установлены следующие значения:

- 1,4682 для ОМ ОВ и длины волны 1,55 мкм;
- 1,4675 для ОМ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- 1,486 для ММ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- 1,490 для ММ ОВ и длины волны 0,85 мкм.

Диапазон расстояний – Lmax – максимальное значение длины измеряемых расстояний. Может принимать значения: 2, 5, 10, 20, 40, 80, 120, 160 и 240 км. Устанавливается оператором. Значение **Lmax** должно превышать возможную длину измеряемой линии. Параметр **Lmax** определяет период запуска зондирующих импульсов, который должен быть больше, чем двойное время прохождения оптического импульса по ОВ.

Начало участка – L1 – расстояние от начала ОВ до начала измеряемого участка; может принимать любые значения в пределах от 0 до **Lmax**.

Конец участка – L2 – расстояние от начала ОВ до конца измеряемого участка; может принимать любые значения в пределах от **L1** до **Lmax**.

Разрешение – dL – расстояние между двумя отсчетами (интервал дискретизации) рефлектометра.

Длительность зондирующего импульса – Tr – значение длительности зондирующего импульса; может принимать значения 10, 30, 90, 300, 1000, 3000, 10000, 20000 нс. Диапазон допустимых значений длительности оптических импульсов зависит от выбранного значения **Lmax** и автоматически ограничивается управляющей программой.

2 Измерение с усреднением

Число усреднений рефлектограммыт – 4096*Nav – определяет общее число усреднений рефлектограммы в памяти ПЭВМ в режиме работы с усреднением. Вводимое значение **Nav** может принимать значения 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128, 256, 512, 1024.

Длительность измерений [мин:сек] – задает длительность процесса измерений с усреднением.

Если в режиме измерений с усреднением оператор задает число усреднений рефлектограммы, то при этом автоматически высвечивается примерная длительность процесса измерений; если оператор задает длительность процесса измерений, то автоматически определяется, какому количеству усреднений рефлектограммы это соответствует.

3 Измерение без усреднений

Период обновления рефлектограммы – определяет период обновления отображения рефлектограммы на экране при измерениях в режиме реального времени; принимает значения 0,2; 0,5; 1,0; 2,0 с.

4 Пороговые значения

Затухание в соединении – LT – пороговое значение затухания в неоднородности (в децибелах). Неоднородности, затухание в которых превышает заданное пороговое значение, отображаются в таблице отметок при автоматическом анализе рефлектограммы. В программном обеспечении, поставляемом пользователю, установлено значение 0,1 дБ для одномодовых сменных оптических блоков и значение 0,2 дБ для многомодовых сменных оптических блоков.

Коэффициент отражения – RT – пороговое значение коэффициента отражения (в децибелах). Неоднородности с коэффициентом отражения выше этого порогового значения отображаются в таблице отметок при автоматическом анализе рефлектограммы. В программном обеспечении, поставляемом пользователю, установлено значение минус 50 дБ.

Конец ОВ – ET – пороговое значение затухания (в децибелах), для определения конца ОВ. Первая неоднородность с затуханием, превышающим пороговое значение, определяется при автоматическом анализе рефлектограммы как конец ОВ, все последующие неоднородности игнорируются. В программном обеспечении, поставляемом пользователю, установлено значение 6 дБ.

Коэффициент затухания – ST – пороговое значение коэффициента затухания участка (в децибелах на километр). Превышение порогового значения коэффициента затухания отмечается звездочкой в таблице отметок. В программном обеспечении, поставляемом пользователю, установлены значения:

- 0,25 дБ/км для ОМ ОВ и длины волны 1,55 мкм;
- 0,4 дБ/км для ОМ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- 1,0 дБ/км для ММ ОВ и длины волны 1,31 мкм;
- 3,0 дБ/км для ММ ОВ и длины волны 0,85 мкм.

5 Высокое разрешение – режим, в котором увеличена полоса пропускания оптического приемника, что дает возможность уменьшить мертвую зону и лучше различать близко лежащие неоднородности. Однако в этом режиме увеличиваются шумы оптического приемника.

6 Уменьшенная мощность лазера – включение режима измерения рефлектограммы с уменьшенной мощностью излучения лазера. Такой режим целесообразен для измерения больших коэффициентов отражения от неоднородностей.

Значения параметров измерений, устанавливаемые оператором, зависят от предполагаемых параметров ОВ (линии): длины и среднего затухания. При измерении этих характеристик с помощью оптического рефлектометра предельная величина измеряемого полного затухания увеличивается пропорционально длительности оптического импульса (и соответственно его энергии), но одновременно ухудшается пространственное разрешение рефлектометра, так как пространственная длина оптического импульса связана с его длительностью соотношением

$$L_P = c \frac{T_P}{2n}, \quad (4.1)$$

где c – скорость света в вакууме.

Например, длительности импульса $T_P = 300$ нс соответствует величина $L_P \approx 30$ м. Это значит, что практически невозможно различить две неотражающие неоднородности (типа сварного соединения ОВ), расстояние между которыми меньше L_P . С другой стороны, повысить динамический диапазон рефлектометра можно за счет увеличения числа усреднений, задаваемого параметром **Nav** (на 0,75 дБ при увеличении **Nav** в два раза), но при этом возрастает время измерения.

Величина **Lmax**, устанавливаемая перед началом измерения, должна превышать длину измеряемой линии. Если длина линии близка к какому-либо значению **Lmax** (превышает $2/3 * Lmax$), то наличие в сигнале обратного рассеяния мощного импульса, отраженного от дальнего конца ОВ, может приводить к небольшим искажениям затухания дальних участков линии или появлению на гладком участке рефлектограммы ложных отраженных импульсов. Во избежание этого рекомендуется выбирать значение **Lmax** не менее удвоенной длины линии.

Для корректировки значения показателя преломления ОВ необходимо выбрать пункт меню **Режим → Показатель преломления** или нажать кнопку  или клавишу **N**.

После этого на экране появится окно (рисунок 4.10), в котором указываются положения маркеров и предоставляется возможность изменить значение показателя преломления. При изменении показателя преломления происходит перерасчет положения маркеров. Нажатие кнопки **ОК** фиксирует новый показатель преломления ОВ для текущей рефлектограммы, нажатие кнопки **Отмена** или клавиши **ESC** возвращает его исходное значение.

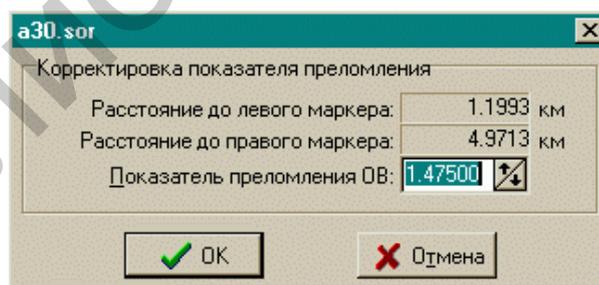


Рисунок 4.10 – Отображение параметров проводимых измерений

Для измерения возвратных потерь оптический рефлектометр нужно соединить со входом оптического мультиплексора. Ввиду наличия у ОР мертвой зоны для более точного измерения возвратных потерь необходимо оптический мультиплексор и оптический рефлектометр соединить через отрезок оптического кабеля длиной 1000 метров с разъемами FC/APC. Параметры измеряют в программе «Reflect».

Для измерения коэффициента отражения от разъемного соединения двух ОВ или от конца ОВ следует правый маркер установить на вершину отраженного импульса, левый – на участок рефлектограммы непосредственно перед ним (рисунок 4.11). Затем следует нажать кнопку  или клавишу **R** или выбрать пункт меню **Режим** → **Коэффициент отражения**. Результат измерения отображается в четвертой и пятой строках таблицы информационной панели:

- **R**, дБ – коэффициент отражения;
- **R**, км – расстояние от начала ОВ до левого маркера.

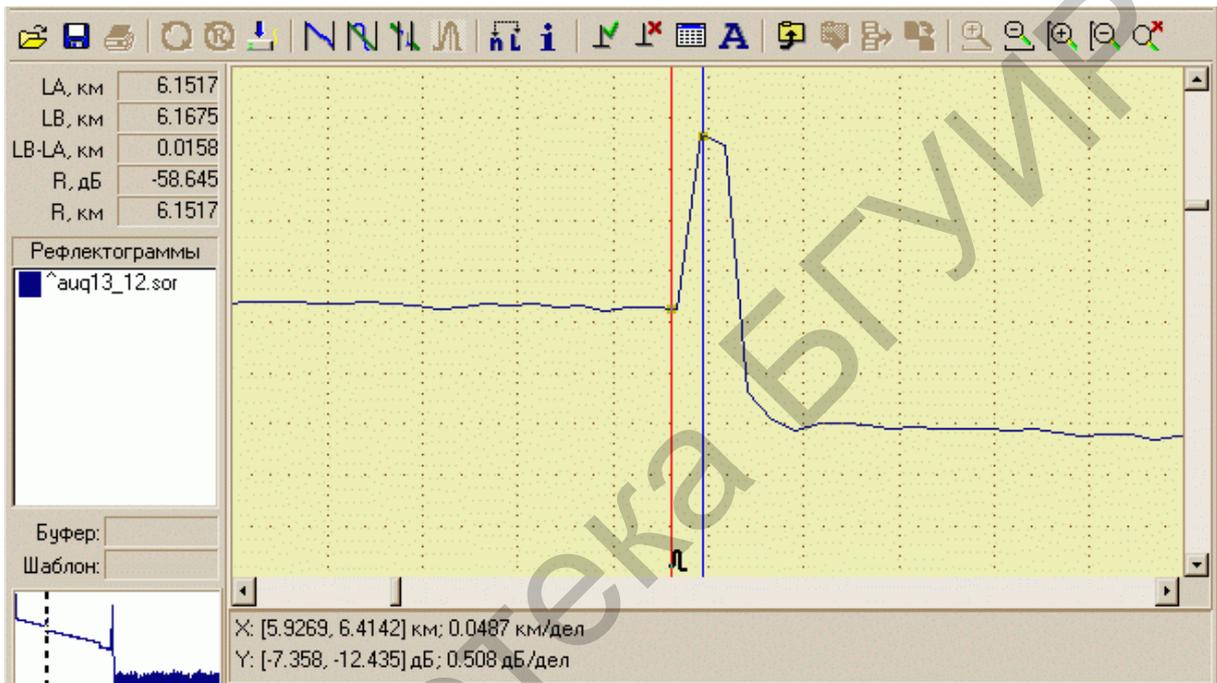


Рисунок 4.11 – Диаграмма измерения коэффициента отражения

Сравнить полученные параметры с заводскими.

4.6 Содержание отчета

- 1 Структурные схемы методов измерений.
- 2 Таблицы результатов измерений.
- 3 Выводы по работе.

4.7 Контрольные вопросы

1. На каких длинах волн работают CWDM- и DWDM-мультиплексоры?
- 2 Назовите основные характеристики оптических мультиплексоров.
- 3 Назовите технические параметры оптических мультиплексоров.
- 4 Какими методами можно выполнить измерение основных параметров оптических мультиплексоров?

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Дмитриев, С. А. Волоконно-оптическая техника. Современное состояние и новые перспективы / С. А. Дмитриев, Н. Н. Слепов. – М. : Техносфера, 2010. – 608 с.
- 2 Дмитриев, А. Л. Оптические системы передачи информации : учеб. пособие / А. Л. Дмитриев. – СПб. : ГИТМО, 2007. – 96 с.
- 3 Направляющие системы электросвязи : учебник. В 2 т. Т. 1 : Теория передачи и влияния / В. А. Андреев [и др.]. – М. : Горячая линия – Телеком, 2011. – 424 с.
- 4 Тарченко, Н. В. Проектирование цифровых систем и транспортных сетей телекоммуникаций : учеб.-метод. пособие / Н. В. Тарченко. – Минск : БГУИР, 2010. – 58 с.
- 5 Ракк, М. А. Измерения в цифровых системах передачи : учеб. пособие / М. А. Ракк. – М. : Маршрут, 2004. – 196 с.
- 6 Битнер, В. И. Нормирование качества телекоммуникационных услуг : учебное пособие / В. И. Битнер, Г. Н. Попов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2004. – 312 с.
- 7 Бесслер, Р. Проектирование сетей связи : справочник / Р. Бесслер, А. Дойч. – М. : Радио и связь, 1988. – 272 с.
- 8 Фриман, Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2006. – 496 с.
- 9 Фокин, В. Г. Оптические системы передачи и транспортные сети / В. Г. Фокин. – М. : ЭКО-Трендз, 2008. – 288 с.
- 10 Портнов, Э. Л. Принципы построения первичных сетей и оптические кабельные линии связи / Э. Л. Портнов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2009. – 544 с.
- 11 Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных систем и сетей : учеб. пособие / Е. Б. Алексеев [и др.] ; под ред. В. Н. Гордиенко и М. С. Тверецкого. – М. : Горячая линия – Телеком, 2008. – 392 с.
- 12 Евсеенко, Г. Н. Цифровые системы передачи : учеб. пособие / Г. Н. Евсеенко. – Ростов н/Д. : РКСИ, 2005. – 100 с.
- 13 ITU-T Recommendation G.703 (2005). Physical/electrical characteristics of hierarchical digital interfaces.

Учебное издание

Кийко Вадим Николаевич
Лукашевич Сергей Александрович
Тарченко Надежда Владимировна
Урядов Владимир Николаевич

**ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИЕ СЕТИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

ПОСОБИЕ

Редактор *М. А. Зайцева*
Корректор *Е. Н. Батурчик*

Компьютерная правка, оригинал-макет *В. М. Задоля*

Подписано в печать 15.11.2017. Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. 4,07. Уч.-изд. л. 4,0. Тираж 50 экз. Заказ 190.

Издатель и полиграфическое исполнение: учреждение образования
«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий №1/238 от 24.03.2014, №2/113 от 07.04.2014,
№3/615 от 07.04.2014. ЛП №02330/264 от 14.04.2014.
220013, Минск, П. Бровки, 6