

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
**СЕВЕРО-ЗАПАДНЫЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ЗАОЧНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ**  
**УНИВЕРСИТЕТ**

**КАФЕДРА РАДИОТЕХНИКИ**

# **ОПТОВОЛОКОННЫЕ УСТРОЙСТВА И СИСТЕМЫ**

**Методические указания к выполнению лабораторных работ**

Факультет радиоэлектроники

Направление и специальность подготовки дипломированных специалистов:

654200 – Радиотехника

200700 – Радиотехника

Санкт-Петербург

2002

Утверждено редакционно-издательским советом университета

УДК 621.37 (07)

Оптоволоконные системы и устройства: Методические указания к выполнению лабораторных работ. – СПб.: СЗТУ, 2002, – 33 с.

Изложена методика выполнения лабораторных работ исследовательского характера по основным разделам курса “Оптоволоконные устройства и системы” для студентов 6-го курса специальности 200700 – Радиотехника. Тематика и содержание лабораторных работ по дисциплине “Оптоволоконные системы и устройства” разработаны на основании требований государственных образовательных стандартов высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированных специалистов 654200 – Радиотехника (специальность 200700-Радиотехника).

Рассмотрено на заседании кафедры радиотехники 10 декабря 2001 г., одобрено методической комиссией факультета радиоэлектроники 10 января 2002 г.

Рецензенты: кафедра радиотехники (зав. кафедрой Г.И. Худяков д.т.н., проф.), Д.А. Чистяков к.т.н., доцент, В.М. Жемчугов к.т.н., доцент Санкт-Петербургского университета телекоммуникаций.

СОСТАВИТЕЛИ: А.Б.Борисов, доц., В.И. Маккавеев, д.т.н., проф.,

© А.Б.Борисов, В.И. Маккавеев.

## ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ.

Методические указания предназначены для студентов 6 курса специальности 200700 – радиотехника, изучающих дисциплину “Оптоволоконные устройства и системы”. Основной задачей лабораторного практикума по этой дисциплине является закрепление теоретических знаний, изучение некоторых современных методов научного исследования с компьютерным моделированием на основе пакета программ MatLAB и получение навыков в области телевизионных измерений основных характеристик многомодовых и одномодовых оптических волокон.

Лабораторный практикум включает в себя элементы учебно-исследовательской работы студентов, с требованием к студенту самостоятельно сформулировать задачу исследования, составить схему лабораторной установки и изложить подробные выводы по результатам последующих практических и теоретических исследований на ЭВМ. Перед выполнением работ преподаватель проверяет подготовленность студента. В конце каждой работы приведены вопросы для самопроверки. Студент должен понимать физическую сущность исследуемых процессов, уметь пользоваться приборами, производить необходимые измерения и вычисления на ЭВМ. Каждая лабораторная работа выполняется бригадой студентов. Количественный состав бригады определяется преподавателем.

Работа считается законченной после проверки и утверждения полученных экспериментальных данных и данных вычислений при компьютерном моделировании. Для определения погрешностей измерений используется соответствующая методика и метрологические характеристики используемых измерительных устройств. Оформленные отчеты сдаются на проверку преподавателю. Отчеты о выполнении лабораторных работ должны быть защищены студентом до сдачи экзамена по теоретическому курсу “Оптоволоконные устройства и системы”.

## **ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.**

Преподаватель перед лабораторными занятиями проводит инструктаж по технике безопасности. Студенты, не прошедшие инструктаж по технике безопасности, к выполнению лабораторных работ не допускаются. Студентом делается отметка в специальном журнале о проведенном с ним инструктаже. В этом журнале должны расписаться все студенты, прошедшие инструктаж по инструкции для факультета радиоэлектроники. Перед включением аппаратуры преподаватель обязан проверить правильность собранной студентом лабораторной установки. Включение питания производится только с разрешения преподавателя в точном соответствии с инструкциями.

Студентам запрещается вскрывать аппаратуру.

### ***Литература***

1. Быков Р.Е. Теоретические основы телевидения. – СПб.: Лань, 1998.
2. Красюк Б.А. Корнеев Г.И. Оптические системы связи и светодиодные датчики. – М.: Радио и связь, 1985.
3. Световодные датчики. / Красюк Б.А., Семенов О.Г., Шереметьев А.Г., Шестериков В.А. – М.: Машиностроение, 1990.
4. Быков Р.Е., Сигалов В.М., Эйсенгардт Г.А. Телевидение. – М.: Радио и связь, 1985.
5. Кривошеев М.И. Основы телевизионных измерений. – М.: Радио и связь, 1989.
6. Гауэр Дж. Оптические системы связи. – М.: Радио и связь, 1989.
7. Иванов А.Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи информации, измерения. – М.: Радио и связь, 1999.
8. Дьяконов В.П. Справочник по применению системы РС MatLAB. – М.: Наука, 1993.
9. Волоконно-оптические системы передачи информации. Рабочая программа, методические указания, задание на контрольную работу. / Сост.: Дравских Д.А., Маккавеев В.И. – СПб.: СЗТУ, 2001.
10. Основы телевидения: Методические указания к выполнению лабораторных работ. / Сост.: Борисов А.Б., Крестников Л.А., Михеев Н.Г. – СПб.: СЗПИ, 1992.

**РАБОТА №1**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК МНОГОМОДОВЫХ И  
ОДНОМОДОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
МЕТОДА ВИДЕОДИАГНОСТИКИ**

**I. Цель работы.**

Ознакомиться с одним из видов технического телевидения – установкой видеодиагностики волоконно – оптических линий передачи и устройств на их основе. Ознакомиться с основными характеристиками оптических волокон (ОВ). Приобрести практические навыки работы на установке видеодиагностики и произвести экспериментальные исследования основных параметров ОВ.

**II. Основные теоретические положения.**

Оптическое волокно (ОВ) в настоящее время считается самой совершенной физической средой для передачи больших потоков информации на значительные расстояния. Это вытекает из ряда особенностей, присущих оптическим волноводам. Оптические волокна (ОВ) подразделяются на стеклянные и полимерные. Достоинствами ОВ являются:

- Широкополосность оптических сигналов, обусловленная чрезвычайно высокой частотой несущей ( $F_0=10^{14}$  Гц). Это означает, что по оптической линии связи можно передавать информацию со скоростью порядка  $10^{10}$  бит/с. Или другими словами, по одному ОВ можно передать одновременно миллионы телефонных разговоров или видеосигналов. Скорость передачи данных может быть увеличена за счет передачи информации сразу в двух направлениях, так как оптические волны могут распространяться в одном волокне независимо друг от друга. Кроме того, в оптическом волокне могут распространяться оптические сигналы двух разных поляризаций, что позволяет удвоить пропускную способность оптического канала связи. Для повышения пропускной способности ОВ

используется также спектральное разделение сигналов – передачу сигналов с различными по длине волны оптическими несущими. На сегодняшний день предел по скорости передаваемой информации по оптическому волокну не достигнут.

- Очень малое (по сравнению с другими средами) затухание оптического сигнала в волокне. Лучшие образцы волокна имеют затухание менее 0.2 дБ/км на длине волны 1.55 мкм, что позволяет строить линии связи длиной до 300 км без регенерации сигналов. В оптических лабораториях разрабатываются еще более “прозрачные”, примесные так называемые фторцирконатные волокна с теоретическим пределом порядка 0,02 дБ/км на длине волны 2.5 мкм. Лабораторные исследования показали, что на основе таких волокон могут быть созданы линии связи с регенерационными участками через несколько тысяч километров при скорости передачи более 3 Тбит/с.
- Важное свойство оптического волокна – долговечность. Время жизни волокна, то есть сохранение им своих свойств в определенных пределах, превышает 25 лет, что позволяет проложить оптико-волоконный кабель один раз и, по мере необходимости, наращивать пропускную способность линии путем модернизации (оконечной) аппаратуры.

Волокно изготавливается из кварца, основу которого составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди. Оптические волокна имеют диаметр около 125 мкм, то есть очень компактны и легки, что делает их перспективными для использования в авиации, приборостроении, в кабельной технике. Стекланные волокна – не металл, при строительстве систем связи автоматически достигается гальваническая развязка сегментов. Применяя особо прочный пластик, на кабельных заводах изготавливают самонесущие подвесные кабели, не содержащие металла и тем самым безопасные в электрическом отношении. Такие кабели можно монтировать на мачтах существующих линий электропередач, как отдельно, так и встроенные в силовой провод, экономя значительные средства на прокладку кабеля через реки и другие

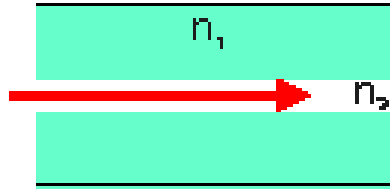
преграды. Системы связи на основе оптических волокон устойчивы к электромагнитным помехам. Всякие воздействия на оптическое волокно, а также естественное старение, влияние наличия различных неоднородностей и частичное разрушение могут быть зарегистрированы методом мониторинга (непрерывного контроля) целостности линии, а также с использованием специальных методов неразрушающего контроля.

К недостаткам оптических кварцевых волокон можно отнести следующие:

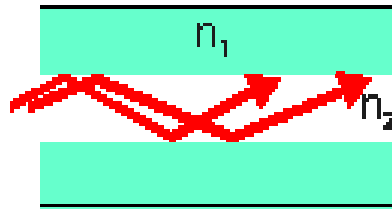
При создании линии связи требуются высоконадежные активные элементы, преобразующие электрические сигналы в оптические и оптические в электрические сигналы. Используются оптические коннекторы (соединители) с малыми оптическими потерями и большим ресурсом на подключение-отключение. Оптические потери при прохождении сигналов характеризуются, в первую очередь неточностью соединения ОВ и другими конструкторско-технологическими причинами. Точность изготовления таких элементов линии связи должна соответствовать диаметру модового поля или длине волны излучения, то есть погрешности должны быть порядка микрометра. Поэтому производство таких компонентов оптических линий связи очень дорогостоящее.

Другой недостаток заключается в том, что для монтажа оптических волокон требуется прецизионное, а потому дорогое, технологическое оборудование. Как следствие, при аварии (обрыве) оптического кабеля затраты на восстановление выше, чем при работе с медными кабелями. Преимущества от применения волоконно-оптических линий связи (ВОЛС) на основе ОВ настолько значительны, что, несмотря на перечисленные недостатки оптического волокна, эти линии связи все шире используются для передачи информации.

Важнейший из компонентов ВОЛС – оптическое волокно. Для передачи сигналов применяются два вида волокна: одномодовое и многомодовое. Своё название волокна получили от способа распространения излучения в них. Волокно состоит из сердцевины и оболочки с разными показателями преломления  $n_1$  и  $n_2$ .



**Рис.1. Одномодовое волокно.**

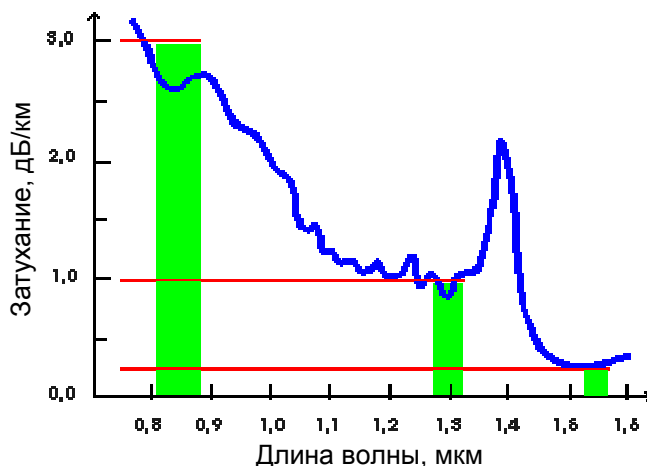


**Рис.2. Многомодовое волокно.**

В одномодовом волокне (Рис.1) диаметр сердцевины порядка 8-10 мкм, т.е. сравним с длиной световой волны. При такой геометрии в волокне может распространяться только один тип волны (одна мода). В многомодовом волокне (Рис.2) размер сердцевины порядка 50-60 мкм, что делает возможным распространение большого числа типов волн (много мод). Оба типа волокна характеризуются двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией.

Затухание обычно измеряется в дБ/км и определяется потерями на поглощение и на рассеяние излучения в оптическом волокне. Потери на поглощение зависят от чистоты материала и наличия в нем примесей и технологических несовершенств. Потери на рассеяние зависят от неоднородностей показателя преломления материала.





**Рис.3. Зависимость затухания от величины  $\lambda$  излучения, вводимого в волокно.**

Затухание зависит от длины волны излучения, вводимого в волокно. В настоящее время передачу сигналов по волокну осуществляют в трех диапазонах: 0,85 мкм, 1,3 мкм, 1,55 мкм, так как именно в этих диапазонах кварц имеет повышенную прозрачность (Рис.3).

Другим важнейшим параметром оптического волокна является дисперсия. Дисперсия приводит к ограничению полосы пропускания ОВ и соответственно к уширению оптических импульсов, распространяющихся по ОВ.

Дисперсия – это рассеяние во времени спектральных и модовых составляющих оптического сигнала. Существуют три основных типа дисперсии: модовая, материальная и волноводная.

Появление оптических усилителей на основе оптических волокон, легированных эрбием, способных усиливать проходящие по световоду сигналы до 50 дБ, дало начало пятому поколению систем оптической связи. В настоящее время быстрыми темпами развиваются системы дальней оптической связи на расстояния в десятки тысяч километров.

Для исследования основных характеристик ОВ используется метод видеодиагностики, основанный на принципах телевизионных измерений.

Метод видеодиагностики включает выделение исследуемого сечения оптического пучка, регистрацию его изображения с преобразованием оптического

сигнала в электрический, с последующим анализом изображения. Видеодиагностика, осуществляемая в условиях так называемого ближнего или дальнего поля, позволяет получить исчерпывающую информацию об оптических свойствах какого-либо отдельного элемента или ВОЛС в целом. В ближнем поле регистрируется распределение излучения непосредственно в плоскости излучающей поверхности источника излучения (светоизлучающий диод (СИД), лазер, торец ОВ), а в дальнем поле – на расстоянии  $L$ ,

$$L > b^2/\lambda$$

где  $L$  – расстояние от излучающей поверхности до фотодетектора или фотомишени передающей телевизионной трубки;  $b$  – размер источника излучения;  $\lambda$  – длина волны излучения. Для регистрации изображения используют телевизионную передающую камеру на видиконе. Видикон отличается высокой чувствительностью и хорошей геометрической линейностью сигнала до 99.5%. Спектральная чувствительность видикона распространяется в инфракрасную часть спектра до 1.5...2 мкм, что очень важно в условиях применения его в волоконной оптике. Отношение сигнал/шум достигает 50дБ. Технически метод реализуется путем подачи лазерного сигнала через оптические фокусирующие и юстировочные устройства на исследуемое оптическое волокно (или другие элементы, выполненные на основе ОВ), с выхода которого сигнал подается на передающую телевизионную камеру и регистрируется на видеоконтрольном устройстве в виде изображения. В разрабатываемой установке использован газовый лазер промышленного изготовления типа ЛГ-126 с длиной волны излучения  $\lambda=630$  нм и промышленная телевизионная установка типа ПТУ-53, в состав которой входят:

- передающая телевизионная камера КТП-57;
- блок коммутации БК-50;
- видеоконтрольное устройство ВК50В100;
- пульт управления ПУ-79.

### Основные технические характеристики ПТУ-53.

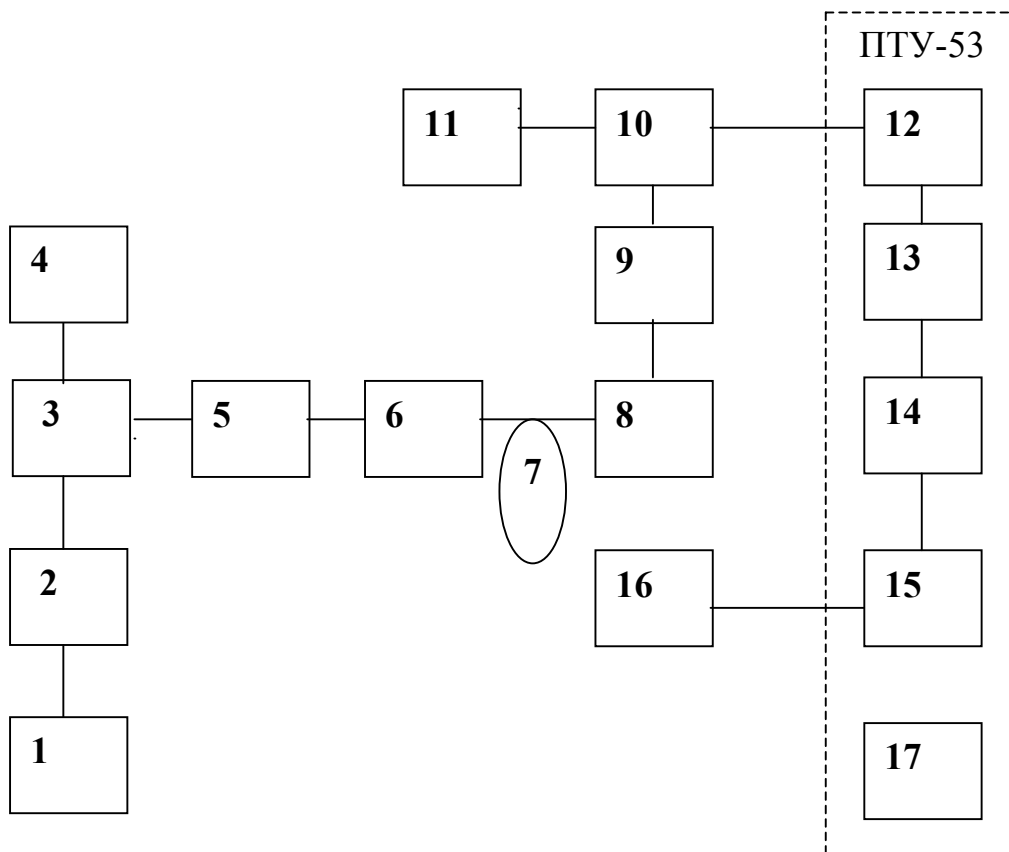
1. Способ разложения изображения – чересстрочный на 625 строк в кадре при смене 25 кадров в секунду. На изображении испытательной таблицы ИТ72 различается не менее 400 линий зонных решеток.

2. Четкость изображения телевизионной установки составляет при освещенности 1 лк в плоскости мишени видикона КТП-67 в центре – 500, в углах – 450 телевизионных линий.

3. Число различных градаций яркости (включая фон испытательной таблицы) не менее – 7.

4. Суммарные нелинейные искажения изображения, не более:

- по горизонтали  $\pm 10\%$
- по вертикали  $\pm 10\%$



**Рис. 4. Структурная схема установки неразрушающего контроля кварцевых ОБ на основе метода видеодиагностики.**

5. Диапазон рабочих освещенностей от 50 до 50000 лк, при этом размах полного телевизионного сигнала на входе видеоконтрольного устройства составляет – 1 В.

6. Номинальный размер изображения 308x394 мм.

Расчет параметров видеограмм сводится к нахождению двумерных зависимостей, наиболее полно характеризующих структуру оптического пучка и причины, оказывающие влияние на ее изменения. Следует заметить, что структуру оптического пучка невозможно полностью охарактеризовать каким – либо одним числом или двумерным графиком.

К основным параметрам, характеризующим качество ОВ относятся:

- распределение интегральной мощности излучения по уровням яркости – распределение мощности излучения;
- зависимость суммарной мощности излучения в точках, равноудаленных от центра свечения пучка – радиальное распределение мощности излучения;
- зависимость суммарной мощности излучения в точках, соответствующих данному углу между направлением распространения лучей и оптической осью, от размера данного угла – угловое распределение мощности излучения;
- распределение интегральной мощности излучения по секторам круга, построенного из центра изображения – осевое распределение мощности излучения.

Яркостное распределение мощности излучения подсчитывают суммированием значений интенсивности в точках изображения, имеющих одинаковую яркость.

Такой расчет прост и отражает наличие или отсутствие пиков яркости в структуре изображения, вклад этих пиков в интегральную мощность излучения.

В экспериментальной установке используется метод определения яркостных точек путем исследования постоянного (растрового) измерения их интенсивности на изображении.

Для этой цели используется специализированный осциллограф С9-1 (С1-57), который позволяет проводить исследование телевизионного сигнала с

возможностью выделения сигнала телевизионной строки и обеспечения устойчивой фазировки развертки с любым заранее заданным номером строки и в пределах полного кадра.

Такой метод позволяет оценивать распределение яркости в любой из строк кадра, т.е. определять интенсивность излучения оптического пучка в зависимости от размаха строчного сигнала. По семейству таких осциллограмм возможно пространственное построение сечения пучка на выходе ОВ.

Рассматриваемый метод видеодиагностики позволяет диагностировать реальные ОВ и их компоненты.

Разработанная установка позволяет также не только оценивать параметры, характеризующие качество ОВ, но и, что весьма важно, изменение их от времени в сечении оптического пучка при воздействии различных возмущающих факторов, пороков, старения материала, возможных нежелательных включений в материал ОВ и т.д. На установке производится экспериментальное исследование оптического пучка с выхода произвольного отрезка многомодового или одномодового ОВ.

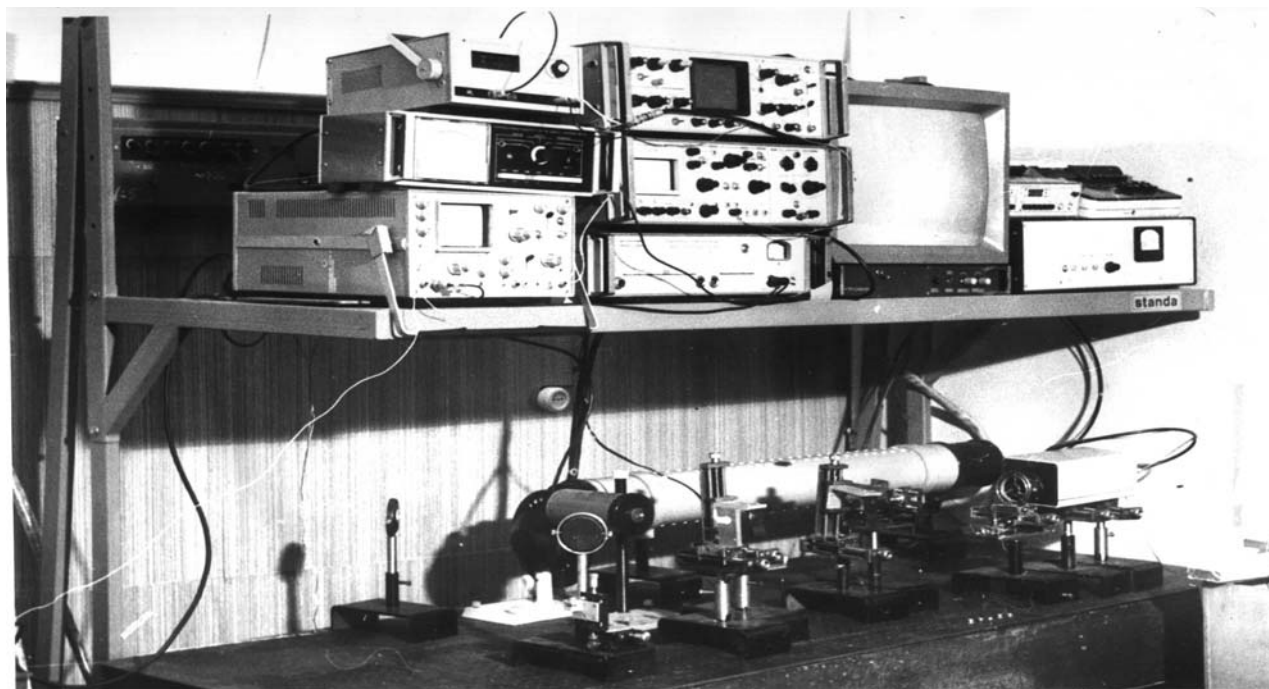
Структурная схема разработанной установки видеодиагностики ОВ представлена на рис.4, где

- |                              |  |
|------------------------------|--|
| 1 – лазер ЛГ-126;            | 10 – измеритель мощности;                          |
| 2 – направляющие зеркала;    | 11 – разделительная призма;                        |
| 3 – разделительная призма;   | 12 – телевизионная камера КТП-57;                  |
| 4 – измеритель мощности;     | 13 – блок коммутации БК-50;                        |
| 5 – объектив;                | 14 – пульт управления ПУ-79;                       |
| 6 – юстировочное устройство; | 15 – видеоконтрольное устройство (ВКУ) – ВК50В100; |
| 7 – исследуемое ОВ;          | 16 – осциллограф С9-1 (С1-57);                     |
| 8 – юстировочное устройство; | 17 – блок питания ПТУ-53.                          |
| 9 – объектив;                |  |

На рис.5 (фото) показан общий вид установки видеодиагностики, где на верхней полке справа налево находятся измерительные приборы:

- блок питания лазера ЛГ-126;
- пульт управления ПТУ-53;
- видеоконтрольное устройство;
- осциллограф С9-1 вверху с осциллографом С1-57 под ним;

- измеритель оптической мощности ИМО-2 и другие вспомогательные измерительные приборы.



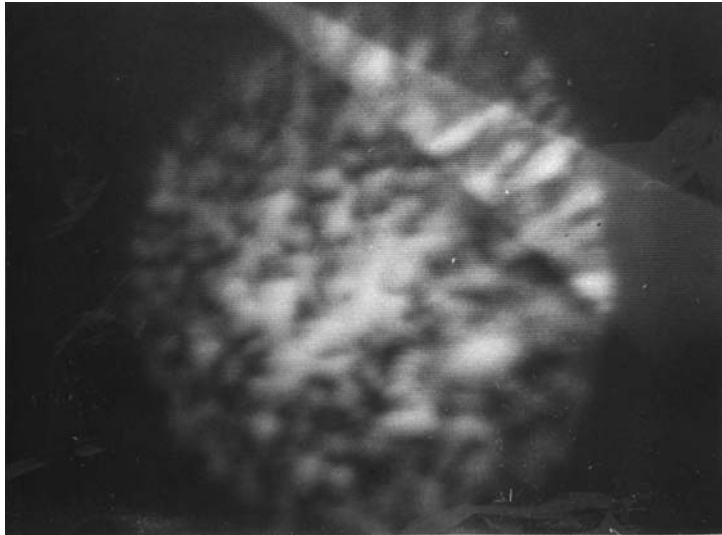
***Рис5. Общий вид экспериментальной установки видеодиагностики ОВ.***

Слева на рис.5 показан узел ввода исследуемого лазерного сигнала в ОВ, включающий в себя трехкоординатное юстировочное устройство с механизмом крепления ОВ, оптическую призму для отвода половины вводимой в ОВ мощности лазерного излучения для последующего контроля с помощью измерителя оптической мощности ИМО-2, систему оптических фокусирующих линз.

Справа на рис.5 (фото) показано устройство вывода исследуемого оптического сигнала из ОВ, включающее в себя трехкоординатное юстировочное устройство с механизмом крепления ОВ, оптическую рассеивающую линзу и передающую телевизионную камеру.

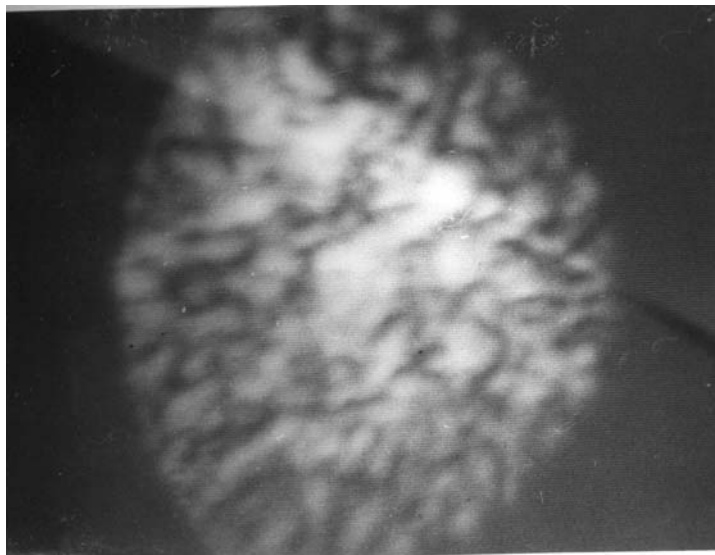
За устройством вывода исследуемого лазерного сигнала на столе смонтирован газовый лазер ЛГ-126.

Слева направо на рис.5 (фото) видны отражающие и направляющие зеркала, крепление разделительной призмы, приемная часть измерителя оптической мощности ИМО-2.

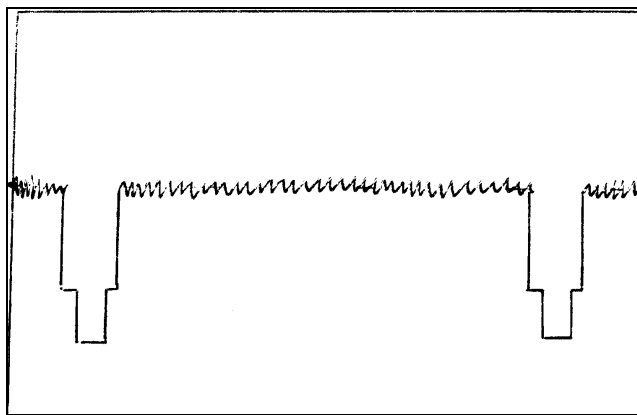


*Рис.6. Видеограмма исследуемого ОВ без воздействующих факторов.*

Вид видеограмм с видеоконтрольного устройства (ВКУ) представлен на рис. 6 и 7. Видеограммы одного исследуемого ОВ отличаются друг от друга из-за некоторого перенапряжения участка ОВ в результате изгиба (Рис.7).



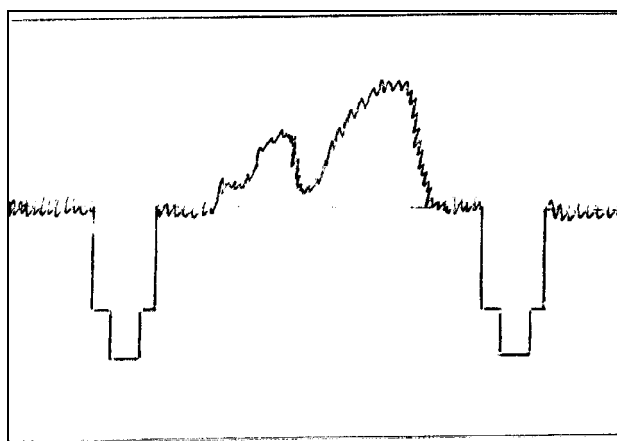
*Рис.7. Видеограмма исследуемого ОВ в напряженном состоянии, вызванном изгибом.*



***Рис. 8 Осциллограмма сигнала яркости 427 телевизионной строки с осциллографа С9-1 при отсутствии изменений сигнала яркости.***

На рис. 8., для примера, приведена осциллограмма сигнала яркости 427 строки с осциллографа С9-1. На рис.8 в сигнале телевизионной строки видны только шумы (сигнал отсутствует) – это фон, создаваемый мишенью видикона.

На рис.9 видны изменения размаха видеосигнала на 427 строке, вызванные изменением распределения яркости в строке.

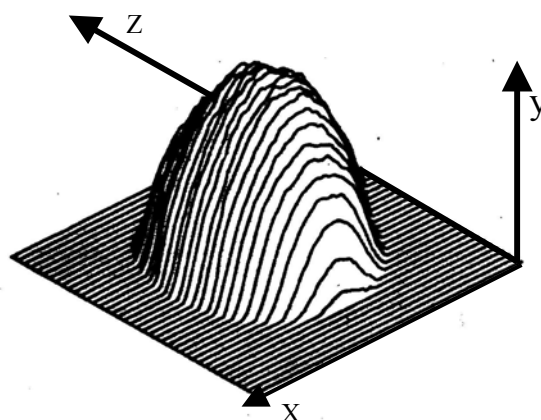


***Рис. 9 Осциллограмма сигнала яркости 427 телевизионной строки с осциллографа С9-1 при наличии изменений в распределении яркости, связанного с изгибом ОБ.***

Производя измерения по всем строкам кадра или через некоторое повторяемое дискретное значение (например, через каждые 20 телевизионных строк) можно

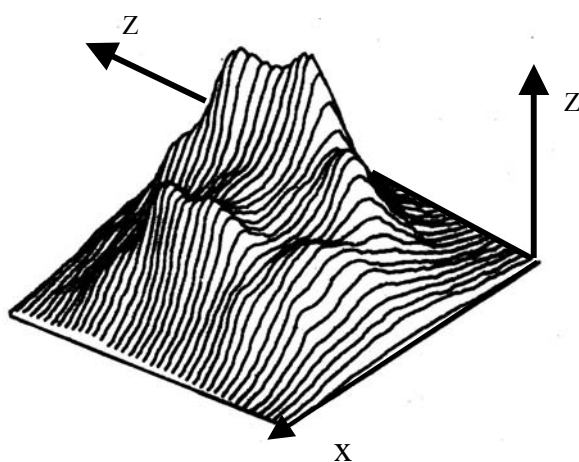


оценить пространственное распределение мощности всего оптического пучка с выхода ОВ (Рис.10 и 11) .



*Рис.10. Структура оптического пучка в ближней зоне.*

Описываемая исследовательская установка может быть сопряжена с ЭВМ. В этом случае полученные электрические характеристики оптического пучка, характеризующие качественные особенности ОВ могут быть представлены в квазитрехмерном изображении, а полученные видеogramмы с использованием псевдоколонизации распределенных уровней яркости изображения на цветном мониторе.



*Рис.11. Структура оптического пучка в ближней зоне, вызванного изгибом.*

### **III. Необходимая аппаратура.**

Оптический стол фирмы “STANDA”, лазер газовый ЛГ-126, промышленная телевизионная установка ПТУ-53, осциллограф с блоком выбора сигнала строки С9-

1, измеритель оптической мощности ИМО-2, генератор испытательных телевизионных сигналов “TRANZITEST”, оптические и юстировочные устройства.

#### **IV. Методика выполнения работы.**

Изучить основные положения работы. Ответить на контрольные вопросы.

4.1. Включить питание на установку, т.е. лазер, С9-1, ИМО-2М, “TRANZITEST” и дать прогреться аппаратуре. После начала излучения лазера, установить длину волны излучения  $\lambda=0.63$  мкм.

#### **Внимание!**

**С лазерным лучом работать со всеми мерами техники безопасности, не допуская попадания лазерного излучения на сетчатку глаз.**

4.2. Произвести юстировку лазерного луча в разделительной призме и отклоненный лазерный луч направить на приемную часть ИМО-2М. Отсчет отклоненной мощности лазера на  $\lambda=0.63$  мкм произвести через 5 мин.

4.3. Произвести юстировку лазерного луча и ввести его в оптическое волокно.

4.4. Произвести юстировку лазерного луча на выходе оптического волокна и осуществить фокусировку и настройку передающей камеры КТП-57 по контрастности и четкости телевизионного изображения на ВКУ.

4.5. Определить яркостное распределение мощности излучения с торца оптического волокна. Для этого на экран ВКУ выводится изображение сетчатого поля с генератора телевизионных испытательных сигналов “TRANZITEST” с последующим выбором оптимального шага полученного изображения сетки. С помощью полученной сетки, подсчитывают площадь одинаковых по яркости пятен и общую площадь пятна. Отношение суммы площадей яркостных участков к общей площади оптического пятна характеризует распределение интегральной мощности излучения по уровням яркости.

4.6. Интегральная мощность излучения характеризуется также пиковыми значениями мощности. Для их определения, по осциллографу С9-1, с шагом 20 телевизионных строк исследуется все пятно оптического излучения в

телевизионном кадре. На основе полученного семейства осциллографических сигналов в системе координат  $X, Y, Z$  строится пространственная видеограмма (см. рис.8 и рис.9).

По экрану С9-1 также определяются уровни интенсивности излучения мощности. Уровни этих пиков могут быть отнесены к уровню шумов сигнала изображения и характеризуют интенсивность пиков, т.е. мощность излучения отдельных оптических пятен.

4.7. Прodelать указанные измерения для заданных преподавателем различных микроизгибов и изгибов ОВ и для различных типов волокон: одномодовых и многомодовых.

## **V. Содержание отчета.**

5.1. Структурная схема установки видеодиагностики.

5.2. Данные измерений мощности лазерного излучения, интегральной мощности излучения с торца ОВ по уровням яркости одномодового ОВ.

5.3. Результаты измерений и расчетов относительной мощности для отдельных оптических пятен на ВКУ и по С9-1.

5.4. Полученные пространственные видеограммы для ОВ с различными микроизгибами.

5.5. Выводы по работе.

## **Вопросы для самопроверки.**

1. В чем заключается метод видеодиагностики ОВ?
2. Из каких узлов и блоков состоит промышленная телевизионная установка?
3. В чем заключается метод построчного измерения интенсивности изображения видеограмм?
4. Каковы основные параметры видеограмм?

## **Литература:**

[1], с. 65...66; [2], с.38...73; [3], с. 106-120; [4], с.10-16; [5], с.455...48; [10], с. 27...33.

## Работа №2

### Компьютерное моделирование цифровой волоконно-оптической системы передачи информации

#### I. Цель работы.

При проектировании волоконно-оптических систем передачи (ВОСП) необходимо учитывать параметры основных компонентов и узлов систем. Для этого целесообразно использовать компьютерные численные модели, позволяющие, в отличие от аналитических расчетов, получить результаты анализа при произвольных характеристиках элементов системы.

В результате выполнения данной лабораторной работы студент получает навыки проектирования цифровых ВОСП и исследует влияние параметров отдельных компонентов на результирующие характеристики системы передачи информации.

Структурная схема моделируемой цифровой ВОСП представлена на рис.12. На структурной схеме введены следующие обозначения:

ПОМ – передающий оптоэлектронный модуль, преобразующий электрические двоичные импульсы сигнала в оптические;

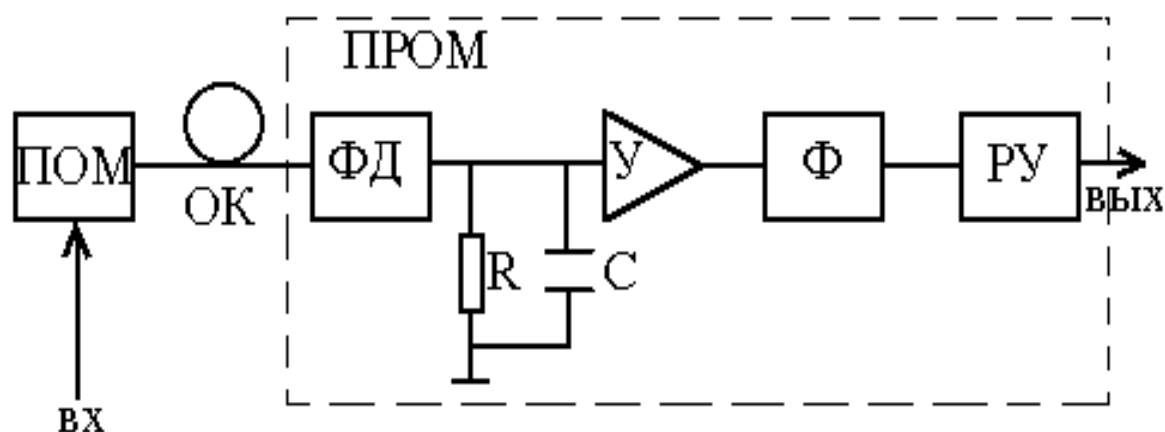


Рис.12. Структурная схема цифровой волоконно-оптической системы передачи.

ОК – оптический кабель:

ПРОМ – приемный оптоэлектронный модуль, преобразующий оптические импульсы в электрические и содержащий:

- фотодетектор ФД, в качестве которого используется **p-i-n** фотодиод или лавинный фотодиод;
- нагрузку фотодиода – параллельно соединенные резистор R и конденсатор C;
- усилитель У;
- фильтр – выравнитель Ф;
- решающее устройство РУ, выдающее решение о приеме логической “1”, если напряжение в момент отсчета превышает пороговый уровень, и о приеме логического “0”, если уровень не превышен. Кроме того, в ПРОМ имеются не показанные на структурной схеме цепи синхронизации выделения тактовой частоты, определяющий тактовый интервал и момент отсчета.

## II. Математическая база модели

Обозначим:

$V$  – скорость передачи информации, бит/с;

$T=1/V$  длительность тактового интервала, с.

ПОМ содержит лазерный диод (ЛД) или светодиод (СИД) и излучает импульс, абсолютная мощность которого, введенная в ОК, описывается некоторой функцией времени  $P_0(t)$ , например, представленной на рис.13.

Энергия импульса  $E_0$  равна площади, ограниченной кривой  $P_0(t)$ :

$$E_0 = \int_{-\infty}^{\infty} P_0(t) dt \quad (2.1)$$

Определим эквивалентную длительность импульса  $\tau_0$  как длительность прямоугольного импульса, энергия которого также равна  $E_0$ , а амплитуда равна значению  $P_0(t)$  при  $t=0$ , т.е.

$$P_0(t) \Big|_{t=0} = \hat{P}_0 \quad (2.2)$$

Тогда из (2.1) и (2.2) (см. рис.13) имеем:

$$E_0 = \hat{P}_0 * \tau_0, \quad (2.3)$$

т.е.

$$\tau_0 = \frac{E_0}{\hat{P}_0}$$

Импульсный отклик ОК, т.е. отклик ОК на очень короткий оптический импульс с энергией, равной 1 (одному Джоулю) обозначим  $D_1 h_1(t)$ .

Здесь  $D_1$  учитывает затухание оптического сигнала в ОК, а  $h_1(t)$  задает форму импульсного отклика, т.е. определяется искажениями формы импульса – дисперсионными искажениями в ОК.

$h_1(t)$  нормируется так, чтобы

$$\int_{-\infty}^{\infty} h_1(t) dt = 1. \quad (2.4)$$

Представим  $P_1(t)$  в виде

$$P_1(t) = E_1 h_p(t) \quad (2.5)$$

причем из (2.5)

$$\int_{-\infty}^{\infty} h_p(t) dt = \frac{1}{E_1} \int_{-\infty}^{\infty} P_1(t) dt = 1 \quad (2.6)$$

С учетом последовательности информационных импульсов, оптическая мощность на входе ПРОМ может быть представлена в виде

$$P(t) = \sum_{n=-\infty}^{n=\infty} E_{1n} h_p(t - nT) \quad (2.7)$$

причем  $E_{1n}$  два возможных значения:  $E_{1\text{ on}}$  и  $E_{1\text{ off}}$ , соответствующие наличию или отсутствию импульса ( $E_{1\text{ off}}$  – учитывает неполное гашение источника излучения).

Эквивалентная схема ПРОМ, учитывающая основные источники шумов, представлена на рис.14.

Импульсный отклик цепи нагрузки фотодетектора рис.14 – импульсная реакция на  $\delta$  – импульс тока – т.е. выходное напряжение цепи, или напряжение на входе усилителя А, равен:

$$h_B(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \frac{1}{\exp(-t/RC)}, & t \geq 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

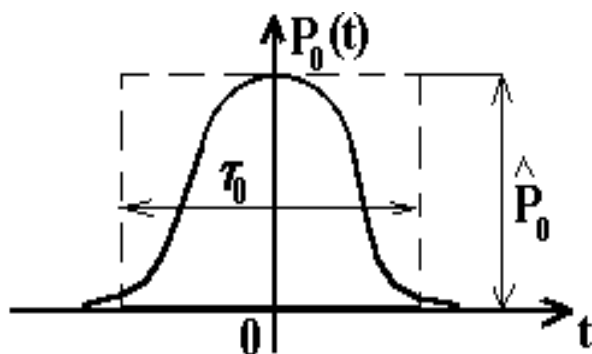


Рис.13. Импульс оптической мощности ПОМ.

где  $R = \frac{R_B R_A}{R_B + R_A}$ ,  $C = C_B + C_A$ .

Статистически средний ток, протекающий через фотодиод, т.е. через полную нагрузку фотодиода, равен

$$\overline{i_P(t)} = \frac{q \lambda \eta}{hc} \bar{g} P(t), \quad (2.9)$$

где  $\bar{g}$  – средний коэффициент умножения ЛФД (для p-i-n ФД  $\bar{g} = 1$ );  $\eta$  – квантовый выход ФД,  $\frac{hc}{\lambda}$  – энергия фотона.

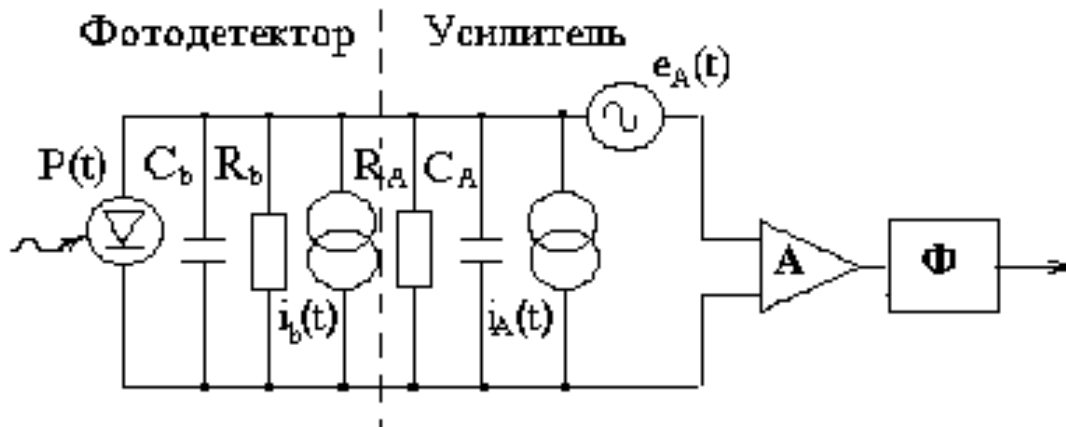


Рис. 14. Эквивалентная схема ПРОМ с основными источниками шумов.

Обозначим мощность на выходе ОК, или на входе ПРОМ  $P_1(t)$ . Таким образом

$$P_1(t) = P_0(t) * D_1 h_1(t) = D_1(P_0(t) * h_1(t)), \quad (2.10)$$

где \* обозначает операцию свертки.

Энергия оптического импульса на выходе ОК, т.е. на входе ПРОМ, равна:

$$E_1 = \int_{-\infty}^{\infty} P_1(t) dt \quad (2.11)$$

Из (2.10) имеем:

$$P_1(t) = D_1 \int_{-\infty}^{\infty} P_0(t') h_1(t-t') dt' \quad (2.12)$$

Поэтому

$$\begin{aligned} E_1 &= \int_{-\infty}^{\infty} P_1(t) dt = D_1 \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} P_0(t') h_1(t-t') dt dt' = \\ &= D_1 \int_{-\infty}^{\infty} P_0(t') dt' = D_1 E_0. \end{aligned} \quad (2.13)$$

Отсюда

$$D_1 = E_1 / E_0. \quad (2.14)$$

Величина  $D_1$  зависит от затухания ОК. Если затухание ОК  $\alpha$  задано в дБ/км, то при длине ОК  $L$  (км)

$$\alpha L = 10 \log E_1 / E_0, \quad (2.15)$$

поэтому

$$D_1 = \frac{E_1}{E_0} = 10^{-\frac{\alpha L}{10}}. \quad (2.16)$$

Таким образом, параметры одиночного импульса оптической мощности  $P_1(t)$ , поступающего на вход ПРОМ, определяются соотношениями (2.10 – 2.16).



Обозначим  $h_{eq}(t)$  импульсный отклик фильтра выравнивателя, включенного после усилителя А. Статистически среднее напряжение на выходе этого фильтра, или на выходе всего ПРОМ, равно

$$\overline{v_{out}}(t) = A i_P(t) * h_B(t) * h_{eq}(t) = A \frac{\eta q \lambda}{hc} \overline{g} [P(t) * h_B(t) * h_{eq}(t)] \quad (2.17)$$

где \* обозначает свертку.

С учетом (2.14), (2.17) перепишется в виде

$$\overline{v_{out}}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} E_{1n} h_{out}(t - nT), \quad (2.18)$$

где

$$h_{out} = A \frac{\eta q \lambda}{hc} h_P(t) * h_B(t) * h_{eq}(t) \quad (2.19)$$

### III. МОДЕЛИРОВАНИЕ ШУМОВ ПРОМ.

Моделирование шумов ПРОМ производится для наихудшего по межсимвольной помехе случая: все импульсы, соседние к основному, логические “1” (“on”).

Используем аппроксимацию: средний квадрат напряжения дробового шума  $\langle v_S^2 \rangle$  в момент времени принятия решения ( $t=0$ ) зависит от среднего за тактовый интервал значения фототока  $\langle i_0 \rangle_T$ , рассчитанного при единичном умножении ЛФД:

$$\langle v_S^2 \rangle = 2q \langle i_0 \rangle_T \overline{g^2} B_N R^2 A^2, \quad (2.20)$$

где  $\overline{g^2}$  – есть средний квадрат коэффициента лавинного умножения,  $B_N$  – эквивалентная полоса шумов нагрузки фотодетектора, усилителя и фильтра – выравнивателя (с учетом коэффициента передачи выравнивателя):

$$2B_N = \frac{1}{R^2} \int_{-\infty}^{\infty} |H_{eq}(f) H_B(f)|^2 df, \quad (2.21)$$

$H_{eq}(f), H_B(f)$  – передаточные функции выравнителя и цепи нагрузки, или  $H_{eq}(i\omega), H_B(i\omega)$  – соответствующие частотные коэффициенты передачи связаны с преобразованием Фурье. Аналогично определим шумовую полосу фильтра-выравнителя  $B_{eq}$ :

$$2B_{eq} = \int_{-\infty}^{\infty} |H_{eq}(f)|^2 df \quad (2.22)$$

Для логической “1” – импульса “on”:

$$\langle i_0 \rangle_{T,on} = \sum_n \frac{\eta q \lambda}{hc} E_{1on} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} h_p(t - nT) dt = \frac{\eta q \lambda}{hc} E_{1on} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} h_p(t) dt = \frac{\eta q \lambda}{hc} E_{1on} \frac{1}{T} \cdot \quad (2.23)$$

Для логического “0” – импульса “off” представим  $E_{1off}$  в виде

$E_{1off} = E_{1on}/K_{ex}$ , где  $K_{ex}$  – коэффициент гашения ЛД ( $>1$ ). Предполагая, что “хвостами” основного выключенного импульса вне тактового интервала можно пренебречь, имеем:

$$\begin{aligned} \langle i_0 \rangle_{T,off} &= \sum_{n \neq 0} \frac{\eta q \lambda}{hc} E_{1on} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} h_p(t - nT) dt + \frac{\eta q \lambda}{hc} \frac{E_{1on}}{K_{ex}} \int_{-T/2}^{T/2} h_p(t) dt = \\ &= \frac{\eta q \lambda}{hc} E_{1on} \frac{1}{T} \left[ 1 - \gamma + \frac{\gamma}{K_{ex}} \right], \end{aligned} \quad (2.24)$$

где  $\gamma$  есть доля энергии одиночного импульса, сосредоточенная в тактовом интервале:

$$\gamma = \int_{-T/2}^{T/2} h_p(t) dt \quad (2.25)$$

Средний квадрат напряжения аддитивного (теплового) шума и дробового шума тока утечки со спектральной плотностью  $S_I$  равен

$$\langle v_T^2 \rangle = \left[ \frac{2kT_{abs}}{R} + S_I \right] A^2 2R^2 B_N + S_E A^2 2B_{eq}, \quad (2.26)$$

где  $T_{\text{abs}}$  – абсолютная температура, °K;  $k$  – постоянная Больцмана;  $S_E$  – спектральная плотность напряжения шума источника шумов  $e_A(t)$  (рис. 14). Общее (суммарное) значение среднего квадрата напряжения шума

$$\langle v_N^2 \rangle = \langle v_S^2 \rangle + \langle v_T^2 \rangle + \langle v_{fl}^2 \rangle \quad (2.27)$$

где  $\langle v_{fl}^2 \rangle$  – средний квадрат напряжения фликкер – шума.

Все рассчитанные напряжения сигналов и шумов в дальнейшем пересчитываются к эквивалентным токам в активной части цепи нагрузки фотодетектора  $R$ . Это дает возможность сравнивать параметры различных вариантов ПРОМ.

Непосредственным вычислением получаем

$$H_B(f) = \frac{R}{1 + i2\pi RC} \quad (2.28)$$

Для расчета вероятности ошибки в Гауссовом приближении или определения энергетического запаса ВОСП следует найти значение потенциала энергетического параметра ( $Q$  – фактора):

$$Q = \frac{S_1 - S_0}{\sigma_1 + \sigma_0}, \quad (2.28)$$

где  $S_1, S_0$  – значения токов сигналов, приведенных к нагрузке фотодетектора, в момент отсчета при передаче логической “1” (“on”) и логического “0” (“off”), соответственно;  $\sigma_1$  и  $\sigma_0$  – стандартные отклонения токов сигналов при тех же условиях.

$S_1$  – определяется из (2.18) при  $t=0$  и  $E_{1n} = E_{1on} = E_1$ :

$$S_1 = \frac{E_1 h_{\text{out}}(0)}{R} \quad (2.30)$$

также определяется из (2.18) при  $t=0$ , но при  $E_{1n} = E_{1off} = E_1/K_{\text{ex}}$  и с учетом двух соседних импульсов – слева и справа:

$$S_0 = \left[ E_1 h_{\text{out}}(T) + E_1 h_{\text{out}}(-T) + \frac{E_1 h_{\text{out}}(0)}{k_{\text{ex}}} \right] \quad (2.31)$$

Тогда вероятность ошибки  $P_{\text{ош}}$  в цифровой ВОСП равна

$$P_{\text{ош}}(Q) = 1 - \Phi(Q),$$

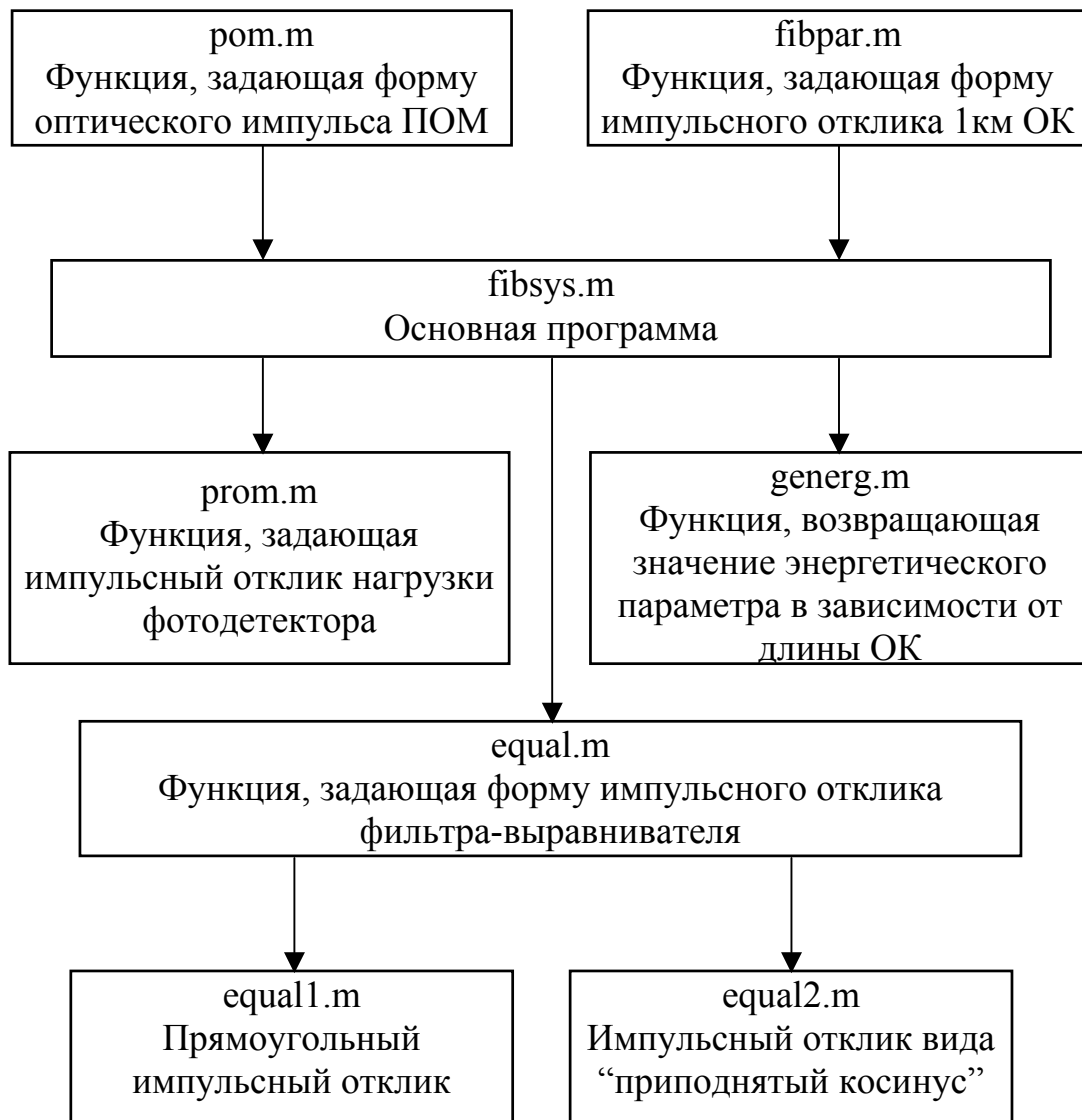
где  $\Phi(Q)$  – функция нормального распределения вероятностей. Обычно в цифровых ВОСП задается пороговое значение  $P_{\text{ош}}$ , при превышении которого система считается неработоспособной. Этому пороговому значению соответствует определенное значение Q-фактора.

$$\text{При } Q = 5.2 \quad P_{\text{ош}} = 10^{-7}$$

$$\text{При } Q = 6 \quad P_{\text{ош}} = 10^{-9}$$

### III. Реализация компьютерной модели в среде MATLAB.

Название пакета MATLAB происходит от словосочетания Matrix Laboratory (матричная лаборатория). MATLAB – это средство компьютерного моделирования, обеспечивающее проведение исследований практически во всех известных областях науки и техники. Структура пакета позволяет эффективно сочетать два основных подхода к созданию модели: аналитический и имитационный. Компьютерная модель цифровой ВОСП в среде MATLAB состоит из основной программы и функций, задающих характеристики основных компонентов и узлов ВОСП. Их взаимодействие представлено на рис. 15.



*Рис. 15. Взаимодействие основной программы и функций, задающих характеристики основных компонентов и узлов цифровой ВОСП.*

#### IV. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.

Изучить основные положения работы. Ответить на контрольные вопросы.

4.1. Запустить систему MATLAB путем исполнения командного файла matlab.bat в среде DOS или WINDOWS. После пуска системы на экране появляется сообщение, содержащее серийный номер системы и знак приглашения “n” с мигающим курсором. Строка, в которой расположен курсор называется командной строкой.

4.2. Открыть файл fibsys путем набора названия файла в командной строке.

4.3. На экране дисплея появляется текст:

Диалоговая программа расчета характеристик волоконно-оптической системы передачи (ВОСП) и построения глаз-диаграммы.

После этого текста следует указание ввести значение системных параметров необходимых для моделирования. Вначале вводятся данные для тестирования программы указанные после слова «например».

Введите значения системных параметров:

1. Введите рабочую длину волны  $LMB$ , мкм

$$LMB = 1.3$$

2. Введите  $R\emptyset$  – скорость передачи, Мбит/с. Например, при  $R\emptyset = 8.448$  Мбит/с вводится 8.448.

$$R\emptyset = 8.448$$

3. Введите  $P\emptyset$  – максимальное значение импульсной мощности оптического излучения на входе оптического волокна, мВт. Например, при  $P\emptyset = 1$  мВт вводится 1.

$$P\emptyset = 1$$

4. Введите коэффициент гашения ЛД  $KEH (>1)$ .

$$KEH = 100$$

5. Введите  $TAU\emptyset$  – нормированное к тактовому интервалу значение длительности оптического импульса на выходе ПОМ, например,  $TAU\emptyset = 1$ .

$$TAU\emptyset = 1$$

6. Введите  $ALFA$  – затухание оптического кабеля, дБ/км. Например,  $ALFA = 1$ .

$$ALFA = 1$$

7. Введите  $DELTA F$  – параметр широкополосности оптического кабеля, МГц·км. Например, для многомодового ОВ  $DELTA F = 200$ .

8. Введите  $C_{sum}$  – общую входящую емкость цепи нагрузки фотодетектора, пФ. Например,  $C_{sum} = 1$  (типичное значение).

$$C_{\text{sum}} = 1$$

9. Введите  $R_m$  – сопротивление цепи нагрузки фотодетектора, кОм. Например,  $R_m = 10$ .

$$R_m = 10$$

TAU2 – постоянная времени импульсного отклика цепи нагрузки фотодетектора, нормированная к длительности тактового интервала, равна  $\text{TAU2} = 0.0845$ .

10. Введите TAUEQ – длительность импульсного отклика фильтра-выравнивателя, нормированную к длительности тактового интервала, например,  $\text{TAUEQ} = 1$ .

$$\text{TAUEQ} = 1$$

11. Введите GLPD- средний коэффициент умножения ЛФД. Например,  $\text{GLPD} = 1$ .

$$\text{GLPD} = 1$$

12. Введите  $K_{\text{ion}}$  – отношение коэффициентов ударной ионизации носителей заряда, причем  $K_{\text{ion}} \leq 1$ . Случай  $\text{GLPD} = 1$  и  $K_{\text{ion}} = 1$  соответствует отсутствию лавинного умножения.

$$K_{\text{ion}} = 1$$

$$L\emptyset = 52.3329$$

Нажмите любую клавишу.

Ждите результатов итерационных расчетов длины линии L.

$$L = 44.3329$$

$$L\emptyset = 52.3329$$

Нажмите любую клавишу.

Построить графики сигналов в различных точках (Да – 1, Нет –  $\emptyset$ ).

На экран выводятся графики сигналов в контрольных точках при вводе цифры «1» и не выводятся при вводе «0».

## **V. Содержание отчета.**

- 5.1. Структурная схема цифровой волоконно-оптической системы передачи.
- 5.2. Исходные данные для компьютерного моделирования ВОСП-параметры, вводимые в режиме диалога.
- 5.3. Результаты компьютерного моделирования: зависимость энергетического потенциала системы от одного из вводимых параметров, по указанию преподавателя.
- 5.4. Графики оптических и электрических сигналов в контрольных точках системы.
- 5.5. Выводы по работе.

## **Вопросы для самопроверки.**

1. Из каких узлов состоит цифровая ВОСП?
2. Как преобразуются электрические сигналы в оптические и обратно в отдельных узлах ВОСП?
3. Какими параметрами характеризуется цифровая ВОСП?
4. Что такое Q-фактор и вероятность ошибки?

### **Литература:**

[6], с.429-467, 369-397; [7], с.195-215; [8], с.5-8, 48-54.

## **ОГЛАВЛЕНИЕ**

Общие указания .....	3
Техника безопасности при выполнении лабораторных работ.....	4
Литература.....	4
Работа №1. Исследование характеристик многомодовых и одномодовых оптических волокон с использованием метода видеодиагностики .....	5
Работа №2. Компьютерное моделирование цифровой волоконно-оптической системы передачи информации .....	20



**А.Б. Борисов,  
В.И. Маккавеев**

## **ОПТОВОЛОКОННЫЕ СИСТЕМЫ И УСТРОЙСТВА**

**Методические указания к выполнению лабораторных работ**

**Сводный темплан 2001 г.**

**Лицензия ЛР №020308 от 14.02.97**

**Редактор Т.В. Шабанова**

---

**Подписано в печать**

**Формат 60x84 1/16**

**Б.кн.-журн.**

**П.л. 2,0.**

**Б.л. 0,5.**

**РТП РИО СЗТУ**

**Тираж 100**

**Заказ**

---

**Северо-Западный государственный заочный технический университет**

**РИО СЗТУ, член Издательско–полиграфической ассоциации вузов**

**Санкт-Петербурга**

**191186, Санкт-Петербург, ул. Миллионная, 5**