

**МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»**

Кафедра «Системы передачи информации»

В. Н. ФОМИЧЕВ, И. О. ЖИГАЛИН

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Лабораторный практикум

Часть 2

Гомель 2017

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра «Системы передачи информации»

В. Н. ФОМИЧЕВ, И. О. ЖИГАЛИН

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА

Часть 2

*Одобрено методической комиссией электротехнического
факультета в качестве лабораторного практикума*

Гомель 2017

УДК 621.391(076.5)
ББК 32.811.3
Ф76

Рецензент – доцент кафедры “Системы передачи информации” канд. техн. наук *П. М. Буй* (БелГУТ)

Фомичев, В. Н.

Ф76 Специальные измерения и техническая диагностика : лабораторный практикум. В 2 ч. Ч. 2 / В. Н. Фомичев, И. О. Жигалин ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2017. – 62 с.
ISBN 978-985-554-604-8 (ч. 2)

Изложены цель лабораторных работ, сведения из теории, порядок выполнения работ, содержание отчета и контрольные вопросы.

Лабораторные работы основаны на применении персональных компьютеров в учебном процессе.

Предназначен для студентов специальности 1-37 02 04 “Автоматика, телемеханика и связь на железнодорожном транспорте”, специализации 1-37 02 04 02 “Системы передачи и распределения информации”, а также может быть использован при изучении других курсов.

УДК 621.391(076.5)
ББК 32.811.3

ISBN 978-985-554-604-8 (ч. 2)
ISBN 978-985-554-603-1

© Фомичев В. Н., Жигалин И. О., 2017
© Оформление. БелГУТ, 2017

1 ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

Цель работы. Изучить конструктивные особенности волоконно-оптических линий передачи, принцип их действия, преимущества и недостатки по сравнению с металлическими линиями связи. Исследовать параметры их работы в реальных условиях эксплуатации.

1.1 Сведения из теории

Волоконно-оптическая линия передачи (ВОЛП) – это вид системы передачи, при котором информация передается по оптическим диэлектрическим волноводам, известным под названием «оптическое волокно». Волоконно-оптическая сеть – это информационная сеть, связующими элементами между узлами которой являются волоконно-оптические линии передачи. Технологии волоконно-оптических сетей помимо вопросов волоконной оптики охватывают также вопросы, касающиеся электронного передающего оборудования, его стандартизации, протоколов передачи, вопросы топологии сети и общие вопросы построения сетей.

Передача информации по ВОЛП имеет целый ряд достоинств перед передачей по медному кабелю. Стремительное внедрение в информационные сети оптических линий передачи является следствием преимуществ, вытекающих из особенностей распространения сигнала в оптическом волокне.

Преимущества ВОЛП:

1 *Широкая полоса пропускания канала* – обусловлена чрезвычайно высокой несущей частотой 10^{14} Гц. Это дает потенциальную возможность передачи по одному оптическому волокну информации со скоростью в несколько терабит (1 Тбит = 10^{12} бит) в секунду. Широкая полоса пропускания канала – это одно из наиболее важных преимуществ оптического волокна над медной или любой другой средой передачи информации.

2 *Малое затухание светового сигнала в волокне.* Выпускаемое в настоящее время отечественными и зарубежными производителями промышленное оптическое волокно имеет затухание 0,2–0,3 дБ на длине волны 1,55 мкм (1 мкм = 10^{-6} м) в расчете на один километр. Малое затухание и дисперсия позволяют строить участки линий без ретрансляции протяженностью 100 км и более.

3 *Низкий уровень шумов* в волоконно-оптическом кабеле позволяет увеличить полосу пропускания канала путем использования различных видов модуляции с малой избыточностью кодов.

4 *Высокая помехозащищенность*. Поскольку оптическое волокно изготовлено из диэлектрического материала, оно маловосприимчиво к электромагнитным помехам со стороны окружающих медно-кабельных линий связи и электрического оборудования, способного индуцировать электромагнитное излучение (линии электропередачи, электродвигательные установки и т. д.). В многоволоконных кабелях также не возникает проблемы перекрестного влияния электромагнитного излучения, присущего многопарным медным кабелям.

5 *Малый вес и объем*. Волоконно-оптические кабели (ВОК) имеют меньший вес и объем по сравнению с медными кабелями в расчете на одну и ту же пропускную способность. Если волокно «одеть» в множество защитных оболочек и покрыть стальной ленточной броней, диаметр такого ВОК будет 1,5 см, что в несколько раз меньше медного телефонного кабеля.

6 *Высокая защищенность от несанкционированного доступа*. Поскольку ВОК практически излучает в радиодиапазоне, то передаваемую по нему информацию трудно подслушать, не нарушая приема-передачи. Системы мониторинга (непрерывного контроля) целостности оптической линии связи, используя свойства высокой чувствительности волокна, могут мгновенно отключить «взламываемый» канал связи и подать сигнал тревоги. Сенсорные системы, использующие интерференционные эффекты распространяемых световых сигналов (как по разным волокнам, так и разной поляризации) имеют очень высокую чувствительность к колебаниям, к небольшим перепадам давления. Такие системы особенно необходимы при создании линий связи в правительственных, банковских и некоторых других специальных службах, предъявляющих повышенные требования к защите данных.

7 *Гальваническая развязка элементов сети*. Данное преимущество оптического волокна заключается в его изолирующем свойстве. Волокно помогает избежать электрических «земельных» петель, которые могут возникать, когда два сетевых устройства неизолированной вычислительной сети, связанные медным кабелем, имеют заземления в разных точках здания, например на разных этажах. При этом может возникнуть большая разность потенциалов, что способно повредить сетевое оборудование. Для волокна этой проблемы просто нет.

8 *Взрыво- и пожаробезопасность*. Из-за отсутствия искробразования оптическое волокно повышает безопасность сети на химических, нефтеперерабатывающих предприятиях, при обслуживании технологических процессов повышенного риска.

9 *Экономичность ВОК*. Волокно изготовлено из кварца, основу которого

составляет двуокись кремния, широко распространенного, а потому недорогого материала, в отличие от меди. В настоящее время стоимость волокна по отношению к медной паре соотносится как 2:5. При этом ВОК позволяет передавать сигналы на значительно большие расстояния без ретрансляции. Количество повторителей на протяженных линиях сокращается при использовании ВОК.

10 *Длительный срок эксплуатации.* Со временем волокно испытывает деградацию. Это означает, что затухание в проложенном кабеле постепенно возрастает. Однако, благодаря совершенству современных технологий производства оптических волокон, этот процесс значительно замедлен, и срок службы ВОК составляет примерно 20 лет. За это время может смениться несколько поколений (стандартов) приемо-передающих систем.

11 *Удаленное электропитание.* В некоторых случаях требуется удаленное электропитание узла информационной сети. Оптическое волокно не способно выполнять функции силового кабеля. Однако, в этих случаях можно использовать смешанный кабель, когда наряду с оптическими волокнами кабель оснащается медным проводником.

Несмотря на многочисленные преимущества перед другими способами передачи информации, волоконно-оптические системы имеют также и недостатки, главным образом из-за дороговизны прецизионного (точного) монтажного оборудования и надежности лазерных источников излучения. Многие из недостатков вероятнее всего будут нивелированы с приходом новых конкурентоспособных технологий в волоконно-оптические сети.

Недостатки ВОЛП:

1 *Стоимость интерфейсного оборудования.* Электрические сигналы должны преобразовываться в оптические и наоборот. Цена на оптические передатчики и приемники остается пока еще довольно высокой. При создании оптической линии передачи также требуются: высоконадежное специализированное пассивное коммутационное оборудование, оптические соединители с малыми потерями и большим ресурсом на подключение-отключение, оптические ответвители, аттенуаторы.

2 *Монтаж и обслуживание оптических линий.* Стоимость работ по монтажу, тестированию и поддержке волоконно-оптических линий передачи в рабочем состоянии также остается высокой. Если же повреждается ВОК, то необходимо осуществлять сварку волокон в месте разрыва и защищать этот участок кабеля от воздействия внешней среды.

3 *Требование специальной защиты волокна.* Стекло выдерживает колоссальные нагрузки с пределом прочности на разрыв выше 1 ГПа (10 Н/м). Однако на практике это не достигается. Причина в том, что оптическое волокно, каким бы совершенным оно не было, имеет микротрещины, которые инициируют разрыв. Для повышения надежности оптическое волокно при изготов-

лении покрывается специальным лаком на основе эпоксиакрилата, а сам оптический кабель упрочняется, например нитями на основе кевлара. Если требуется удовлетворить еще более жестким условиям на разрыв, кабель может упрочняться специальным стальным тросом или стеклопластиковыми стержнями. Но все это влечет увеличение стоимости оптического кабеля.

Преимущества от применения волоконно-оптических линий передачи настолько значительны, что несмотря на перечисленные недостатки оптического волокна, дальнейшие перспективы развития технологии ВОЛП в информационных сетях более чем очевидны.

1.2 Затухание оптического волокна

Затухание оптического волокна (ОВ) характеризуется двумя важнейшими параметрами: затуханием и дисперсией (уширением импульса света). Чем меньше затухание (потери) и чем меньше дисперсия распространяемого сигнала в волокне, тем больше может быть расстояние между регенерационными участками или повторителями.

По мере распространения света в оптической среде он, как известно, ослабевает, что носит название затухания среды, или в случае оптических волокон – затухания ОВ. Потери при прохождении по волоконному световоду должны быть минимальными, для того чтобы можно было покрывать большие расстояния без установки ретрансляторов. Затухание волоконного световода является важным фактором при проектировании кабельных сетей для передачи информации. На затухание света в волокне влияют такие факторы: потери на поглощении; потери на рассеянии; кабельные потери (рисунок 1).

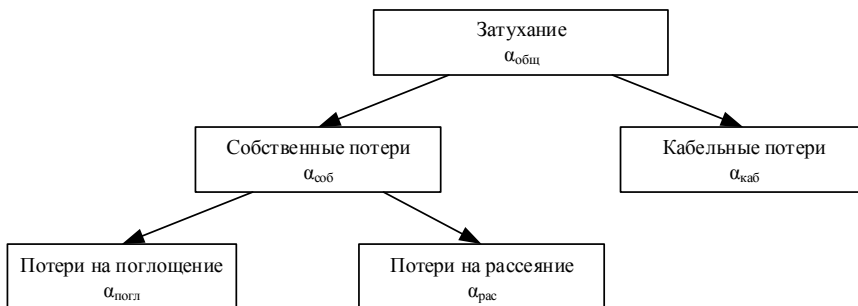


Рисунок 1 –Основные типы потерь в волокне

Полное затухание в волокне измеряется в дБ/км и определяется в виде суммы всех видов потерь.

Потери на поглощении и на рассеянии вместе называют собственными потерями, в то время как кабельные потери в силу их природы называют также дополнительными потерями.

Потери на поглощение $\alpha_{\text{погл}}$ состоят как из собственных потерь в кварцевом стекле (ультрафиолетовое и инфракрасное поглощение), так и из потерь, связанных с поглощением света на примесях. Примесные центры, в зависимости от типа примеси, поглощают свет на определенных (присущих данной примеси) длинах волн и рассеивают поглощенную световую энергию в виде джоулева тепла. Даже ничтожные концентрации примесей приводят к появлению пиков на кривой потерь. Собственные потери на поглощении растут и становятся значимыми в ультрафиолетовой и инфракрасной областях. При длине волны излучения свыше 6 мкм кварцевое стекло становится непрозрачным из-за роста потерь, связанных с инфракрасным поглощением.

Потери на рассеяние $\alpha_{\text{рас}}$. Современное изготавливаемое оптическое волокно является настолько чистым, что наличие примесей перестает быть главенствующим фактором затухания в волокне. Дальнейшему уменьшению затухания препятствует так называемое рассеяние света. Частично рассеяние неизбежно для волокна (рэлеевское рассеяние), частично вызывается изгибами волокна и неоднородностями в волокне, вызванными процессом производства. *Рэлеевское рассеяние* вызвано наличием неоднородностей микроскопического масштаба в волокне. Свет, попадая на такие неоднородности, рассеивается в разных направлениях. В результате часть его теряется в оболочке. Эти неоднородности неизбежно появляются во время изготовления волокна и объясняются локальными колебаниями плотности кварца из-за хаотического движения молекул в расплавленном состоянии. При затвердевании волокна происходит застывание неоднородностей, возникших в расплавленном состоянии.

Потери на рэлеевском рассеянии зависят от длины волны по закону λ^{-4} и сильней проявляются в области коротких длин волн. Длина волны, на которой достигается нижний предел собственного затухания чистого кварцевого волокна, составляет 1550 нм ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$) и определяется разумным компромиссом между потерями вследствие рэлеевского рассеяния и инфракрасного поглощения.

На рисунке 2 приведен общий вид спектральной зависимости потерь с указанием характерных значений основных параметров для современных одномодовых и многомодовых волокон.

Кривая носит иллюстративный характер, так как для разных типов волокон и разных производителей величина потерь может различаться. Наиболее сильно могут различаться потери при $\lambda \approx 1290 \text{ нм}$ и 1383 нм .

Как видно из рисунка 2, для передачи оптических сигналов может быть использован широкий участок спектра, где потери в волокнах достаточно малы. Его принято разбивать на более узкие участки – рабочие диапазоны, или *окна прозрачности*.

Первоначально под окнами прозрачности понимались участки длин волн вблизи узких локальных минимумов зависимости потерь от длины волны:

850 нм (первое), 1310 нм (второе), 1550 нм (третье). Постепенно с развитием технологии очистки кварцевого стекла стала доступна вся область малых потерь от 1260 нм до 1675 нм. Кривая потерь теперь выглядит достаточно гладкой, и локальные минимумы на ней слабо выражены.

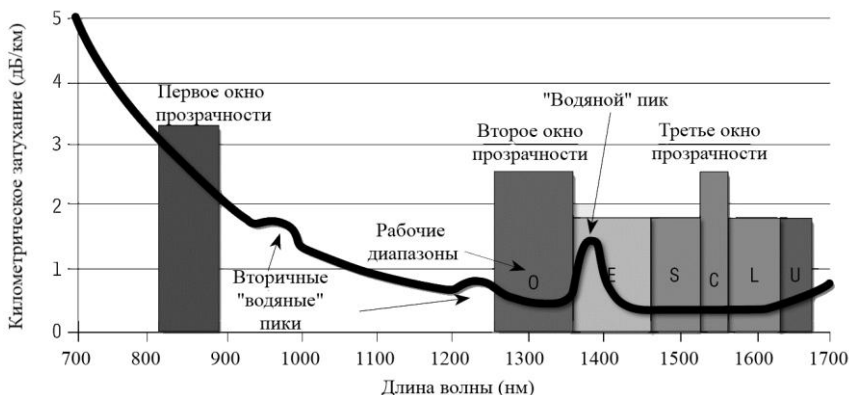


Рисунок 2 – Общий вид спектральной зависимости потерь в ОВ

Первое окно прозрачности использовалось в 70-х гг. в первых линиях связи на многомодовых волокнах. Тогда полупроводниковые источники излучения выпускались промышленностью только на длину волны 850 нм. В настоящее время, из-за большой величины потерь в волокнах, этот диапазон используется в основном в локальных вычислительных сетях.

Второе окно прозрачности (O) стало использоваться в 80-х гг. в линиях дальней связи, после того как на базе тройных и четверных гетероструктур были разработаны источники излучения на длину волны 1310 нм. В это окно попадает и длина волны нулевой дисперсии волокон. В настоящее время второе окно прозрачности используется преимущественно в городских и зонавых линиях.

Третье окно прозрачности (C) было освоено в начале 90-х гг. Третье окно наиболее широко используется в магистральных линиях.

В последнее время с развитием систем с мультиплексированием каналов по длинам волн третье и прилегающие к нему четвертое и пятое окна прозрачности вызывают повышенный интерес. В литературе диапазоны длин волн, соответствующие этим трем окнам, получили специальные наименования: третье окно – (C) стандартный диапазон, четвертое окно – (L) длинноволновый диапазон, а пятое окно – (S) коротковолновый диапазон [6].

Четвертое окно прозрачности (L) позволяет использовать длины волн до 1620 нм. Для работы одновременно в третьем и четвертом окнах прозрачности используются оптические усилители с увеличенной шириной полосы частот.

Пятое окно прозрачности (S) появилось в результате тщательной очистки его от посторонних включений. Потери на длине волны 1390 нм были снижены до 0,31 дБ/км, что меньше, чем во втором окне прозрачности на длине волны 1310 нм (0,35 дБ/км). Пятое окно прозрачности завершило освоение спектральной области малых потерь в волокне, простирающейся от 1280 нм до 1650 нм.

1.3 Кабельные потери

Френелевское отражение. Когда свет, распространяющийся в каком-нибудь материале (например в оптическом волокне), попадает в материал с другой плотностью (например в воздух), часть световой энергии (до 4 %) отражается назад, к источнику света, в то время как остальная световая энергия продолжает распространяться дальше (рисунок 3).

Собственное поглощение вызывается электронными переходами в ультрафиолетовой (УФ) области спектра и переходами между колебательными уровнями в инфракрасной (ИК) области спектра системы энергетических уровней молекулы кварца (SiO_2). Так, значительное поглощение из-за перестройки электронных орбит в SiO_2 происходит в УФ-области спектра на длине волны около 0,14 мкм. Наиболее интенсивное поглощение вследствие переходов между колебательными уровнями молекулы кварца происходит на длине волны 9,2 мкм, при этом высшие гармоники такого «осциллятора» (обертоны) расположены вблизи длин волн 3,2, 2,8 и 4,4 мкм.

Под **примесным поглощением** в материале оптоволокна понимается поглощение света остаточными примесями в кварцевом стекле. У кварцевого стекла это проявляется в наличии полос в частотном спектре поглощения в области длин волн 725, 875, 950, 1125, 1225 и 1370 нм, соответствующих гармоникам фундаментальной частоты колебаний межатомной связи в гидроксильных ионах OH^- и частоте колебаний связи Si-O.

Концентрация ионов OH^- один на миллиард дает потери 1 дБ/км при длине волны 950 нм и около 3 дБ/км при 1225 нм. Для устранения проблемы производится дегидратация материала, уменьшающая число гидроксильных ионов OH^- . Другие виды поглощения вызваны остаточными примесями переходных металлов, например ионами Fe_3^+ и Cr_2^+ . Поглощение света в кварцевом стекле вызывается и легирующими примесями, добавляемыми в стекло для изменения показателя преломления.

Рассеяние Лава-Ми. Рассеяние зависит от соотношения размеров частицы и длины волны, которая падает на частицу. В случае, когда частица намного меньше длины волны, рассеяние является частным случаем рэлеевского. Внешняя электромагнитная волна поляризует частицу, возбуждая в ней переменный дипольный момент.

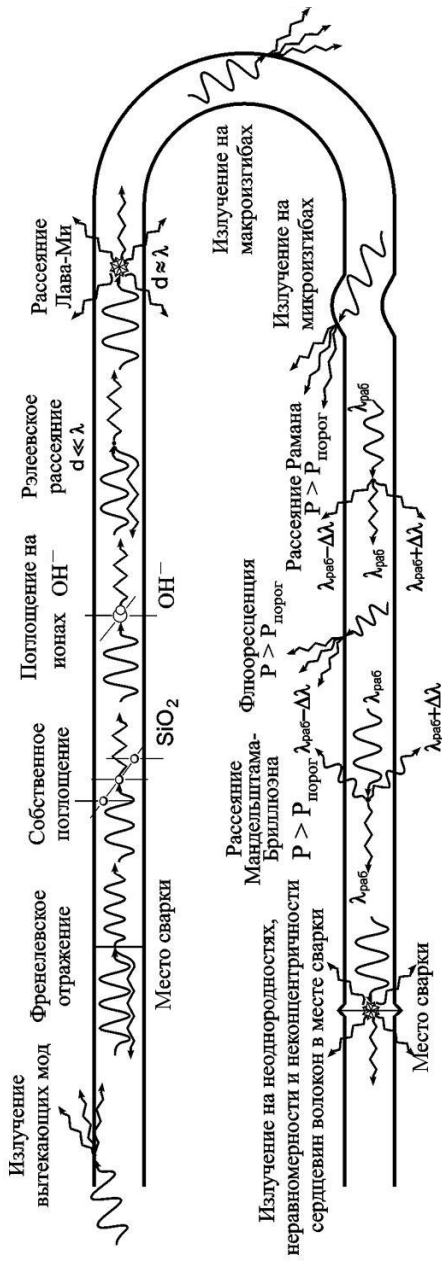


Рисунок 3 – Причины излучения и рассеяния в оптическом волокне

Дипольный момент, колеблющийся в такт с частотой внешней волны, переизлучает свет с характерной для дипольного момента диаграммой направленности. Если можно пренебречь частотной зависимостью диэлектрической проницаемости частицы, интенсивность рассеяния зависит от частоты в четвертой степени, что приводит к сильному рассеянию коротких волн.

В случае близости размеров частицы к длине волны света диаграмма направленности рассеяния становится сложной. Проявляется интерференция волн, отражённых от различных участков поверхности частицы. Интенсивность рассеянного под определенным углом света зависит от того, сколько раз волна укладывается на диаметре частицы, поэтому она сильно зависит от размеров частицы.

Если размеры сферы намного больше длины волны света, то поверхность сферы будет вести себя как плоская поверхность. Происходит преломление и отражение света, которые описываются формулами Френеля.

Макроизгибы и микроизгибы. При изготовлении кабеля оптическое волокно в кабеле располагается свободно, поскольку оптоволокно подвержено разрушению при растяжении более, чем на 1 %. Следовательно, оптическая длина волокна в кабеле, как правило, больше длины самого кабеля. При этом в волокне возникают **макроизгибы и микроизгибы** при его расположении в полости волоконно-оптического кабеля, что также сказывается на затухании светового сигнала в случае, если световой луч падает на границу раздела сред оптоволокна под углом, который больше угла полного отражения. Таким образом световой луч выходит за пределы сердечника оптического волокна.

Потери могут возникать также в результате случайных микроизгибов оптического волокна, которые происходят в процессе наложения защитного покрытия и изготовления оптических волокон в результате температурных расширений и сжатий непосредственно волокна и его защитных покрытий. Размах таких отклонений составляет менее 1 мкм, а шаг – менее 1 мм. К макроизгибам относятся также изгиб оптического волокна в результате монтажа кабельной линии или укладки запасов кабеля в телекоммуникационные шкафы, когда пренебрегают минимально рекомендованным радиусом изгиба оптического кабеля.

Рассеяние Рамана – неупругое рассеяние оптического излучения на молекулах вещества, сопровождающееся заметным изменением частоты излучения. В отличие от рэлеевского рассеяния, в случае комбинационного рассеяния света в спектре рассеянного излучения появляются спектральные линии, которых нет в спектре первичного (возбуждающего) света. Число и расположение появившихся линий определяется молекулярным строением вещества.

Флюоресценция – один из видов люминесценции: свечение вещества, затухающее в течение короткого времени после воздействия на них светом.

Рассеянием **Мандельштама – Бриллюэна** называют рассеяние оптического излучения в результате его взаимодействия с собственными упругими колебаниями среды. Оно сопровождается изменением набора частот (длин волн), характеризующих излучение (его спектрального состава).

По оптическому волокну передается световая энергия, содержащая полезный информационный сигнал. Импульсы света, последовательность которых определяет информационный поток, в процессе распространения расплываются. При достаточно большом уширении импульсы начинают перекрываться, так что становится невозможным их выделение при приеме. Дисперсия (уширение импульсов) имеет размерность времени и определяется как квадратичная разность длительностей импульсов на выходе и входе кабеля длины L .

$$\tau(L) = \sqrt{t_{\text{вых}}^2 - t_{\text{вх}}^2}.$$

Обычно дисперсия нормируется в расчете на 1 км, и измеряется в пс/км ($1 \text{ пс} = 10^{-12} \text{ с}$).

Чем меньше значение дисперсии, тем больший поток информации можно передать по волокну.

На практике пользуются термином полоса пропускания (W). Измеряется полоса пропускания в МГц·км. Полоса пропускания обратно пропорциональна дисперсии, т. е. дисперсия накладывает ограничения на дальность передачи. Физический смысл полосы частот – это максимальная частота (частота модуляции) передаваемого сигнала при длине линии 1 км. Если дисперсия линейно растет с увеличением расстояния, то полоса пропускания зависит от расстояния обратно пропорционально.

1.4 Измерение параметров волоконно-оптических линий передачи

Наиболее часто выполняемые виды тестирования оптического волокна:

1 *Проверка целостности волокна.* Волокно должно быть в состоянии пропускать свет – от передатчика до приемника. При этом тестировании определяется, может ли свет пройти от одного конца волокна до другого. Это самый основной и самый простой вид тестирования. Проверять наличие света на приемном конце можно с помощью простого оптического тестера. С помощью рефлектометра можно также измерить общую длину волокна. Лазер, работающий в видимой части спектра, обеспечит возможность визуальной проверки целостности волокна.

2 *Определение места обрыва в волоконно-оптическом кабеле.* Прежде чем устранить в сети неполадки и вернуть ее в строй, надо определить место обрыва волокна. Поскольку обычно волоконно-оптический кабель недоступен для визуальной проверки, место обрыва обычно устанавливают с помо-

щью оборудования для тестирования. Лазерный источник, работающий в видимой части спектра, вполне пригоден для обнаружения обрывов в тех частях волокна, которые примыкают к обоим концам линии. Для обнаружения обрывов, находящихся за пределами этих участков, используют оптический рефлектометр или детектор обрывов.

3 Идентификация волокна для сращивания. Часто бывает трудно определить, какое именно волокно из многих, имеющихся в кабеле, нужно сращивать со следующим. Поскольку свет в сети для человеческого глаза невидим, а условная расцветка волокон в месте сращивания может не соответствовать условной расцветке или цифровым обозначениям на стороне кабеля, примыкающей к узлу, то даже простое определение того, какое именно волокно нужно сращивать, становится трудновыполнимым без специального оборудования для тестирования. Специалист, который занимается сращиванием, и специалист, который занимается тестированием, должны работать с одним и тем же волокном, чтобы сократить время сращивания и тестирования соединения. Человеческий глаз может видеть свет, выходящий из конца волокна на расстоянии нескольких километров от источника света – лазера, работающего в видимой части спектра.

4 Определение целостности волокна в оптоволоконном соединении. При создании или восстановлении волоконно-оптической сети нужно быть уверенным в том, что только что сделанное соединение достаточно высококачественное, чтобы пропускать свет из одного волокна в другое. Но недостаточно убедиться в том, что свет, поданный в волокно непосредственно перед местом соединения, может пройти в какую-либо точку, находящуюся сразу за соединением. Нужно также быть уверенным в том, что свет проходит весь путь до следующего соединения или до конца волоконно-оптического кабеля. Целостность волокна в месте соединения устанавливается проверкой прохождения света через соединение и его распространения до следующей открытой точки волокна. Эта операция осуществляется с помощью оптического рефлектометра или источника света и детектора.

5 Измерение потерь в оптоволоконных соединениях. Качество соединения измеряется в дБ. Потери в соединениях нужно удерживать на низком уровне для того, чтобы достаточное количество света достигало детектора. Типичные постоянные потери на соединении – менее 0,3 дБ. Что касается временных соединений, используемых при восстановительных работах, то они должны обеспечивать лишь прохождение света до приемника. Чтобы действительно измерить потери на соединении, нужно измерить количество световой энергии непосредственно перед ним и сразу же после него. Для достоверного измерения потерь на соединениях предназначены только оптические рефлектометры. Лазер, работающий в видимой части спектра, можно

использовать для получения самого общего результата – «проходит/не проходит» (посредством наблюдения за тем, сколько света выходит из волокна наружу у соединения).

6 *Измерение потерь в волокне (полного затухания)*. «Нижним пределом» для работы волоконно-оптической сети является наиболее низкий уровень сигнала, который может восприниматься детектором. Волоконно-оптические сети рассчитываются на конкретный «диапазон потерь», который должен выдерживаться для обеспечения нормальной работы сети. При данном количестве света, поданного в волокно передатчиком, имеется максимальный уровень потерь световой энергии, которые можно допустить, не ослабляя сигнал настолько, что детектор на приемной стороне не сможет его воспринять. Полные потери включают в себя обычные потери в волокне, потери в каждом из соединений и все потери, вызываемые дефектами или сильными изгибами волоконно-оптического кабеля. Наиболее точно полные потери измеряются с помощью стабилизированного источника излучения известной пользователю мощности и оптического тестера. Оптический рефлектометр также может измерять полные потери, но с одним исключением: он не измеряет потери в разъемах.

7 *Определение качества волокна (измерение километрических потерь)*. Качество волокна выражается в значении потерь (в децибелах) на километр. Чем ниже это значение (дБ/км), тем длиннее будет линия связи с определенным оптическим бюджетом. Волоконно-оптический кабель обычно заказывают изготовителю с определенным значением дБ/км и конкретной рабочей длиной волны. У одномодового волокна потери составляют, примерно, от 0,20 до 0,35 дБ/км (эти значения зависят от длины световой волны, диаметра волокна и других факторов). Эффективнее всего эти потери можно определить с помощью оптического рефлектометра.

8 *Измерение отражения от оптоволоконных соединений и разъемов*. Отражение характеризуется тем количеством света, который отражается от конца волокна у механического соединения или разъема. Если назад (в передатчик отражается определенное количество световой энергии), то это может повлиять на работу сети, особенно для СЦИ (синхронная цифровая иерархия) и аналоговых видеосетей. Отражение измеряется в дБ; для обеспечения бесперебойной работы оно должно составлять –40 дБ или менее. Измерить отражение на соединениях и разъемах в середине пролета можно только с помощью оптического рефлектометра.

9 *Оптические потери на отражение*. Общие потери на отражение (ОПО), называемые также оптическими потерями на отражение – это общее количество света, отраженного от волокна при данном количестве света, излученного в волокно. Они включают все отражения и обратное рассеяние в волокне. ОПО – это данные о том, сколько света возвращается в передатчик

(источник света). Слишком большие ОПО могут привести к появлению различных проблем в сетях кабельного телевидения и высокоскоростных цифровых сетях. ОПО можно измерять двумя способами:

- калиброванным источником света и тестера вместе с другими специальными компонентами – всех их можно объединить в измеритель ОПО;
- оптическим рефлектометром, обладающим функцией измерения ОПО. Измеритель ОПО определяет уровень отраженного сигнала непосредственно, в то время как рефлектометр рассчитывает ОПО по уровням отражения и обратного рассеяния, которые он обычно измеряет в волокне.

10 *Документирование результатов измерений (распечатка или запись на диск)*. Чтобы должным образом поддерживать работу волоконно-оптической сети, нужно знать, какой она была в оптимальном состоянии – когда она была построена и введена в строй. Сравнивая результаты, полученные в ходе регламентного обслуживания, с первоначальными записями данных о полных потерях, потерях на соединениях и т. п., можно определить, не ухудшается ли состояние какой-либо части сети. Подготовка документации включает различные процессы – от записи результатов на листке бумаги до получения распечатки от тестирующего оборудования, до сохранения результатов тестирования на диске компьютера для последующего рассмотрения или анализа на компьютере. Наиболее эффективным и относительно недорогим средством архивации данных тестирования является оптический рефлектометр со встроенным дисководом для хранения данных. Он также делает возможным вызов первоначальных данных назад в прибор для их сравнения с результатами текущего тестирования.

Автономные программы, эмулирующие (имитирующие) рефлектометр на настольных и переносных компьютерах, еще более повышают эффективность документации. Можно просто получить из рефлектометра (или какого-либо другого оборудования для тестирования) сохраненные результаты тестирования и работать с ними в офисе, а оборудование в это время будет продолжать использоваться. При использовании такой программы можно наложить текущую рефлектограмму на первоначальную и проверить, не произошло ли ухудшения. Программа может проанализировать результаты тестирования и сообщить местонахождение соединений и потери на них. Кроме того, в любое время на принтере компьютера можно распечатать подробные данные или обобщенные сводки и подготовить отчеты.

Привязка к местности – это еще одна важная задача, которую можно выполнить с помощью результатов тестирования, сохраненных на диске. С помощью программы анализа волокна определенные точки в кабеле (точки, находящиеся на определенном оптическом расстоянии от рефлектометра) можно привязать к определенным точкам на местности.

«Ориентиры» обычно приводятся в разделе комментариев к рефлектограмме волокна (с перечислением неоднородностей). Туда можно занести

ближайшее пересечение с улицей, номер люка телефонной канализации или географические координаты. Все это делает возможным определение того, где на местности можно найти то место в волокне, в котором возникла какая-либо проблема.

1.5 Измерение ВОЛП с помощью оптических рефлектометров

Оптический рефлектометр (ОР) – это электронно-оптический измерительный прибор, используемый для определения характеристик оптических волокон. Он определяет местонахождение дефектов и повреждений, измеряет уровень потерь сигнала в любой точке оптического волокна. Все, что нужно для работы с оптическим рефлектометром, – это доступ к одному концу волокна. Оптический рефлектометр производит тысячи измерений по всей длине волокна. Точки с результатами измерений находятся друг от друга на расстоянии от 0,1 м до 50 м. Эти точки выводятся на экран и образуют наклонную линию, идущую слева направо и сверху вниз. При этом по горизонтальной оси графика откладывается расстояние, а по вертикальной – уровень сигнала. Выбрав с помощью подвижных курсоров две любые точки с результатами измерений, можно определить расстояние между ними и разницу между уровнями сигнала в этих точках.

Принцип действия ОР во многом такой же, как и у импульсных рефлектометров, применяемых для тестирования электрических кабелей. Оба типа рефлектометров посылают в линию мощный зондирующий импульс (оптический или электрический) и измеряют мощность и время запаздывания импульсов, вернувшихся обратно в рефлектометр. Отличие заключается в том, что в электрической линии наблюдаются только отраженные импульсы. Они образуются в местах, где в линии имеются скачки волнового сопротивления. В оптических же волокнах обратная волна образуется не только за счет отражения от больших (по сравнению с длиной волны) дефектов, но и за счет рэлеевского рассеяния. Рассеяние света происходит на флуктуациях показателя преломления кварцевого стекла, застывших при вытяжке волокна. Размер этих неоднородностей мал по сравнению с длиной волны и свет на них рассеивается во все стороны, в том числе и назад в моду волокна (рисунок 4).

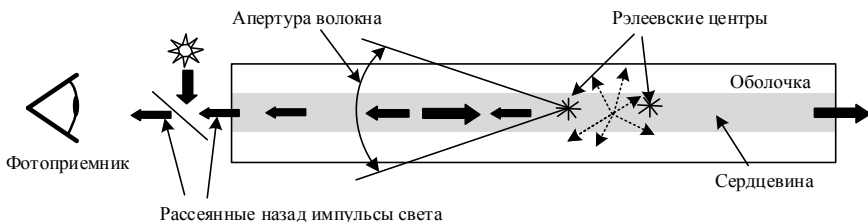


Рисунок 4 – Рэлеевское рассеяние в оптическом волокне

Рэлеевские центры распределены однородно вдоль волокна, и в рассеянной на них волне содержится информация обо всех параметрах линии, влияющих на поглощение света. Именно за счет детектирования рассеянного излучения удастся обнаруживать неотражающие (поглощающие) неоднородности в волокне. Например, по сигналу обратного рэлеевского рассеяния света можно измерить распределение потерь в строительных длинах оптических кабелей и потери в сростках волокон. Такие измерения нельзя выполнить, регистрируя только отраженное (а не рассеянное) излучение.

Рефлектометры являются одним из наиболее мощных аппаратных средств для тестирования волоконно-оптических кабелей и находят использование во время строительства, аттестации, эксплуатационного обслуживания, профилактических проверок, ремонтно-восстановительных и других работ. Это обусловлено тем, что рефлектометр:

- позволяет за один цикл измерений одновременно определять целый ряд основных параметров оптического кабеля, в том числе его длину, километрическое затухание, наличие и местоположение мест неоднородностей и повреждений, их характер, потери в соединителях, сростках и т. д. без проведения сложных подготовительных работ;

- в отличие от оптических тестеров допускает выполнение всего комплекса измерений с одного конца оптического кабеля.

Основные недостатки рефлектометра как измерительного прибора состоят в следующем:

- ограниченный динамический диапазон, что связано с небольшой мощностью сигнала обратного рассеивания;

- высокая требовательность к качеству ввода излучения в тестируемое волокно;

- невозможность проведения высококачественного измерения в реальном масштабе времени;

- большая стоимость.

1.6 Конструкция оптического рефлектометра

В большинстве моделей ОР используется модульная конструкция. Она содержит базовый модуль и несколько сменных оптических модулей. Базовый модуль представляет собой персональный компьютер, приспособленный для обработки сигнала и вывода результатов на дисплей. Оптический модуль состоит из лазерного диода, фотоприемника, оптического ответвителя и оптического разъема. Стоимость оптического модуля зависит от величины его динамического диапазона и может в несколько раз превышать стоимость базового модуля. Модульная конструкция ОР позволяет потребителю не только выбрать необходимую ему на данный момент конфигурацию прибора, но и в дальнейшем модернизировать прибор, например установив многомодовый модуль или одномодовый модуль с большим динамическим диапазоном.

Оптический рефлектометр состоит из лазерного источника света (лазерного диода), оптического детектора (фотоприемника), ответвителя, дисплея и контроллера (управляющего процессора) (рисунок 5).

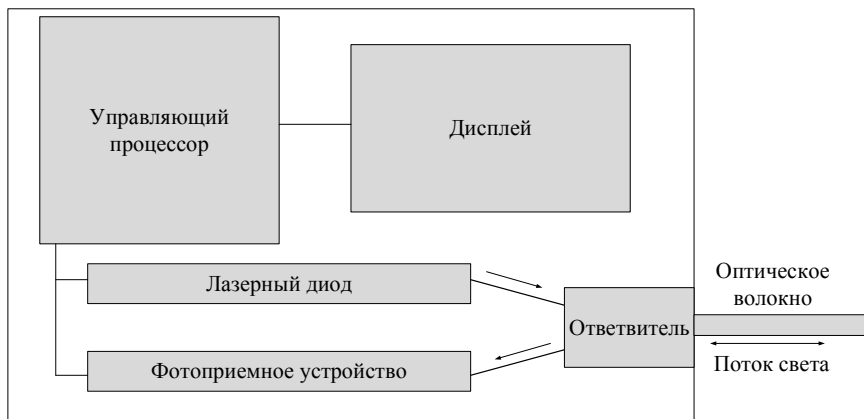


Рисунок 5 – Блок-схема оптического рефлектометра

Лазер посылает световые импульсы по команде контроллера. При различных условиях измерений можно выбирать различные длительности импульса. Свет проходит через ответвитель и входит в тестируемое волокно. У некоторых оптических рефлектометров имеется по два лазера, с помощью которых можно тестировать волокна на двух различных длинах волн. Использовать оба лазера одновременно нельзя. С одного лазера на другой можно переключиться простым нажатием кнопки.

У ответвителя имеются три порта: один для источника света, один для тестируемого волокна и один для измерителя. Ответвитель – это устройство, позволяющее свету распространяться только в определенных направлениях: от лазерного источника к тестируемому волокну и от тестируемого волокна к детектору. Свет не может идти от источника прямо к измерителю. Таким образом, импульсы из источника света направляются в тестируемое волокно, а отраженная световая энергия – обратное рассеяние и френелевское отражение – направляется в детектор.

Детектор – это фотоприемник, который измеряет уровень мощности света, идущего из тестируемого волокна. Он преобразует оптическое излучение в электрические сигналы соответствующего уровня: чем больше мощность оптического излучения, тем выше уровень электрических сигналов. Детекторы оптического рефлектометра специально рассчитаны на измерение крайне низких уровней обратного рассеяния световой энергии. В состав измерителя входит и электрический усилитель, предназначенный для дальнейшего повышения уровня электрического сигнала. Френелевское отражение в

сотни раз сильнее обратного рассеяния. Измерить такую величину прибор не в состоянии – она приводит к его перегрузке и насыщению. Поэтому выходной электрический сигнал «обрезается» тогда, когда достигает максимального уровня выходной мощности измерителя. Так что каждый раз, когда тестирующий импульс достигает конца волокна – все равно у механического соединения (стыка) или у конца всего волокна, – это приводит к тому, что измеритель «слепнет» до окончания импульса.

Управляющий процессор (контроллер) подсказывает лазеру, когда надо посылать импульс; получает от измерителя данные об уровнях мощности; рассчитывает расстояния до точек рассеяния и отражения в волокне; в нем хранятся отдельные точки измерений; он посылает информацию на дисплей.

Одним из основных компонентов блока контроллера является очень точная схема синхронизации, которая используется для точного измерения разницы во времени между посылкой импульса лазером и обнаружением отраженного света измерителем. Умножив это время распространения импульса в обоих направлениях (туда и обратно) на скорость света в волокне (которая представляет собой скорость света в безвоздушном пространстве, скорректированную введением показателя преломления), и поделив его пополам, можно рассчитать расстояние от оптического рефлектометра до нужной точки.

Блок дисплея – это экран на электронно-лучевой трубке или на жидких кристаллах, на который выводятся точки измерений, образующие рефлектограмму волокна, а также параметры настройки рефлектометра и результаты измерений. На большинстве дисплеев рефлектометров точки измерений для большей наглядности соединяются друг с другом линией. С помощью выведенных на экран курсоров на рефлектограмме можно выбрать любую точку измерений. Когда курсор находится на какой-либо точке, на экран выводится расстояние до этой точки. У рефлектометра с двумя курсорами на экран будут выводиться расстояния до каждого из них, а также разница между уровнями обратного рассеяния в обеих точках. С помощью курсоров можно измерять различные параметры: потери в двух точках, километрические потери, потери на стыке и потери на отражение. Результаты таких измерений выводятся на экран.

1.7 Принцип работы оптического рефлектометра

Для измерения характеристик оптического волокна оптический рефлектометр использует явления рэлеевского рассеяния и френелевского отражения. Посылая в волокно световой импульс и измеряя время его распространения и интенсивность его отражения от точек, находящихся внутри волокна, рефлектометр выводит на экран дисплея рефлектограмму «Уровень отраженного сигнала в зависимости от расстояния».

Рефлектограмму можно проанализировать на месте, немедленно распечатать для создания документации о линии или сохранить на диске компьютера для более позднего анализа и сопоставлений. По такой рефлектограмме опытный оператор может точно определить конец волокна, местонахождение оптоволоконных стыков и потери в них, а также полные потери в волокне. В большинстве последних моделей рефлектометров предусмотрена возможность автоматического анализа полученных рефлектограмм, что упрощает обучение операторов.

Рэлеевское рассеяние. При посылке светового импульса по волокну часть импульса натывается на имеющиеся в стекле микроскопические неоднородности и рассеивается во всех направлениях. Часть световой энергии – около 0,0001 % – рассеивается назад, в направлении, противоположном направлению распространения импульса; это явление называется обратным рассеянием.

Рэлеевское рассеяние – это основная причина потерь, имеющих место в волокне. На более длинных световых волнах рассеяние меньше, чем на более коротких. Так, например, свет на 1550 нм теряет из-за рэлеевского рассеяния от 0,2 до 0,3 дБ на километр (дБ/км), в то время как на 850 нм – от 4,0 до 6,0 дБ/км. Имеющие более высокую плотность неоднородности также увеличивают рассеяние и, следовательно, повышают уровень километрического затухания. Оптический рефлектометр может измерять уровни обратного рассеяния с большой точностью, используя эту способность для выявления незначительных изменений характеристик волокна в любой его точке.

Френелевское отражение. Резкие изменения плотности материала имеют место на концах волокна, у обрывов волокна и, иногда, у оптоволоконных стыков (рисунок 6). Количество отраженного света зависит от величины изменения плотности материала (которая характеризуется показателем преломления – более высокий показатель преломления означает большую плотность), а также от того угла, под которым свет падает на поверхность раздела между двумя материалами. Это явление называется френелевским отражением. Оно используется в оптическом рефлектометре для точного определения мест обрывов волокна.

Хотя оптический рефлектометр измеряет только уровень обратного рассеяния, а не уровень передаваемой световой энергии, имеется весьма определенное соотношение между уровнем обратного рассеяния и уровнем переданного импульса: обратное рассеяние составляет определенный процент переданной световой энергии.

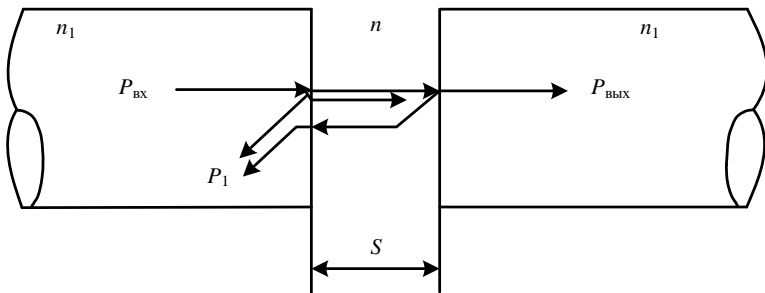


Рисунок 6 – Механизм отражения в разъемном соединении ВОК:

n_1 – коэффициент преломления оптоволокна, n – коэффициент преломления воздуха,
 S – ширина воздушного зазора, $P_{вх}$ – мощность сигнала на входе соединения, $P_{вых}$ – мощность сигнала на выходе соединения, P_1 – мощность сигнала отраженная от соединения

Соотношение между световой энергией обратного рассеяния и переданной световой энергией называется *коэффициентом обратного рассеяния*. Если – из-за сильного изгиба, соединения двух волокон (оптоволоконного стыка) или какого-нибудь дефекта – количество передаваемой световой энергии между точками А и Б резко падает, то и соответствующее обратное рассеяние между точками А и Б уменьшится в той же пропорции. Те же самые вызывающие потери факторы, которые приводят к понижению уровней передаваемых импульсов, приведут к понижению уровня обратного рассеяния этих импульсов. Наклон рефлектограммы указывает на километрические потери (рисунок 7).

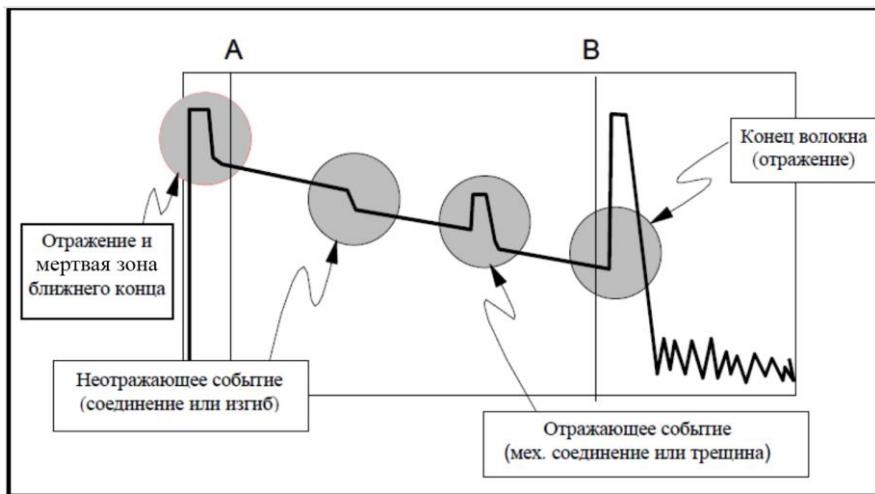


Рисунок 7 – Общий вид рефлектограммы

Чем круче наклон кривой, тем больше значение удельных потерь. Сама линия образуется точками измерений, соответствующими уровням обратного рассеяния. Френелевское отражение выглядит на рефлектограмме в виде всплесков, идущих вверх от уровня обратного рассеяния. Резкий сдвиг уровня обратного рассеяния указывает на «точечную потерю», что может означать наличие либо сварного соединения (оптоволоконного стыка), либо точки с механическим напряжением, через которую свет выходит из волокна.

1.8 Типы событий на рефлектограммах

События отражения можно разделить на два класса.

На *обратное отражение* – потери сигнала, вызванные его отражением в направлении источника излучения.

И *вносимые потери* – это затухание сигнала в ходе прохождения по линии или через устройство.

Потеря сигнала, в отличие от отражения, обычно бывает вызвана дефектами сварных швов и перегибами кабеля. В таких местах мало отражений Френеля, но происходит затухание сигнала из-за кабеля. Оно может быть выявлено путем регистрации резких скачков обратного рассеяния.

Эхо (фантомы) представляют собой отражения пучков света, как правило, вызванные некачественным соединением в точке стыка кабелей.

Термины *эхо* и *фантом* применяются для обозначения двух типов несуществующих событий, являющихся плодом процесса получения рефлектограммы.

Эхом называются события, вызванные многократным отражением света.

Фантомами называются ситуации, когда промежуток между импульсами лазера настолько мал, что энергия от одного импульса накладывается на трассировочный след другого импульса. В измеряемой линии появляется своеобразное эхо, которое и вызывает ошибку (рисунок 8 – ложное событие после конца линии (слева) и результат переотражений в середине сегмента (справа)). Фантом пропадает при изменении диапазона измерений, который рекомендуется устанавливать в два раза превышающим предполагаемую длину линии.

Скрытое событие (рисунок 9) – это событие, возникающее настолько близко к предыдущему, что у сигнала не остается времени на падение до обычного уровня обратного рассеяния между ними. Типичными источниками скрытых событий служат соединительные шнуры, применяемые при коммутации.

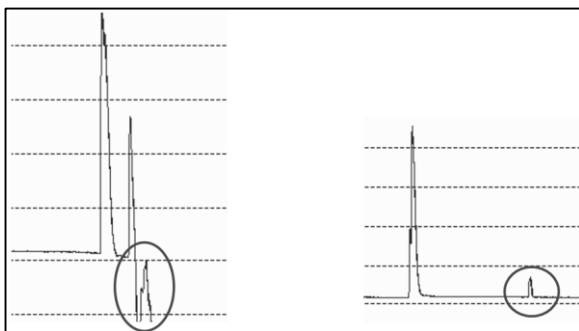


Рисунок 8 – Фантомы на рефлектограмме

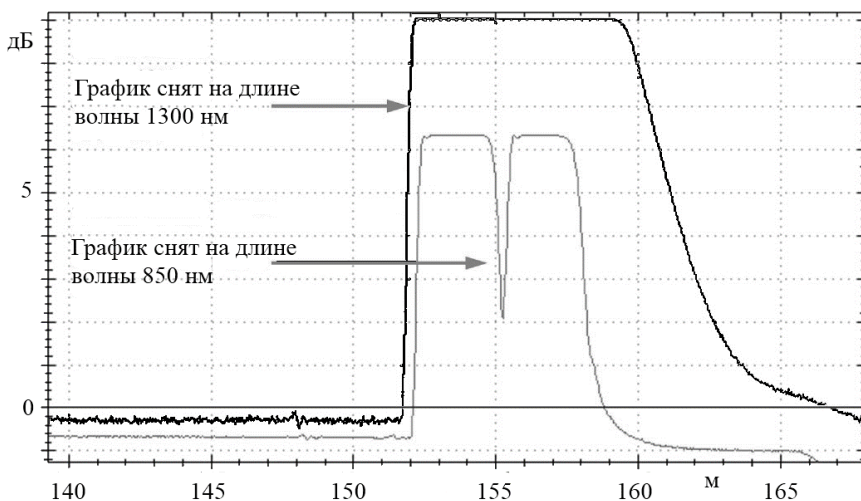


Рисунок 9 – Скрытое событие на рефлектограмме

Ситуация, когда уровень обратного рассеяния после события выше, чем до события, называется *подъемом* (рисунок 10).

Подъемы часто бывают вызваны стыками разных типов кабеля. Кроме того, подъемы встречаются после больших отражений. От сильного сигнала остается след за отражением, который постепенно исчезает. Если следующее событие достаточно близко, вместо обратного рассеяния наблюдается подъем. Этот уровень может быть выше уровня обратного рассеяния события, за которым возник след. Также вызывается стыковкой волокон с разным диаметром модового пятна, разными коэффициентами обратного рассеяния, вариациями в числовых апертурах. Наиболее частая причина возникновения

подъемов – сварка волокон с меньшим и большим диаметрами. При измерении во встречном направлении событие будет трактоваться как оптические потери.

Если точка усиления идентифицирована как коннекторное соединение, выдается сообщение об отражающем событии с отрицательными потерями.

Грязные и плохо отполированные разъемы отражают сравнительно много света, что сказывается на форме событий и приводит к увеличению подъема и потере сигнала вокруг события. Кроме того, плохие разъемы могут служить источниками эха. Все эти факторы снижают точность работы оптического рефлектометра.

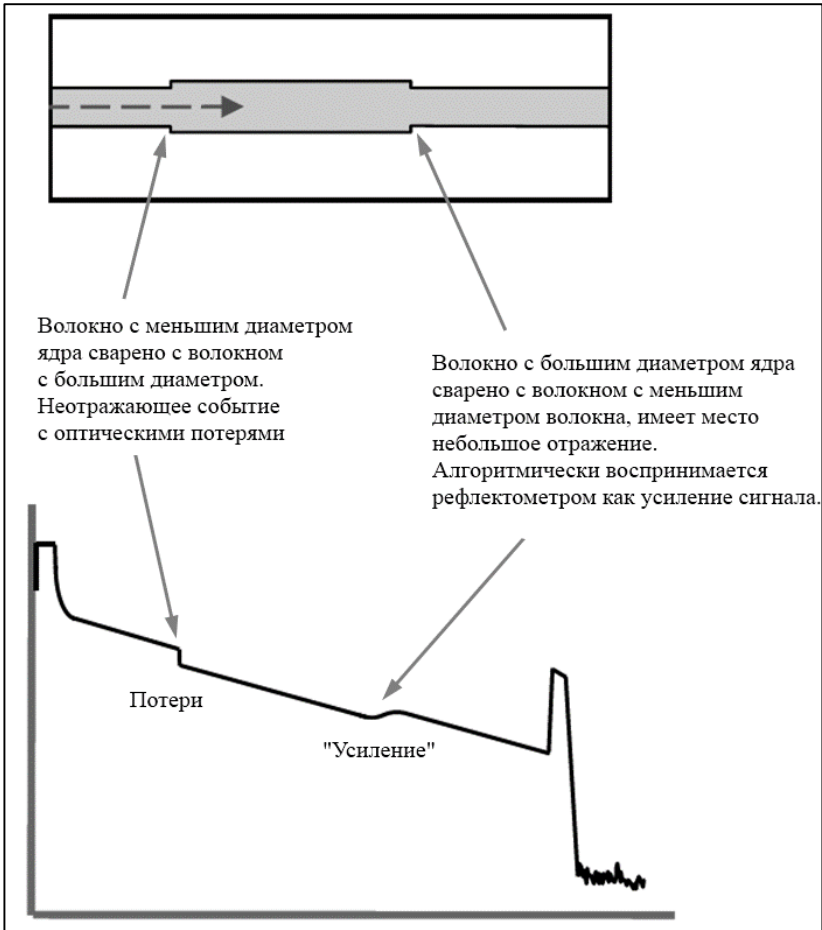


Рисунок 10 – Подъем на рефлектограмме

1.9 Основные характеристики оптического рефлектометра

Динамический диапазон оптического рефлектометра определяет, какую длину волокна он может измерить. Динамический диапазон выражается в децибелах, причем чем больше это значение, тем больше длина волокна, которое можно измерить. Тестирующий импульс должен быть достаточно сильным, чтобы достичь конца тестируемого волокна, а измеритель должен быть достаточно чувствительным, чтобы быть в состоянии измерить самые слабые сигналы обратного рассеяния, поступающие с конца длинного отрезка волокна. Динамический диапазон зависит как от полной импульсной мощности лазерного источника света, так и от чувствительности измерителя: очень мощный источник света и чувствительный измеритель обеспечат большой динамический диапазон и наоборот.

Динамический диапазон оптического рефлектометра определяется как разность между уровнем обратного рассеяния на ближнем конце волокна и верхним уровнем среднего значения шума у конца волокна или после него.

При большом динамическом диапазоне индикация на дисплее уровня обратного рассеяния на дальнем конце волокна будет четкой и плавной. При маленьком динамическом диапазоне рефлектограмма будет зашумлена на дальнем конце – точки с результатами измерений, показывающие на рефлектограмме уровень обратного рассеяния, не образуют плавной линии, а будут постоянно уходить то вверх, то вниз. На зашумленной части рефлектограммы трудно различить какие-нибудь детали, так как разница между результатами измерений в двух смежных точках может быть больше значения потерь на оптоволоконном соединении.

Увеличение полной выходной импульсной мощности лазерного источника может быть осуществлено двумя способами: увеличением абсолютного количества излучаемой световой энергии или увеличением длительности импульса. У каждого способа есть свой предел.

У лазерного диода имеется естественный максимальный уровень выходной мощности, который невозможно превысить. Кроме того, более высокая выходная мощность означает сокращение срока службы: лазер может быстрее перегореть.

Увеличение длительности импульса затрагивает другие рабочие характеристики, такие как мертвая зона: чем больше длительность импульса, тем длиннее мертвые зоны. У измерителей также имеются естественные ограничения их способности измерять низкие уровни световой энергии. В некоторой точке уровень посланного измерителем электрического сигнала (который соответствует обнаруженному уровню мощности оптического излучения) теряется в электрическом шуме схемы, так что контроллер не может отличить шум от результатов, полученных измерителем. Решающее значение

для ослабления отрицательного воздействия на рефлектометр электрического шума имеет внутреннее электрическое экранирование. Кроме того, когда измеритель работает с использованием своей максимальной чувствительности, уровень его точности понижается. Для повышения точности измерений при более низких уровнях световой энергии в рефлектометре применяется метод усреднения, объединяющий результаты измерений тысяч импульсов. Использование этого метода усреднения повышает чувствительность измерителя и тем самым помогает увеличивать динамический диапазон.

Имеется несколько различных методов расчета динамического диапазона. *Первый метод*, рекомендуемый многими ведущими организациями, называется «методом определения 98 %-ного уровня шума». При использовании этого метода определяется точка, в которой уровень обратного рассеяния только начинает смешиваться с уровнем шума в приборе. *Второй метод* называется отношение С/Ш (сигнал/шум). Он аналогичен методу 98 %-ного уровня шума, но увеличивает значение динамического диапазона примерно на 2–3 дБ. При использовании метода С/Ш определяется точка, у которой уровень обратного рассеяния рефлектограммы идет вниз и опускается ниже уровня внутреннего шума рефлектометра. Это означает, что становится невозможным получить от рефлектограммы подробные данные о конце волокна. *Третий метод* называется «обнаружением френелевского отражения»; он может увеличить значение динамического диапазона на 10 и более децибел. При использовании этого метода производится измерение точки, в которой пик френелевского отражения в конце волокна можно обнаружить сразу же над уровнем шума. Этот метод дает самое большое значение динамического диапазона.

Мертвой зоной называется участок рефлектограммы оптического волокна, на котором невозможно определить его характеристики из-за наличия сигналов, возникающих вследствие отражения света от неоднородностей. Поскольку мертвая зона непосредственно связана с длительностью импульса, то ее можно уменьшить, сократив длительность импульса. Но сокращение длительности импульса означает уменьшение динамического диапазона. В конструкции любого рефлектометра должен найти отражение компромисс между этими двумя характеристиками. Аналогичным образом пользователь оптического рефлектометра должен выбирать длительность импульса в зависимости от того, что для него является более важным: различать близко расположенные друг к другу неоднородности или просматривать волокно большей длины. Самая лучшая конструкция обеспечивает большой динамический диапазон при небольшой длительности импульса. Это соотношение динамического диапазона к длительности импульса и будет определять, на каком расстоянии в волокне возможно отличать друг от друга две находящиеся близко друг к другу неоднородности (оптоволоконные соединения).

Мертвые зоны появляются на рефлектограмме волокна во всех случаях, когда в волокне использованы разъемы, а также при наличии в волокне некоторых дефектов (таких, как трещины). В каждом волокне имеется по крайней мере одна мертвая зона: в том месте, где оно присоединено к рефлектометру. Это означает, что в начале тестируемого волокна имеется участок, в котором нельзя проводить измерения. Этот участок имеет непосредственное отношение к длительности импульса лазерного источника. Более длительный импульс вызывает увеличение ширины мертвой зоны. Если существует необходимость получить характеристику той части волокна, которая находится рядом с ближним концом, или если нужно измерить два события (неоднородности) на рефлектограмме, находящиеся друг от друга на небольшом расстоянии, то нужно выбрать самую короткую из возможных длительностей импульса, при которой рефлектограмма выглядит незашумленной.

Различают две категории мертвых зон: мертвые зоны отражения и мертвые зоны затухания.

Ширина мертвой зоны для событий (неоднородности и отражения) определяется как минимально разрешимое расстояние между двумя неоднородностями. Мертвые зоны для событий (МЗС) подразделяются на мертвые зоны для отражающей и для неотражающей неоднородности (рисунок 11). В спецификациях на рефлектометр обычно указывают только ширину мертвой зоны для отражающей неоднородности (мертвой зоны по отражению).

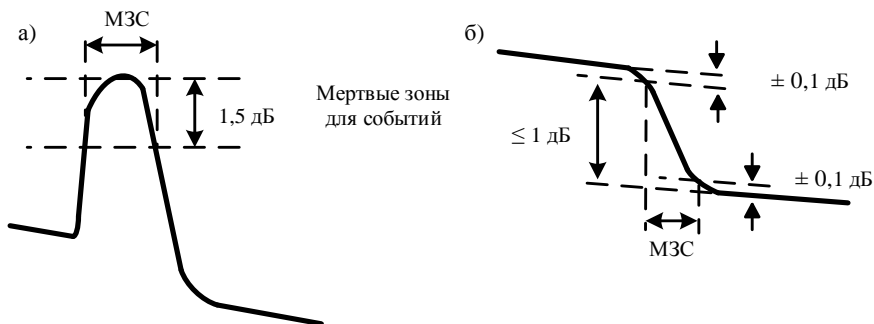


Рисунок 11 – Мертвые зоны для событий:

а – ширина мертвой зоны для отражающей неоднородности; *б* – ширина мертвой зоны для неотражающей неоднородности

Ширину мертвой зоны по отражению полагают равной ширине всплеска на рефлектограмме (ширине импульса света (на дисплее)) по половинному уровню. По шкале рефлектометра этот уровень находится на 1,5 дБ ниже вершины импульса (см. рисунок 11, *а*). Ширину мертвой зоны для неотражающей неоднородности определяют по ширине переходного участка, наблюдаемого на рефлектограмме в месте расположения этой неоднородности (см.

рисунок 11, б). При этом полагают, что величина потерь в этой неоднородности <1 дБ.

Ширина мертвой зоны равна ширине всплеска на рефлектограмме. На рисунке 12 изображен участок рефлектограммы с двумя одинаковыми, близко расположенными отражающими неоднородностями. Передний фронт отраженного импульса изображается там же, где находится неоднородность. Задний фронт отраженного импульса изображается дальше от начала рефлектограммы, так как он приходит на фотоприемник позже, чем передний фронт. Расстояние между передним и задним фронтами импульса равно ширине импульса на дисплее.

Когда расстояние между неоднородностями заметно больше ширины импульса, они легко различаются, так как отраженные от них импульсы не перекрываются. Чем меньше расстояние между неоднородностями, тем сильнее перекрываются отраженные от них импульсы. Когда расстояние между неоднородностями становится равным ширине импульса, отраженные импульсы перекрываются настолько сильно, что сливаются в один импульс с небольшим провалом на вершине. При наличии такого провала оператор считает, что отражение происходит от двух неоднородностей. Этот провал не различим, когда расстояние между этими неоднородностями меньше ширины мертвой зоны, когда коэффициенты отражения от неоднородностей не равны друг другу, а также, когда рефлектограмма зашумлена. Ширина и форма импульса на дисплее зависят не только от длительности импульсов света, испускаемых лазерным диодом, но и от ширины полосы фотоприемника Δf .

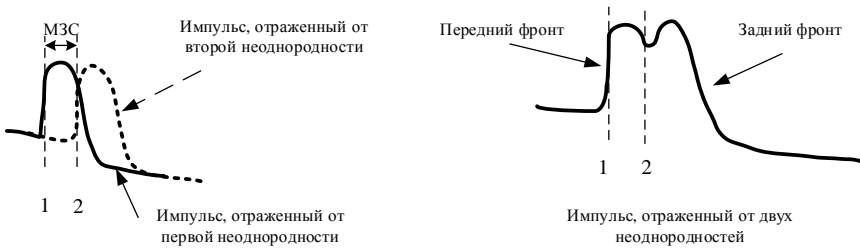


Рисунок 12 – Отражение импульса света от двух одинаковых неоднородностей 1 и 2, расположенных на расстоянии, равном ширине мертвой зоны

Мертвая зона затухания – это расстояние от какого-либо френелевского отражения до того места, где можно обнаружить обратное рассеяние. В этом случае измеритель получает информацию о том, как скоро после отражения можно измерить второе событие, такое как сварное соединение или дефект

волокна. Чтобы осуществлять какие-либо измерения потерь в волокне, необходимо видеть обратное рассеяние по обе стороны от оптоволоконного соединения. Это означает, что рефлектограмма должна опуститься со своего пика у отражения до уровня обратного рассеяния. Мертвые зоны затухания всегда длиннее, чем мертвые зоны события, поскольку для обнаружения уровня обратного рассеяния детектор должен полностью восстановить свою чувствительность.

Разрешающая способность оптического рефлектометра. В рефлектометре существуют две разновидности разрешающей способности: по потерям (по затуханию) и пространственная (по расстоянию).

Разрешающая способность по потерям – это способность прибора различать воспринимаемые им уровни мощности сигналов. Большинство рефлектометров могут выводить на экран дисплея разность между уровнями обратного рассеяния вплоть до 0,01 или 0,001 дБ. По мере распространения лазерного импульса по волокну соответствующие сигналы обратного рассеяния становятся все слабее.

Пространственная разрешающая способность – это параметр, определяющий, насколько близко друг к другу по времени (и, соответственно, по расстоянию) находятся отдельные точки с результатами измерений, образующие рефлектограмму. Эта способность выражается в единицах расстояния. Контроллер рефлектометра через определенные интервалы времени получает от измерительного устройства точки с результатами измерений. Если он снимает показания очень часто, то расстояния между точками измерений будут небольшими, и рефлектометр сможет обнаруживать в волокне такие неоднородности, которые расположены близко друг к другу. Разрешающая способность по расстоянию оказывает влияние на способность рефлектометра определять местонахождение конца всего волокна.

Чем ближе точки расположены друг к другу, тем больше сведений о волокне можно получить. Рефлектограмма выводится на экран дисплея в виде линии, соединяющей точки измерений. Разрешающая способность дисплея выше, чем действительная пространственная разрешающая способность. На экране дисплея легко достичь и «сантиметровой разрешающей способности» – для этого надо просто расширить на экране пространство между двумя точками измерений так, чтобы курсор можно было перемещать на очень небольшое расстояние. Но это не означает, что оптический рефлектометр производит измерения с высокой разрешающей способностью – речь идет только о высокой разрешающей способности дисплея. Пространственная разрешающая способность в некоторых местах уменьшается из-за наличия мертвой зоны. Достоверные измерения затухания в волокне – это те, которые сделаны между двумя уровнями обратного рассеяния. Для измерения потерь нельзя использовать те точки измерений, которые были получены в то время, когда измеритель был в состоянии насыщения из-за френелевского отражения. Это

связано с тем, что в то время прибор не мог точно измерять уровни. Поэтому пространственная разрешающая способность в районе вокруг френелевского отражения более низкая из-за того, что единственные точки измерений, которые можно использовать, находятся до и после мертвой зоны по обе стороны оптоволоконного соединения.

Точность измерения расстояний оптическим рефлектометром зависит от стабильности тактовой частоты, шага точек измерений, неопределенности показателя преломления; от стабильности и точности схемы синхронизации, которая определяет время подачи импульсов и длительность интервалов между выборкой показаний измерителя. Если часы спешат или отстают, тогда измеренное время – и, соответственно, расстояние – будет либо короче, либо длиннее, чем в действительности.

Показатель преломления – это соотношение между скоростью света в вакууме и скоростью света в каком-нибудь определенном волокне. Поскольку быстрее всего свет распространяется в вакууме, а в плотных материалах (таких как атмосфера или стекло) распространяется медленнее, то значение этого показателя всегда больше единицы. Для стекла оно равно примерно 1,4–1,5. Скорость света меняется в зависимости от плотности того материала, в котором он распространяется. Плотность волокна определяется количеством и видом примесей, применяемых в процессе изготовления; их распределение может быть не абсолютно одинаковым в различных частях волокна и в различных волокнах. Таким образом, значение показателя преломления изменяется как в различных волокнах, так и в пределах одного волокна. Показатель преломления является «калибровочным» коэффициентом, который «сообщает» рефлектометру, с какой скоростью распространяется свет, и тем самым предоставляет ему возможность точно измерять расстояния.

В большинстве случаев нужно использовать значения показателя, рекомендованные изготовителем для различных видов тестируемых волокон и для различных длин волн.

1.10 Параметры измерений оптических волокон

После того как рефлектометр был должным образом отконфигурирован с учетом той волоконно-оптической линии, в которой предстоит производить измерения, он готов к проведению тестирования. Для обеспечения наилучших результатов надо настроить прибор. Многие из параметров измерения надо настроить лишь один раз, затем они будут сохранены в памяти прибора. Если данные о рефлектограмме можно хранить в памяти рефлектометра или на дискете, то при выведении рефлектограммы на экран можно вывести и информацию о настройке.

Диапазон измеряемых расстояний. Диапазон измеряемых расстояний называют также диапазоном длин, выводимых на дисплей. Он ограничивает

длину волокна, которую можно вывести на экран дисплея. Диапазон измеряемых расстояний должен быть больше длины тестируемого волокна. Этот диапазон влияет на точность тестирования и на время, нужное для его проведения.

Поскольку оптический рефлектометр должен одновременно посылать только один импульс, а затем, прежде чем послать следующий импульс, ждать, пока в детектор не вернутся все отражения первого импульса, то диапазон измеряемых расстояний определяет время, через которое посылаются импульсы. Этот параметр называется частотой повторения импульсов (ЧПИ). Чем больше эта частота, тем короче время усреднения при данном числе средних значений. Чем длиннее волокно, тем больше время прохождения импульса по нему; поэтому, чем больше диапазон измерения расстояний, тем большее время занимает полное усреднение – так как ЧПИ меньше.

Разрешающая способность. При некоторых конфигурациях рефлектометров имеется возможность выбирать разрешающую способность измерений – расстояние (шаг) между точками с результатами измерений. Более высокая разрешающая способность (меньший шаг точек) обеспечит получение большего числа сведений о волокне, но тестирование в этом случае, как правило, займет больше времени, чем при более низкой разрешающей способности.

Более высокая разрешающая способность обеспечивает более точное определение местонахождения события (неоднородности) на рефлектограмме. Если рефлектометр снимает показания через каждые 8 м волокна, а обрыв волокна произошел через 7 м после точки с результатами измерений, то возникшее в результате этого френелевское отражение будет казаться исходящим от точки с результатами измерений, находящейся за 7 м до места действительного обрыва, поскольку следующая точка (через 1 м после места обрыва) окажется на уровне френелевского отражения. Если же разрешающую способность точек с результатами измерений сократить до 0,5 м, то местонахождение обрыва будет установлено более точно.

Разрешающую способность не надо путать с масштабом дисплея по горизонтали. Разрешающая способность курсора (то, на какое минимальное расстояние можно переместить курсор на экране) также не имеет никакого отношения к шагу точек с результатами измерений. Большинство курсоров можно поместить между этими точками, создав тем самым впечатление, что они обеспечивают лучшую разрешающую способность.

Длительность лазерных импульсов можно изменять при проведении измерений. Выбирая большую или меньшую длительность импульса, можно регулировать уровень отраженного обратного рассеяния, а также размер мертвой зоны. Более длительный импульс означает посылку в волокно большего количества световой энергии, которая пройдет по волокну на большее расстояние и приведет к более высоким уровням обратного рассеяния. Но это

приведет также к большей длительности мертвых зон. И наоборот, импульс меньшей длительности приведет к тому, что мертвые зоны будут минимальной длительности, но обратное рассеяние окажется слабее.

Импульсы большой длительности формируют рефлектограмму с большим динамическим диапазоном; они применяются для быстрого обнаружения дефектов и обрывов волокна. Поскольку при более длинных импульсах уровни обратного рассеяния повышаются, то для получения «чистой» рефлектограммы потребуется меньшее время усреднения.

Импульсы меньшей длительности применяются для тестирования той части волокна, которая примыкает к рефлектометру. Они используются и для того, чтобы отличить друг от друга две (или более) неоднородности, близко расположенные друг к другу. Вследствие меньшей длительности мертвой зоны такие импульсы дают возможность обнаруживать более мелкие подробности в обратном рассеянии, идущем сразу же за френелевским отражением. Но из-за более низкого уровня обратного рассеяния требуется большее время усреднения.

Усреднение. Смежные точки с результатами измерений, полученные от одного измерительного импульса, могут отличаться друг от друга, хотя в самом импульсе изменения произошли весьма небольшие. Полученная в результате этого рефлектограмма выглядит «зашумленной» или размытой. Чтобы получить более надежную и гладкую рефлектограмму, рефлектометр посылает тысячи измерительных импульсов. Каждый импульс обеспечивает набор точек измерений, которые затем усредняются с последующими наборами точек, для того чтобы улучшить отношение «сигнал/шум» рефлектограммы. Усреднение занимает некоторое время. Обычно длительное усреднение требуется при тестировании длинного волокна, а также при посылке импульсов малой длительности.

Если тестирование проводится в реальном масштабе времени, то усреднение не производится вообще или производится очень мало. При выведении данных на дисплей в реальном масштабе времени можно видеть изменения, имеющие место в волокне в текущий момент. Тестирование в реальном масштабе времени обычно производится во время осуществления операций по сращиванию волокна. Такое тестирование направлено на идентификацию волокна и на фиксирование параметров выполняемого оптоволоконного стыка. Также оно используется для быстрого измерения волоконно-оптического кабеля на барабане в ходе приемочного тестирования.

1.11 Расшифровка и анализ рефлектограммы оптического волокна

После завершения измерения волокна и выведения полученной рефлектограммы на экран дисплея эту рефлектограмму надо проанализировать. Для

выделения конечных точек измерений применяются курсоры, а цифровые результаты выводятся на экран.

Наиболее важное измерение, осуществляемое с помощью рефлектометра, – это определение места дефекта или обрыва волокна. Чтобы устранить повреждение, нужно определить его точное местонахождение. Френелевское отражение имеет место у большинства повреждений волокна. Оно выглядит как неожиданный всплеск на рефлектограмме волокна, расстояние до этого отражения на рефлектограмме показывает та точка, на которой появился всплеск. Если рефлектограмма после этого отражения возвращается к уровню обратного рассеяния, значит, волокно оборвано не полностью. То, насколько уровни обратного рассеяния до и после отражения отличаются друг от друга, говорит о том, сколько света потеряно при повреждении или дефекте.

Многие механические оптоволоконные соединения вызывают френелевское отражение. Для того чтобы не спутать их с повреждениями, надо знать те места, где они находятся в волокне. Если после отражающего события (неоднородности) появляется обратное рассеяние, то это событие, вероятно, является механическим соединением. Если же после отражения появляется только шум, то это конец волокна.

Для измерения расстояний достаточно просто переместить курсор к какой-либо точке рефлектограммы, можно определить расстояние от рефлектометра до этой точки. Единицы измерения расстояния обычно можно выбирать. Нужно помнить, что прибор измеряет длину самого волокна (называемую оптическим расстоянием), а не длину оболочки кабеля или расстояния на местности вдоль кабельной трассы. Длина волокна может превышать длину оболочки кабеля на величину до 2 %, поскольку волокно в кабеле укладывается свободно, с допуском на его изгибы. Кроме того, у оптоволоконных стыков, а иногда и в некоторых других точках вдоль трассы кабеля, обычно предусматриваются свободные петли кабеля.

Результат измерения расстояния до неоднородности в волокне (такой как механическое или сварное соединение или конец волокна) зависит от того, куда помещен курсор. Чтобы обеспечить максимальную точность измерения, курсор нужно всегда помещать на последнюю точку обратного рассеяния, непосредственно перед неоднородностью.

Для измерения расстояния до отражающего события (такого как механическое соединение) нужно поместить курсор непосредственно перед отражением так, чтобы курсор не оказался наверху выброса.

Для измерения расстояния до неотражающего события (такого как сварное соединение или перегиб волокна) нужно поместить курсор в точке, непосредственно предшествующей падению (или подъему) рефлектограммы.

При использовании двух курсоров на дисплей будет выводиться расстояние от рефлектометра до каждого курсора, а также расстояние между обоими

курсорами. Такая возможность используется для выделения каких-либо участков волокна.

Потери измеряются на участках между двумя или несколькими курсорами. Точное измерение потерь возможно только между двумя уровнями обратного рассеяния. Это означает, что оба курсора должны находиться на обратном рассеянии. Ни один из них не должен быть ни на френелевском отражении, ни в мертвой зоне.

Полное затухание волокна можно измерить, поместив один курсор непосредственно справа от мертвой зоны ближнего конца, а второй – непосредственно слева от френелевского отражения дальнего конца. Потери на участке волокна измеряются простой установкой двух курсоров на концах этого участка и определением разницы в уровнях между ними.

Измерение потерь в оптоволоконном соединении представляет некоторую сложность. Оптоволоконное соединение идентифицируется как неожиданный сдвиг уровня обратного рассеяния. Если это механическое соединение, то возможно и френелевское отражение. Потери на соединении имеют место в одной точке волокна. Принимать форму точечных потерь могут также потери на изгиб и потери, вызванные механическим напряжением. Потери в одной точке можно измерять двумя методами: «методом двух точек» или определением потерь на соединении аппроксимацией по методу наименьших квадратов (МНК).

Метод двух точек аналогичен методу определения потерь на участке волокна, за исключением того, что два курсора устанавливаются как можно ближе друг к другу, причем левый курсор помещается прямо на измеряемой точке, а правый – как можно ближе к нему, но все же на обратном рассеянии. Уровень обратного рассеяния при наличии точечных потерь не падает, а слегка смещается в сторону и вниз. Длина участка такого смещения соотносится с длительностью импульса. Поскольку измерять потери можно только между двумя обратными рассеяниями, правый курсор не может использовать какую-либо часть этого участка смещения. Это приводит к тому, что правый курсор приходится помещать дальше, за точкой с результатами измерений, появляющейся после возникновения потерь. Следовательно, при измерении разницы в уровнях между двумя точками определяются потери, появившиеся в данной точке, плюс определенные потери (обычно крайне незначительные), которые в нормальных условиях появились бы при распространении сигнала на такое расстояние.

Аппроксимация по МНК – это способ, при котором устраняются чрезмерные, появившиеся в результате распространения на определенное расстояние потери, которые обнаруживаются при использовании метода двух точек (рисунки 13). Курсор просто помещается на ту точку, потери в которой надо измерить, а затем рефлектометр определяет, какими были бы потери, если бы

падение уровня обратного рассеяния на дисплее было отвесным, а не представляло собой смещение в сторону и вниз.

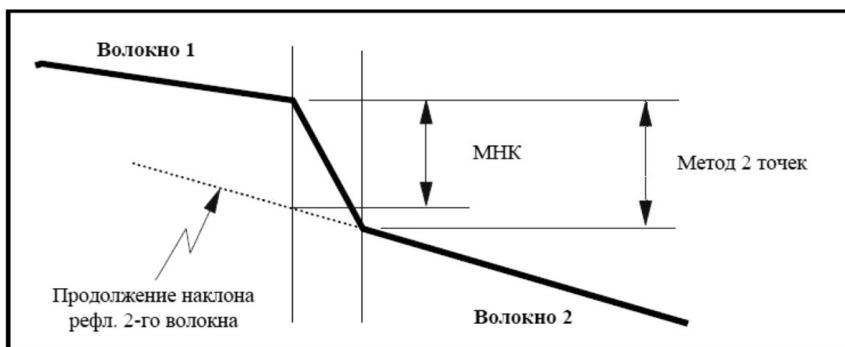


Рисунок 13 – Измерение потерь в неразъемном соединении

Измеряя потери методом МНК, рефлектометр выделяет часть рефлектограммы перед местом соединения, а также часть рефлектограммы после соединения. Выделение может быть осуществлено в виде более светлого участка линии или с помощью набора маркеров. Рефлектометр исследует выделенные участки и математически определяет наклон линий рефлектограммы по обе стороны от соединения (по МНК). Затем он определяет интервал по вертикали между этими двумя линиями в месте установки курсора. Это самый лучший способ измерения сдвига между двумя линиями, представляющими изменение уровня сигнала при переходе от одного волокна к другому. Именно это и определяет потери на оптоволоконном соединении: изменение уровня сигнала в том месте, где одно волокно присоединяется к другому. Необходимо помнить о том, что выделенные участки по обе стороны стыка не должны охватывать другое соединение или нелинейный участок рефлектограммы. Если часть выделенного участка не является прямой, то рассчитанный рефлектометром наклон будет неправильным, и последующий результат определения потерь также будет ошибочным. В большинстве рефлектометров можно регулировать выделенный участок таким образом, чтобы он охватывал только участки с линейным обратным рассеянием.

Измерение километического затухания – это общепринятый способ определения качества волокна. Чем меньше потери на единицу длины, тем сильнее будет сигнал у приемника. Единицей измерения расстояния при этом обычно является километр. Типичными значениями для одномодового волокна при излучении на 1300 нм являются километические затухания от 0,3 до 0,4 дБ/км. При 1550 нм эта величина падает до 0,2–0,25 дБ/км. Километическое затухание волокна автоматически рассчитывается при установке двух курсоров на рефлектограмму и выборе режима измерения на панели

управления. Рефлектометр просто выводит на экран расстояние и потери на участке между двумя курсорами, а затем рассчитывает километрические потери.

Величина отражения у разъема, обрыва или механического соединения зависит от того, насколько незагрязненным является обрыв, а также от того, насколько изменяется показатель преломления при выходе света из волокна. В большинстве механических соединений применяется гель или жидкость для сопряжения по показателю преломления соединяемых волокон, предназначенные для уменьшения такого изменения показателя преломления. Чем меньше изменения показателя преломления, тем меньше и отражение. Некоторые рефлектометры могут измерять количество отраженного света автоматически путем установки одного курсора непосредственно перед отражением и нажатия соответствующей кнопки на панели управления. Отражение измеряется в отрицательных децибелах, и чем меньше отрицательное значение, тем большему отражению оно соответствует. Так, например, отражение -33 дБ больше, чем отражение -60 дБ. Чем больше отражение, тем выше всплеск на рефлектограмме.

Измеряя и сопоставляя уровни отражения в механических соединениях в течение определенного периода времени, можно определить, имеют ли место изменения, возникающие в соединениях. Иногда уровень отражения повышается, даже если потери на соединении не становятся больше. Это может говорить о начальной стадии выхода механического соединения из строя. Увеличение отражения может означать, что концы волокна начинают расходиться в разные стороны (соединение становится слабее) или что жидкость для сопряжения по показателю преломления начинает высыхать или вытекать. Узнав уровень отражения у разъема, можно определить, не находится ли причина проблемы очень близко к разъему – у соединения или внутри самого разъема. Если измеренное рефлектометром расстояние до разъема на дальнем конце оказывается правильным, но уровень отражения стал намного ниже, чем он был раньше, то это может означать, что волокно разорвалось всего в нескольких сантиметрах от торца разъема и это (из-за зазубренных краев разбитого стекла) привело к понижению уровня отражения. Поскольку разъемы – это та часть, которую трогают чаще всего, то весьма легко повредить волокно непосредственно у разъема и даже не заметить этого. Эту проблему можно идентифицировать, используя способность рефлектометра измерять уровень отражения.

Некоторые современные модели рефлектометров могут также рассчитывать оптические потери на отражение непосредственно по рефлектограмме волокна.

1.12 Причины повреждений волоконно-оптических линий передачи

Одним из достоинств волоконно-оптических линий связи является возможность передавать огромные объемы информации. По этой же причине к качеству работы ВОЛП предъявляются более высокие требования.

Надежность ВОЛП зависит от конструктивно-производственных и эксплуатационных факторов. К конструктивно-производственным относятся факторы, связанные с разработкой, проектированием и изготовлением отдельных изделий и устройств, составляющих ВОЛП (оптические волокна кабеля, соединительные муфты и т. д.). К эксплуатационным факторам относятся все факторы, влияющие на надежность в процессе практического использования оптического кабеля (его прокладки, монтажа и последующей эксплуатации).

Также факторы можно условно разделить на две основные группы: внутренние и внешние. Внутренние факторы зависят от причин, возникающих в процессе изготовления оптического волокна, волоконно-оптического кабеля (ВОК), проектирования ВОЛП, монтажа, эксплуатации и старения ВОК. Внешние факторы не зависят от процесса изготовления и эксплуатации ВОК. Такими факторами являются, например, механические, климатические воздействия, токи молний (при наличии металлических элементов в ВОК) и т. д.

Причины повреждений весьма разнообразны: к ним могут относиться дефекты производства, монтажа, неправильная эксплуатация, пробой высоким напряжением (при наличии металла в ВОК), повреждение грызунами, старение и т. д.

Специалисты выделяют следующие основные причины аварий и повреждений подземных оптических кабелей:

- механические повреждения ВОК при выполнении строительно-монтажных работ сторонними организациями в пределах охранных зон кабельной линии, а также в результате актов вандализма;
- старение ВОК или попадание влаги в сердечник кабеля;
- грозовые воздействия на ВОК (при наличии металлических элементов в конструкции ВОК);
- воздействия грызунов, пожаров и т. д. на ВОК;
- нарушение технологии прокладки и монтажа ВОЛП.

На рисунке 14 приведены данные, полученные при анализе причин повреждения ВОЛП (Гомельского филиала РУП «Белтелеком» за период 2006–гг.).

Главной причиной повреждений ВОЛП являются повреждения механического характера. Следует заметить, что происходит постепенное увеличение

количества повреждений ВОЛП, которое объясняется постоянным увеличением общей протяженности и количества волоконно-оптических линий передачи. Повреждения, вызванные механическим воздействием, в основном связаны с нарушением некоторыми строительными организациями правил охраны линий и сооружений связи, а также с деятельностью злоумышленников. Остальные виды повреждений встречаются гораздо реже. Грозовые повреждения обусловлены наличием в ВОК металлических элементов (брони). Стихийные бедствия не являются характерными для нашего региона, поэтому вызванные ими повреждения встречаются также довольно редко. Возможность повреждения грызунами возникает при использовании кабелей без металлической брони.

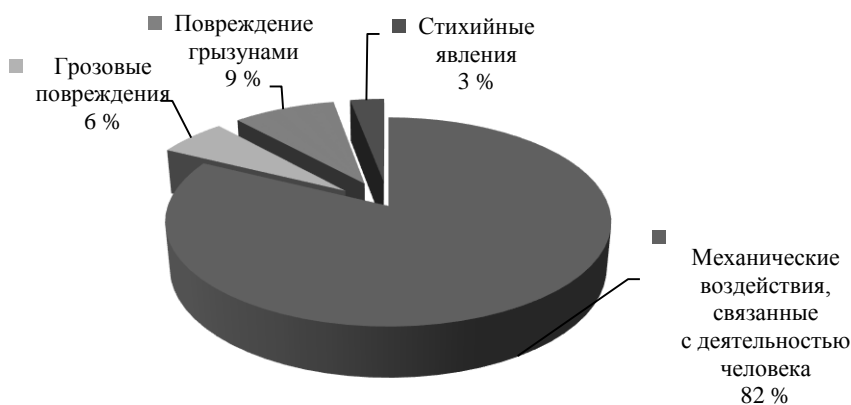


Рисунок 14 – Распределение повреждений по их видам

Одним из важнейших свойств оптического волокна является долговечность. Время нормальной работы волокна, то есть сохранение им своих свойств в определенных пределах, может превышать 20 лет. Волоконно-оптические кабели предприятия Гомельский филиал РУП «Белтелеком» имеют срок эксплуатации не более 15 лет, поэтому повреждения, вызванные старением ОВ на данном этапе эксплуатации, не приводят к аварийным ситуациям. Однако были отмечены случаи попадания влаги в оптические муфты, что отрицательно влияло на затухание волокна и могло вызвать его преждевременное старение. Проведение профилактических измерений позволяет своевременно обнаруживать и устранять такого рода недостатки.

Следует также сказать, что для повышения качества работы волоконно-оптических систем передачи данных и уменьшения времени, требуемого для

восстановления работоспособности линии, необходимо постоянно совершенствовать систему обслуживания, улучшать материально-техническую базу, проводить обучение персонала.

Возможные пути уменьшения количества повреждений ВОЛП. Основным требованием здесь является соблюдение правил прокладки, монтажа и эксплуатации ВОЛП. Защита ВОЛП от ударов молнии может быть осуществлена путем прокладки полностью неметаллических ВОК; путем прокладки ВОК повышенной молниестойкости; с помощью проложенных в земле параллельно ВОК защитных проводов (тросов). Однако следует помнить, что отсутствие металлической брони понижает прочность кабеля и делает его уязвимым для грызунов.

Одной из основных причин повреждений ВОК является человеческий фактор. Для обозначения трассы прохождения кабеля используются информационные знаки, проводится охранно-разъяснительная работа с землепользователями и строительными организациями, для ограничения доступа посторонних лиц в кабельной канализации устанавливаются устройства сигнализации.

Воздействие электромагнитных полей на подземные волоконно-оптические кабели

Одним из преимуществ волоконно-оптических линий связи считается нечувствительность к электромагнитным помехам, однако были зафиксированы случаи повреждения волоконно-оптического кабеля либо ухудшения качества связи, опровергающие эти предположения как в отношении кабелей с металлическими элементами в конструкции (с металлическими жилами дистанционного питания либо с металлическим экраном или оболочкой), так и в отношении кабелей без металла в конструкции.

Волоконно-оптические кабели, прокладываемые в грунте, обычно имеют металлическую оболочку или броню для защиты от механических повреждений, упрочняющие металлические элементы, а также могут иметь жилы дистанционного питания.

Ожидаемое число повреждений ударами молнии, возникающих на подземном оптическом кабеле, зависят от ряда факторов:

- интенсивности грозовой деятельности;
- амплитуды и формы импульса тока молнии;
- удельного сопротивления, влажности и геологического строения грунта;
- рельефа местности;
- наличия вблизи кабеля возвышающихся объектов;
- молниестойкости кабеля.

Возвышающиеся объекты (опоры воздушных линий связи, мачты радиообъектов, отдельные деревья, лес и т. п.), находящиеся вблизи трассы волоконно-оптического кабеля, ориентируют на себя наземные грозовые разряды, что повышает при прочих равных условиях число повреждений кабеля, проложенного на открытой местности.

Стойкость оптических кабелей к ударам молнии (молниестойкость) определяется допустимым током молнии в металлической оболочке (бронепокрове) ВОК, при котором не возникает повреждения кабеля с перерывом связи.

Различают следующие виды опасных воздействий разрядов молнии на ВОК: *грозовые перенапряжения, электродинамические и термические воздействия*. Кабели одновременно подвергаются всем видам воздействий.

Электродинамические воздействия создают наиболее серьезные повреждения ВОК, которые возникают в результате интенсивного испарения воды во влажном грунте или гидрофобного состава, наложенного поверх бронепокрова, и резкого повышения давления при контакте с высокотемпературным каналом молнии в месте входа тока молнии в кабель. Наблюдаются прогибы и вмятины на бронепокрове, оболочке и сердечнике со смятием и растрескиванием трубок оптических модулей.

Термические воздействия тока молнии вызывают перегрев бронепокрова и жил дистанционного питания (ДП), по которым течет ток, вплоть до их разрушения, оплавление и прожог оболочек и лент бронепокрова, расплавление и разрушение трубок оптических модулей в результате интенсивного выделения тепла в месте контакта с каналом молнии.

Под *грозовым перенапряжением* понимается обусловленное ударом молнии повышенное напряжение в различных цепях ВОК, вызывающее пробой изоляции и прекращение действия связи [12].

При ударе молнии в землю или в дерева вблизи трассы подземного волоконно-оптического кабеля часть или весь ток молнии может попасть в металлическую оболочку кабеля. Причем разряд, возникающий между точкой удара и кабелем, перекрывает расстояние в несколько десятков метров. Влага, содержащаяся в объеме канала молнии, практически мгновенно испаряется. Фронт расширяющихся паров и газов вблизи разряда создает давление, которое сминает оболочку кабеля еще до попадания туда тока молнии. В этом случае на оболочке может не возникать ни малейших следов оплавления. Это так называемый электрогидравлический эффект, возникновение которого зависит от амплитуды импульса тока, его крутизны и влажности грунта. В случае пологой формы импульса возможно оплавление оболочки.

При дальнейшем протекании тока молнии по металлической оболочке кабеля между металлическими элементами ОК и землей возникает высокое напряжение. В результате этого происходит пробой внешнего шланга или изоляции между металлическими элементами конструкции кабеля. Во время пробоя могут пострадать расположенные рядом волокна, а через образовавшееся отверстие начнет постепенно проникать влага [13].

Данный механизм повреждения оптического кабеля с металлическими элементами мало чем отличается от типа повреждения при грозе обычного электрического кабеля с металлическими жилами.

Повреждения изоляции при распространении тока по оболочке могут происходить не только вблизи точки удара молнии, но и на значительном расстоянии от нее вдоль кабеля, особенно в местах с ослабленной изоляцией или в точках с механическими повреждениями наружного пластмассового шланга. При одном и том же ударе молнии возможны десятки повреждений изоляции волоконно-оптического кабеля на расстоянии от нескольких до сотен метров друг от друга и от точки входа тока в оболочку кабеля.

Если кабель имеет только металлическую оболочку без жил дистанционного питания, то наиболее вероятны повреждения шланга с последующим постепенным проникновением влаги внутрь конструкции. Это необязательно влечет за собой немедленный выход кабеля из строя с перерывом связи, но значительно снижает его надежность.

В реальных условиях ток молнии может попасть в оптический кабель и через элементы окружающей инфраструктуры – монтажные устройства и соединительные элементы или посторонние металлические конструкции. На практике наиболее часто дуга разряда возникает после удара молнии в высокие деревья и далее проходит по поверхности земли или корням до кабеля.

Если ВОК не имеет металла в своей конструкции и является полностью диэлектрическим, то, как правило, сам кабель даже при близком ударе молнии не повреждается.

Однако сильное электромагнитное излучение способно вносить межканальные помехи и приводить к увеличению количества ошибок. Данное явление характерно на железной дороге, где ВОЛП прокладывается вблизи опор контактной сети. Ошибки появляются в моменты переходных процессов, например, при коротком замыкании. Данное явление объясняется эффектами Керра и Фарадея.

Эффект Керра, или квадратичный электрооптический эффект, – явление изменения значения показателя преломления оптического материала пропорционально напряженности приложенного электрического поля.

Эффект Фарадея (продольный электрооптический эффект Фарадея) – магнитооптический эффект, который заключается в том, что при распространении линейно поляризованного света через оптически неактивное вещество, находящееся в магнитном поле, наблюдается вращение плоскости поляризации света.

Передаваемая по ВОК световая волна под действием внешнего электромагнитного поля молнии может испытать поворот плоскости поляризации, что приводит к увеличению поляризационной модовой дисперсии (ПМД). При небольших длинах регенерационного участка кабеля увеличение ПМД незначительно. Вместе с тем в последние годы происходит не только активное внедрение технологии волнового мультиплексирования (WDM), но и

наблюдается устойчивая тенденция повышения плотности волнового мультиплексирования вплоть до сверхплотного WDM (HDWDM), применения распределенного усиления и увеличения длины усилительных и регенерационных участков до нескольких сотен километров. В этих условиях, а также в тех случаях, когда подключенная к кабелю аппаратура чувствительна к поляризации волны, ПМД начинает играть существенную роль.

При воздействии электромагнитного поля на оптическое волокно происходит взаимодействие проходящего по волокну света с внешним полем, в результате чего изменяется плоскость поляризации световой волны, которая поворачивается на некоторый угол, зависящий от величины поля, что ведет к искажению светового импульса.

В настоящее время в связи с активным строительством ВОЛП вопросы защиты волоконно-оптических линий передачи от электромагнитных влияний становятся все более актуальными. Снизить вероятность повреждения ВОЛП от ударов молнии можно путем прокладки полностью неметаллических ОК; путем прокладки ОК повышенной молниестойкости; с помощью проложенных в земле параллельно ОК защитных проводов (тросов).

1.14 Особенности измерений волоконно-оптических линий передачи

Прибор оптический измерительный (рисунок 15) предназначен для измерения основных параметров одномодовых и многомодовых оптических волокон (ОВ): затухания в ОВ и их соединениях, длины ОВ и расстояния до мест неоднородностей в волоконно-оптических линиях передачи.

Измерение на различных длинах волн. Потери линии передачи обычно измеряют на той длине волны, на которой осуществляется передача информации. Но если в линии обнаружены избыточные потери, то измерения проводят на всех доступных прибору длинах волн (обычно двух). На рефлектограмме, снятой на более длинной из двух волн, общие потери будут меньше, чем на рефлектограмме, снятой на более короткой волне, поскольку у нее меньше потери на рассеяние. Это выглядит как более пологий наклон рефлектограммы (рисунок 16) (более низкие километрические потери). Однако на более длинной волне наблюдается тенденция к большим потерям световой энергии на изгибах волокна. Измерения на двух длинах волн позволяют выявить наличие сильных изгибов волокон – одного из основных механизмов, приводящих к появлению потерь.



Рисунок 15 – Внешний вид прибора

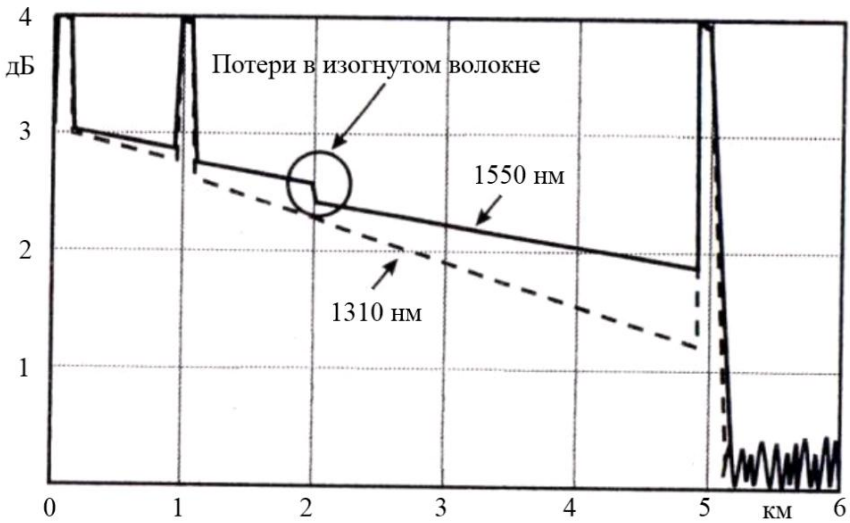


Рисунок 16 – Предполагаемый вид рефлектограмм, измеренных на длинах волн 1310 нм и 1550 нм

Потери, вносимые при изгибе волокна, значительно сильнее зависят от длины волны, чем потери, вызванные другими механизмами, такими как рэлеевское рассеяние, смещение сердцевин волокон, флуктуации модового пятна и т. д. Если не допускать сильных изгибов волокна, вносимые потери будут пренебрежимо малы. Однако на практике не всегда удается избежать появления сильных изгибов волокна. Они могут возникнуть из-за нарушений технологии при изготовлении оптических кабелей и при их установке в линию передачи. Часто такие изгибы возникают при укладке сварных соединений волокон в муфты и оптических шнуров в распределительные шкафы, на изгибах кабеля на трассе. Сравнивая две рефлектограммы, сделанные на этих двух длинах волн, можно легко определить, возникло ли в волокне напряжение из-за изгибов (см. рисунок 16).

На рефлектограммах видны всплески сигналов отражения от места соединения оптического разъема рефлектометра с согласующим кабелем (длиной 1 км), от места соединения согласующего кабеля с исследуемым волокном и от торца волокна. Наклон рефлектограммы, измеренной на длине волны 1310 нм, больше, чем на длине волны 1550 нм, как и должно быть, так как минимальными километрическими потерями волокно обладает на длине волны 1550 нм. В современных оптических волокнах километрические потери составляют до 0,22 дБ/км на длине волны 1550 нм и до 0,35 дБ/км на длине волны 1310 нм. На рисунке 17 приведен результат реальных измерений, проведенных на длинах волн 1310 нм и 1550 нм.

На рефлектограмме (см. рисунок 17) затухание в неразъемном соединении (муфте) на длине волны 1550 нм – около 0,340 дБ, а на длине волны 1310 нм – около 0,142 дБ, что говорит о значительном изгибе волокна.

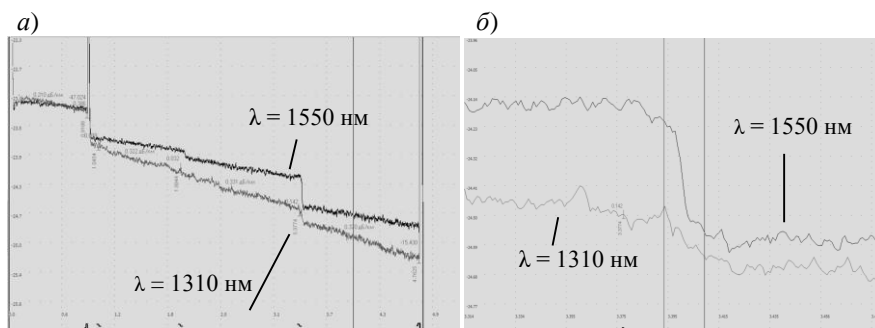


Рисунок 17 – Измерение на двух длинах волн:

а – рефлектограмма всей линии; *б* – участок, содержащий неразъемное соединение

Выявить наличие сильно изогнутого участка волокна важно из чисто практических соображений. Так, например, если будет выявлено, что избыточные потери возникли из-за изгиба волокон, то не надо будет переделывать места

соединений волокон, что требует определенных временных и финансовых затрат. В этом случае достаточно более аккуратно уложить волокна в муфту (или оптические шнуры в распределительном шкафу), что сделать значительно проще.

Измерение оптических волокон импульсами различной длительности. Длительность импульсов определяет величину сигнала обратного рэлеевского рассеяния света в волокне и ширину мертвой зоны в начале рефлектограммы. При большой длительности импульса (1 мкс) сигнал обратного рэлеевского рассеяния заметно превосходит уровень шумов в конце рефлектограммы, но при этом мертвая зона делает недоступным для измерения большой участок в начале волокна. При уменьшении длительности импульса ширина мертвой зоны также уменьшается, но при этом уровень сигнала обратного рэлеевского рассеяния также уменьшается и вклад шумов может уже стать заметным. Увеличение длительности импульсов позволяет увеличить динамический диапазон, поэтому измерение импульсами большой длительности используется при измерении линий большой протяженности, а малой – при необходимости идентификации близко расположенных неоднородностей. На рисунке 18 приведены рефлектограммы, полученные при измерениях на длительностях импульсов 10 нс, 30 нс, 90 нс, 3000 нс. Измерения волны 1550 нм, количество усреднений – 4096×4 .

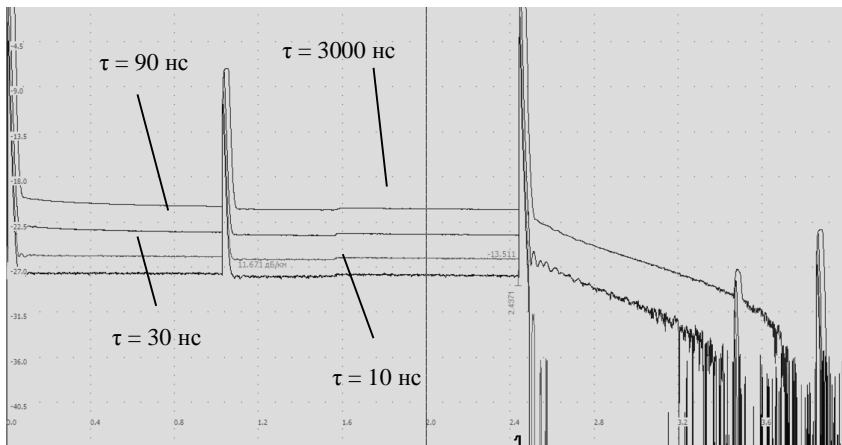


Рисунок 18 – Измерение импульсами различной длительности

Измерение с различным количеством усреднений. Для улучшения отношения сигнал/шум используется многократное усреднение результатов измерений. Причем для их эффективного усреднения достаточно нескольких секунд, так как время, затрачиваемое на прохождении линии, мало. Типичная рефлектограмма содержит множество измеряемых точек и при вычислении каждой

такой точки усредняется несколько тысяч импульсов. Весь этот массив данных рефлектометр обрабатывает за долю секунды. Первая измеренная рефлектограмма сразу выводится на дисплей. Далее на дисплей выводятся усредненные рефлектограммы. При каждом удвоении времени измерений происходит уменьшение шумов в усредненной рефлектограмме. Увеличение числа усреднений немного повышает динамический диапазон.

На рисунке 19, *а* приведен участок рефлектограмм, полученных при измерении с усреднением $N_{av} = 1$ (1×4096) и $N_{av} = 32$ (32×4096) при длительности импульса 10 нс. Как видно из рефлектограммы, при числе усреднения 1×4096 рефлектограмма выглядит очень зашумленной, соответственно при увеличении протяженности линии влияние шумов будет еще больше увеличиваться.

Однако при увеличении числа усреднений пропорционально увеличивается время измерений, что при проведении аварийно-восстановительных работ, когда на проведение каждой операции установлены жесткие нормативы, является недопустимым. Решением данной проблемы является увеличение длительности импульса. На рисунке 19, *б* приведен участок рефлектограмм, полученных при измерении с усреднением $N_{av} = 1$ (1×4096) и $N_{av} = 32$ рисунком рефлектограммы выглядят гораздо более плавными при том же масштабе и практически неотличимы.

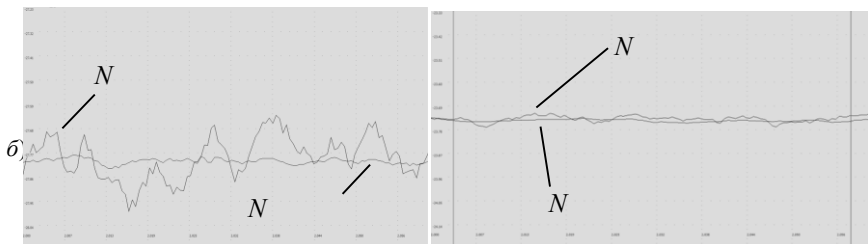


Рисунок 19 – Измерение с различным числом усреднений:
а – длительность импульса 10 нс; *б* – длительность импульса 90 нс

Исходя из вышеуказанного, при выборе параметров измерения необходимо искать определенный компромисс между временем и качеством проводимых измерений. Данный компромисс достигается в основном за счет выбора соответствующей длительности импульса и числа усреднений. Обычно измерения целесообразно проводить с числом усреднений от 4 до 8 на длительности импульса 30–90 нс для линий протяженностью до 20 км, 300–тяженностью свыше 50 км.

1.15 Корреляционный анализ рефлектограмм оптических волокон

Корреляционный анализ позволяет оценить степень взаимосвязи полученных рефлектограмм и их привязку к общим причинам возникновения неоднородностей в оптических волокнах кабеля. Автоматизированный метод обнаружения общих неоднородностей методом суммирования рефлектограмм, основанный на корреляционном анализе, позволяет спрогнозировать места возможных повреждений в процессе дальнейшей эксплуатации ВОК.

Коэффициент корреляции характеризует степень зависимости между двумя величинами. Нулевое значение данной характеристики указывает на отсутствие линейной зависимости между исследуемыми величинами. Равенство абсолютного значения коэффициента корреляции единице указывает на наличие функциональной зависимости между величинами.

Оценки коэффициентов корреляции являются случайными величинами, т. к. для различных выборок одной и той же пары величин оценки могут принимать различные значения. Для малых выборок эти различия будут особенно существенными, и при значениях коэффициентов корреляции, близких к нулю, могут приводить к большим относительным погрешностям оценок и, следовательно, неверным статистическим выводам. Поэтому в ответственных исследованиях следует проверять значимость отличия оценки коэффициента корреляции от нуля.

Проверка значимости позволяет сделать вывод либо о существенности описания зависимости уравнением регрессии, либо о том, что данное уравнение практически никак не определяет существующую зависимость между случайными величинами, а ненулевое значение оценки коэффициента корреляции обусловлено лишь случайностью выборки. Чтобы сделать статистический вывод о значимости оценки коэффициента корреляции (при проверке линейности регрессионной зависимости) выдвигается нулевая гипотеза об отсутствии линейной зависимости между исследуемыми величинами. Вывод о проверке гипотезы формируется также на основании значения P -value – максимального уровня значимости, при котором проверяемая гипотеза еще согласуется с результатами испытаний. Если P -value $< 0,05$, то проверяемая гипотеза согласуется с экспериментальными данными, и оснований для ее отклонения нет. В противном случае проверяемая гипотеза отклоняется.

Автоматизированный метод анализа заключается в конвертировании графического представления рефлектограмм в цифровые данные. В результате оцифровки рефлектограмма представляется в виде выборок значений расстояний линии и соответствующим этим расстояниям затуханий. Для этих целей используется программа FiberizerDesktop компании Optixsoft.

Точность данного метода основана на возможности получения большого количества значений затуханий по всей длине измеряемого кабеля, что расширяет возможность выполнять исследования оптических линий передачи по различным направлениям: провести корреляционный и регрессионный анализы волокон кабеля с наибольшей точностью, выявить неоднородности в кабеле при помощи метода суммирования рефлектограмм и т. д.

Корреляционный анализ рефлектограмм ВОЛП Белорусской железной дороги в двух эксплуатируемых кабелях марки ОКСТ-10-0.2-0.25-8 показал, что для длинной линии (таблица 1) и имеющей больший срок эксплуатации (таблица 2) коэффициент корреляции выше, чем у коротких линий и с меньшим сроком эксплуатации (рисунок 20, 21).

Исследования параметров волоконно-оптических линий передачи, а также их анализ производили студенты электротехнического факультета БелГУТа В. В. Евдочков, Н. Ю. Столярова, А. С. Круглик, В. В. Эстрин.

Таблица 1 – Результаты корреляционного анализа

Исследуемые волокна	Оценка коэффициента корреляции	
	Для короткой линии (6,51 км)	Для длинной линии (17,95 км)
ОВ № 1 и ОВ № 4	0,441	0,817
ОВ № 4 и ОВ № 8	0,517	0,816

Таблица 2 – Результаты корреляционного анализа

Пара волокон	Оценка коэффициента корреляции для линии со сроком эксплуатации	
	5 лет	11 лет
1	0,441	0,509
2	0,517	0,663

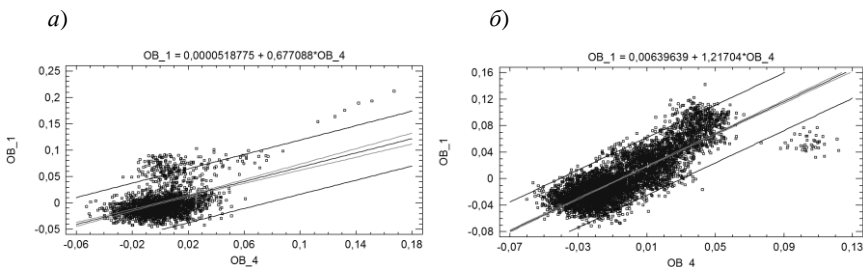


Рисунок 20 – Зависимость отклонений рефлектограмм от уравнений регрессии для ОВ № 1 и ОВ № 4:

а – для короткой линии; *б* – для длинной линии

Суммирование рефлектограмм ВОК (см. рисунок 21) позволяет выявить проблемные места и спрогнозировать в будущем места возможных повреждений.

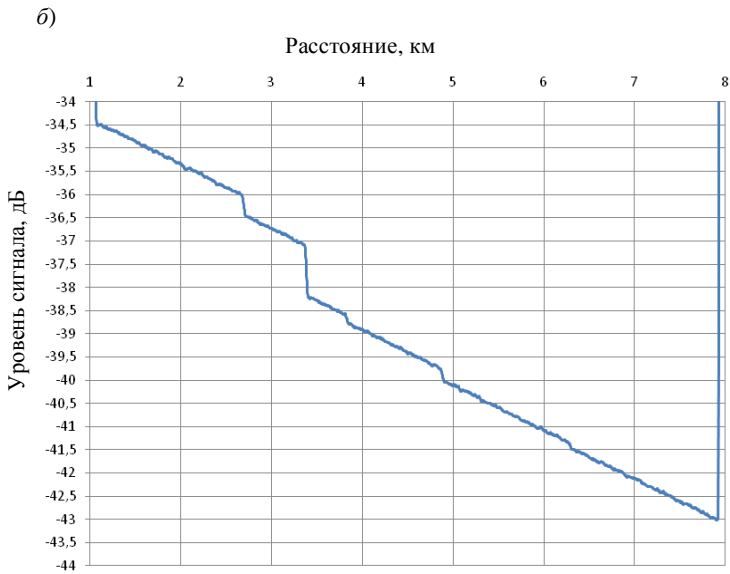
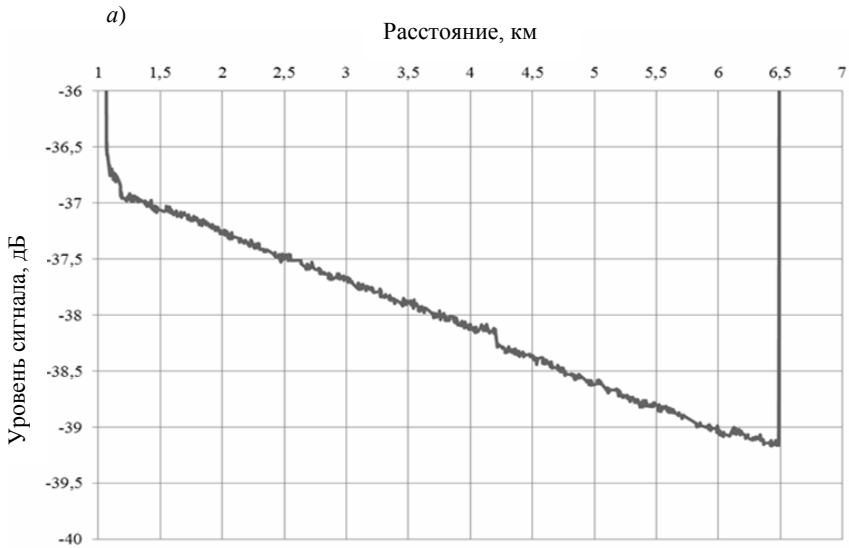


Рисунок 21 – Общая рефлектограмма исследуемых волокон для линии со сроком эксплуатации:
a – 5 лет; *б* – 11 лет

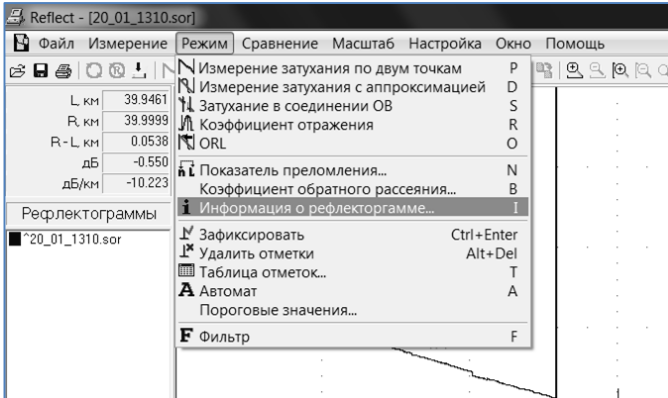
2 ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

Лабораторная работа № 1

1 Чтобы быть допущенным к выполнению лабораторной работы, студент должен изучить сведения из теории.

2 По заданному преподавателем варианту выбрать рефлектограмму для измерения их параметров. Определить параметры измерения (рисунок 22).

а)



б)

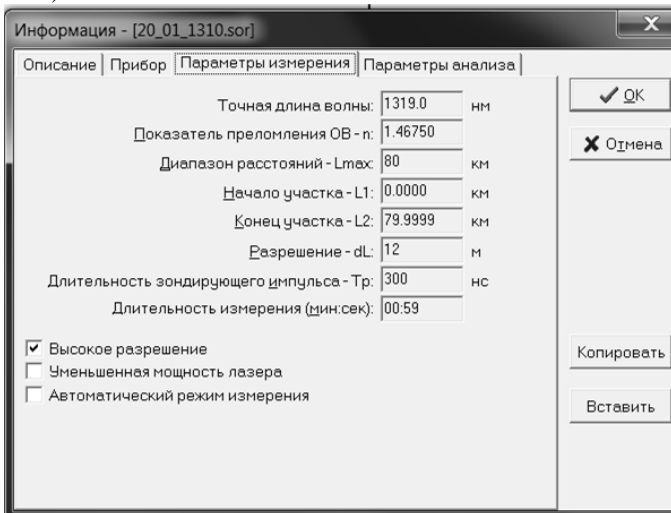


Рисунок 22 – Информация о рефлектограмме:

а – расположение пункта меню; б – окно с параметрами измерения

3 Произвести измерение оптической длины строительных длин кабеля (без учета искусственной линии). При этом маркеры устанавливаются согласно рисунку 23, а, б.

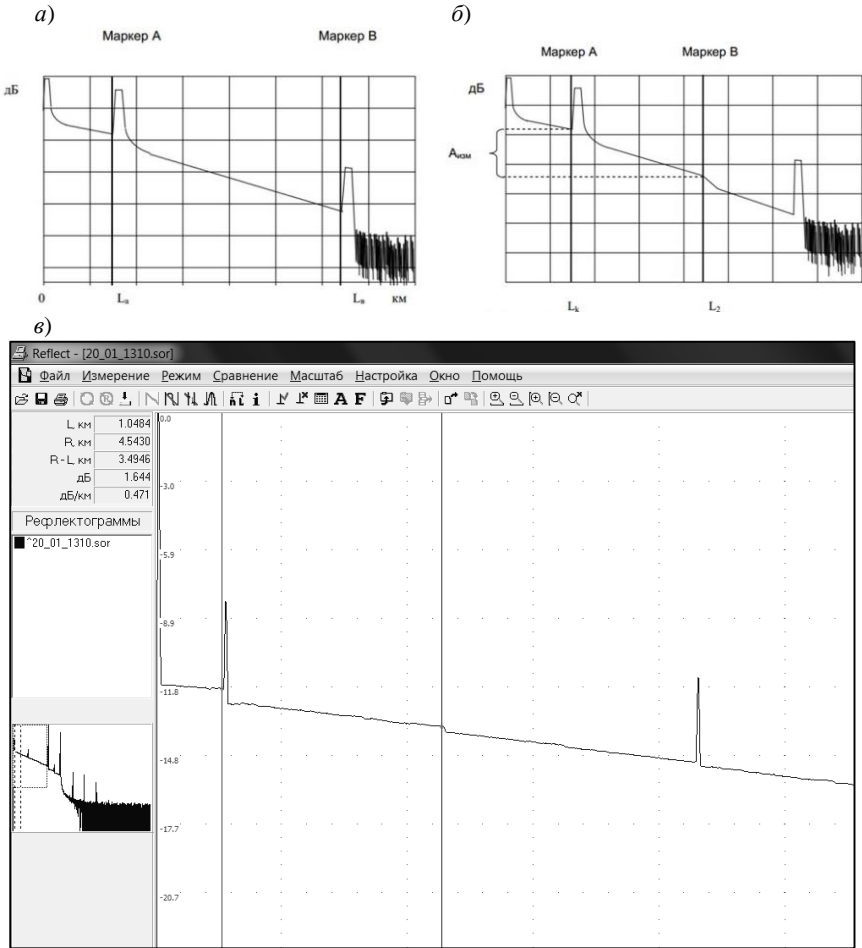
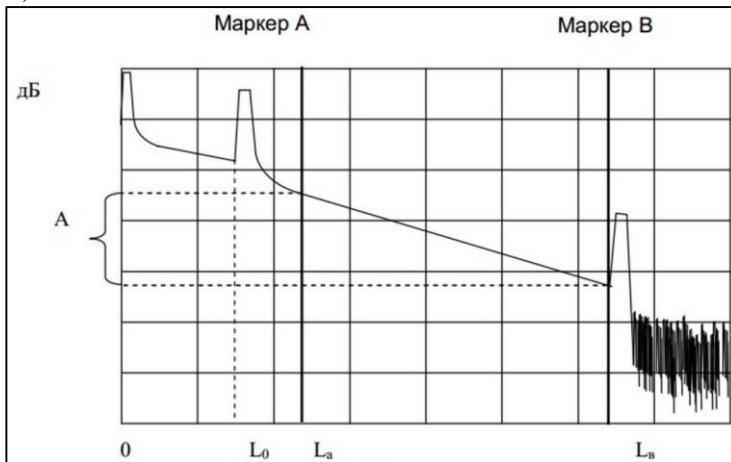


Рисунок 23 – Измерение оптической длины строительной длины кабеля:

а – между разъёмными соединениями; б – между разъёмным и неразъёмным соединениями; в – пример измерения оптической длины строительной длины кабеля

4 Произвести измерение коэффициента затухания строительных длин кабеля. При этом маркер А устанавливается за мертвой зоной на прямом участке после отраженного импульса на вводе кабеля, но не ближе 300 м от начала линии (см. рисунок 24).

а)



б)

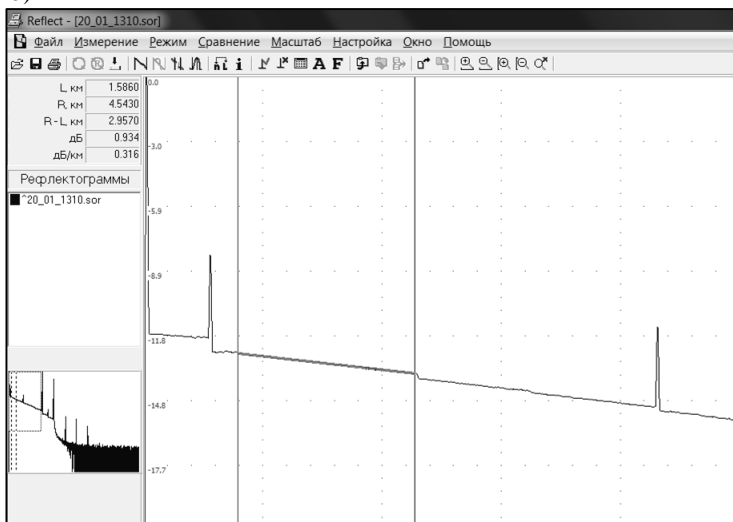


Рисунок 24 – Измерение коэффициента затухания строительных длин кабеля:
а – правила установки маркеров, б – пример измерения коэффициента затухания

5 Провести измерение затухания неразъемных и разъемных соединений способом пяти точек. Согласно этому способу расставляются пять маркеров: два (1 и 2) – на монотонно падающем участке характеристики одной строительной длины, два маркера (4 и 5) – на монотонно падающем участке другой строительной длины и один маркер (3) в месте стыка (см. рисунок 25).

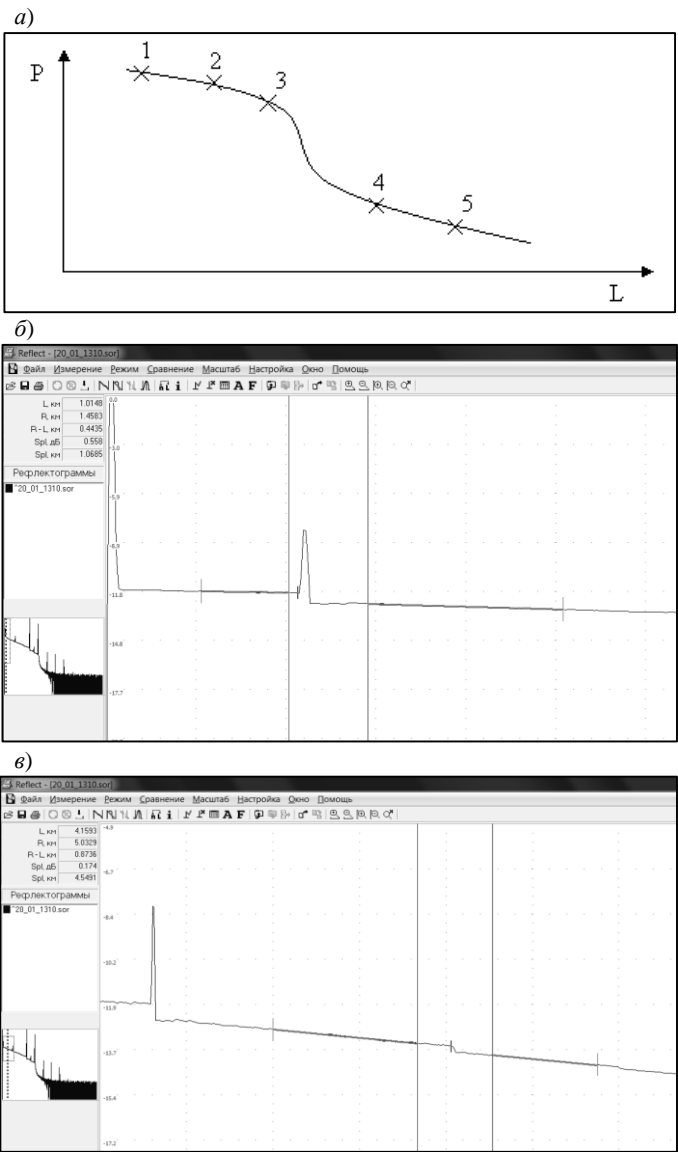


Рисунок 25 – Измерение затухания неразъемных и разъемных соединений:
 а – правила установки маркеров; б – пример измерения затухания разъемного соединения;
 в – пример измерения затухания неразъемного соединения

При этом расстояние между маркерами 2 и 4 должно быть не менее ($L_{iHC} - L_i$), м, вычисляемого по формуле:

$$L_{iHC} - L_i = \frac{3 \cdot 10^8}{K_{пр}} t_{и},$$

где: $t_{и}$ – длительность импульса, с;
 $K_{пр}$ – коэффициент преломления.

Некоторые приблизительные длины приведены в таблице 3 (для коэффициента преломления 1,5).

Таблица 3 – Зависимость расстояния между маркерами от длительности импульса

Длительность импульса	Расстояние $L_b - L_a$, м
10 нс	2
30 нс	6
100 нс	20
300 нс	60
1 мкс	200
3 мкс	600

6 Заполнить протокол измерений по примеру (рисунок 26).

Длина 15 385 м
 Дата измерений: 22.06.2009 Длина волны: 1,550 мкм К пр: 1,46820

Нормы

№	a1	A1	@1	a2	A2	@2	a3	A3	@3	a4	A4	@5	a5	A5	@6	a6	A6	Вывод
ОВ	дБ/км	дБ	дБ	дБ/км	дБ	дБ	дБ/км	дБ	дБ	дБ/км	дБ	дБ	дБ/км	дБ	дБ	дБ/км	дБ	соотв

где: а – километрическое затухание; А – затухание ОВ строительных длин; @ – затухание на стыке

Рисунок 26 – Протокол измерений

7 Выводы по работе.

Содержание отчета

- 1 Рефлектограмма по варианту.
- 3 Параметры измерения.
- 2 Протокол измерений.
- 3 Выводы по результатам исследований.
- 4 Ответы на контрольные вопросы.

Лабораторная работа № 2

1 Чтобы быть допущенным к выполнению лабораторной работы, студент должен изучить сведения из теории.

2 Произвести расчет затухания элементарного кабельного участка (из лабораторной работы № 1) и затухания ЭКУ, приведенное к длине 1 км, дБ/км. Значения не должны быть больше величин, вычисляемых по формулам:

$$A_{\text{ЭКУ}} \leq \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i l_i + mA_{\text{нс}} + kA_{\text{рс}}}{L};$$

$$A_{\text{ЭКУ}} \leq \sum_{i=1}^n \alpha_i l_i + mA_{\text{нс}} + kA_{\text{рс}},$$

где α_i – коэффициент затухания оптического волокна на i -й строительной длине, указанной в паспорте на кабель;

l_i – протяженность i -й строительной длины, км;

n – количество строительных длин;

m – количество неразъемных соединений (сварок) оптического волокна ЭКУ;

$A_{\text{рс}}$ – затухание на разъемном соединителе (оптическая розетка), принимается равным 0,5 дБ;

k – количество разъемных соединителей;

L – длина ЭКУ, км;

$A_{\text{нс}}$ – затухание на неразъемном соединителе, принимается равным: для магистральных и внутризональных сетей на длине волны 1,3 мкм $A_{\text{нс}} = 0,2$ дБ, на длине волны 1,55 $A_{\text{нс}} = 0,1$ дБ; для местных сетей на длине волны 1,3 мкм $A_{\text{нс}} = 0,3$ дБ, на длине волны 1,55 $A_{\text{нс}} = 0,2$ дБ.

3 Произвести сравнение рефлектограмм, полученных на разных длинах волн (рисунок 27). Определить динамические диапазоны рефлектограмм.

4 Выполнить корреляционный анализ рефлектограмм оптических волокон по заданию преподавателя.

Пересохранить рефлектограммы в формат CSV (рисунок 28).

Скопировать колонки с данными в Statgraphics (рисунок 29).

Произвести регрессионный анализ данных (рисунки 30, 31).

5 Определить возможные места повреждений в ВОК путем суммирования рефлектограмм.

Из полученных у преподавателя рефлектограмм получить массив с их суммарным значением (рисунок 32).

Построить график по полученным данным (рисунки 33, 34).

6 Выводы по работе.

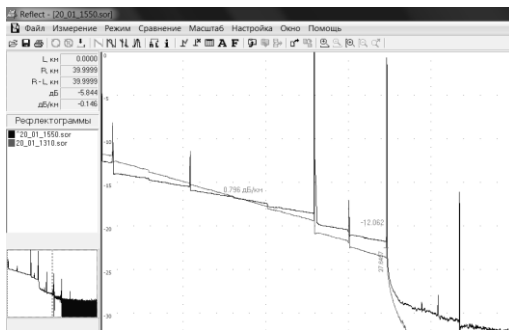
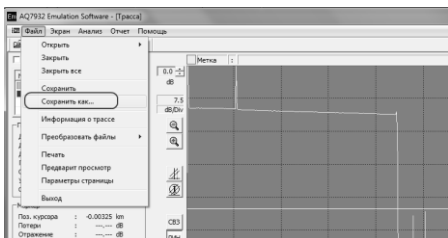


Рисунок 27 – Рефлектограммы, полученные на разных длинах волн

а)



б)

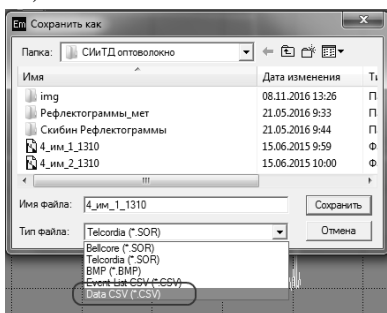
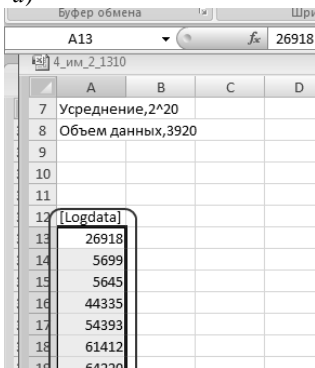


Рисунок 28 – Сохранение рефлектограммы в формат CSV:
а – расположение пункта меню; б – выбор формата сохранения CSV

а)



б)

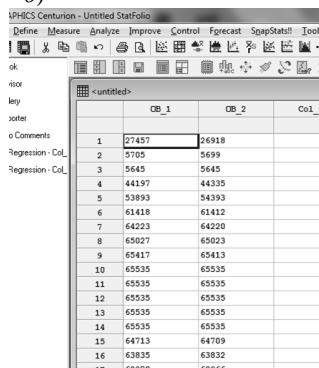


Рисунок 29 – Копирование колонок с данными в Statgraphics:
а – выбор колонки данных из файла формата CSV; б – добавление данных в Statgraphics

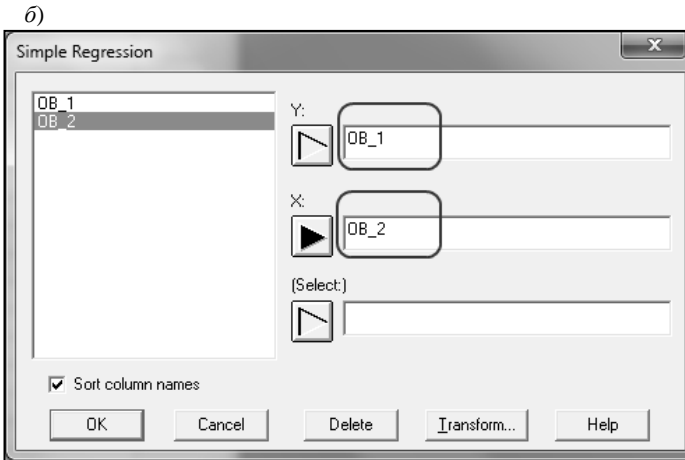
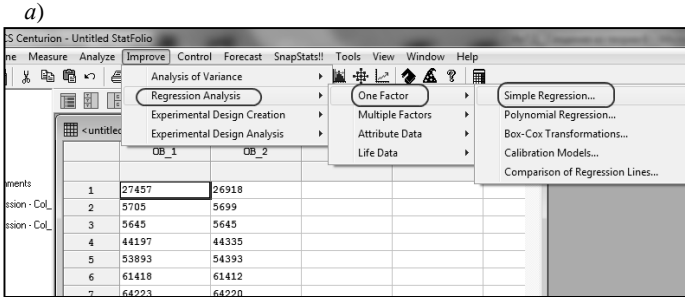


Рисунок 30 – Выбор данных для регрессионного анализа данных:
 а – расположение пункта меню; б – выбор колонок с данными

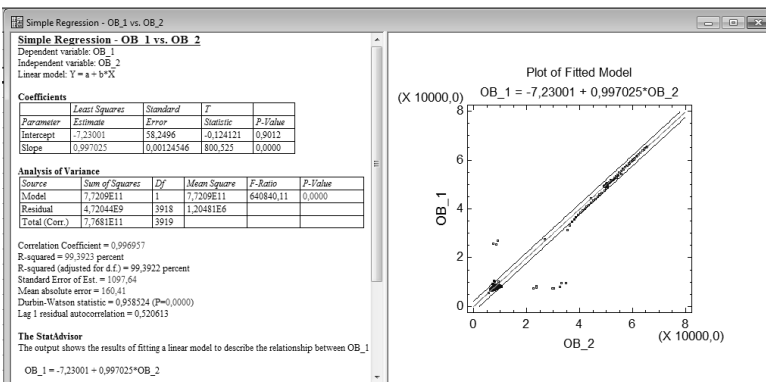


Рисунок 31 – Регрессионный анализ данных

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
10									
11									
12	[Logdata]								
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	39101	38990	38873	38890	38853	38780	38819	38889	311195
15	39201	39096	38971	38992	38958	38881	38920	38995	312014
16	39353	39249	39126	39148	39113	39031	39073	39145	313238
17	39512	39405	39281	39304	39270	39184	39224	39300	314480

Рисунок 32 – Получение массива с суммарным значением рефлектограмм

Рисунок 33 – Построение графика

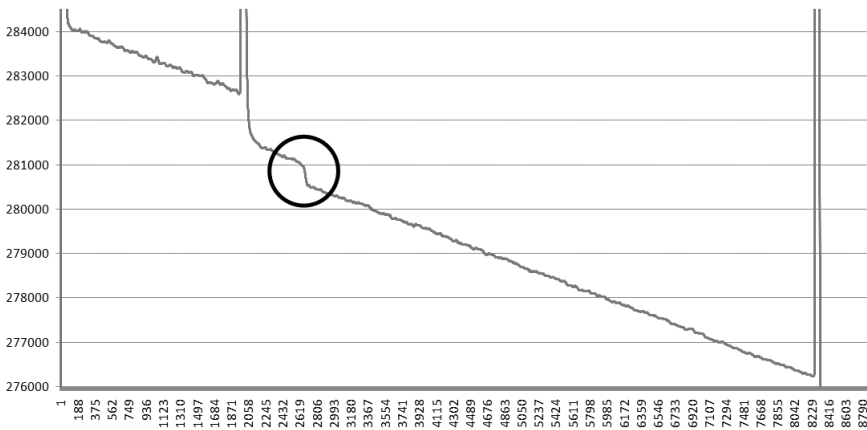


Рисунок 34 – График суммарной рефлектограммы

Содержание отчета

- 1 Рефлектограммы по варианту.
- 2 Результаты расчета.
- 3 Результаты сравнения рефлектограмм.
- 4 Результат корреляционного анализа.
- 5 Результат суммирования рефлектограмм.
- 6 Выводы по результатам исследований.
- 7 Ответы на контрольные вопросы.

Контрольные вопросы

- 1 Преимущества волоконно-оптических линий передачи.
- 2 Недостатки волоконно-оптических линий передачи.
- 3 Виды потерь в оптическом волокне.
- 4 Окна прозрачности в оптическом волокне.
- 5 Собственные потери в оптическом волокне.
- 6 Кабельные потери в оптическом волокне.
- 7 Что такое дисперсия световых импульсов?
- 8 Какие виды тестирования оптического волокна выполняются при измерениях?
- 9 Что такое рэлеевское рассеяние?
- 10 Что такое рэлеевские центры?
- 11 Принцип работы оптического рефлектометра, его достоинства.
- 12 Что такое френелевское отражение?
- 13 Параметры волоконно-оптического кабеля, измеряемого рефлектометром.
- 14 Что такое коэффициент обратного рассеяния?
- 15 Что такое скрытое событие на рефлектограмме?
- 16 Что такое динамический диапазон оптического рефлектометра?
- 17 Методы расчета динамического диапазона.
- 18 Что такое мертвая зона рефлектограммы?
- 19 Что такое разрешающая способность оптического рефлектометра?
- 20 Назначение системы синхронизации в оптическом рефлектометре.
- 21 Что такое показатель преломления волокна?
- 22 Что такое диапазон измеряемых расстояний?
- 23 Что такое зашумление рефлектограммы?
- 24 Что такое метод усреднения при измерениях?
- 25 Влияние длительности лазерных импульсов на точность измерений.
- 26 Что такое оптическое расстояние волокна?
- 27 Точечные потери в волоконно-оптическом кабеле.
- 28 Методы расчета точечных потерь в ВОК.
- 29 Причины повреждений ВОЛП.
- 30 Влияние электромагнитных полей на ВОЛП.
- 31 Различия при измерениях на различных длинах волн.
- 32 Различия при измерениях импульсами различной длительности.
- 33 Различия при измерениях с разным количеством усреднений.

Список использованных источников

- 1 **Бэйли, Д.** Волоконная оптика: теория и практика / Д. Бэйли, Э. Райт. – М. : Кулиц-Образ, 2006. – 320 с.
- 2 Введение в волоконно-оптические кабели / Технические заметки. № FOC/6.– 2003. – 85 с.
- 3 **Гринфилд, Д.** Оптические сети / Д. Гринфилд. – Киев : ООО «ТИД ДС», 2002. – 256 с.
- 4 **Гроднев, Н. Н.** Волоконно-оптические системы передачи и кабели. Справочник / Н. Н. Гроднев. – М. : Радио и связь, 2000. – 227 с.
- 5 **Иванов, Л. Б.** Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения / Л. Б. Иванов. – М. : Компания САЙРУС СИСТЕМС, 1999. – 215 с.
- 6 **Листвин, А. В.** Оптические волокна для линий связи / А. В. Листвин, В. Н. Листвин, Д. В. Швырков – М. : ЛЕСАРт, 2003. – 189 с.
- 7 **Листвин, А. В.** Рефлектометрия оптических волокон / А. В. Листвин, В. Н. Листвин. – М. : ЛЕСАРт, 2005. – 208 с.
- 8 **Наний, О. Е.** Основы цифровых волоконно-оптических систем связи / О. Е. Наний // «Lightwave – russian edition». – № 1. – 2003. – 180 с.
- 9 Оптические рефлектометры: основные характеристики и принципы работы // Технические заметки. – № ME/15. – 2003. – 57 с.
- 10 **Портнов, Э.** Оптические кабели связи. Конструкции и характеристики / Э. Портнов. – М. : Горячая линия – Телеком, 2002. – 232 с.
- 11 **Редд, Д.** Особенности измерения коэффициента ошибок / Д. Редд // «Lightwave – russian edition». – № 1. – 2005. – 126 с.
- 12 Руководство по защите оптических кабелей от ударов молнии. – М. : ЦНИИС, 1996. – 155 с.
- 13 **Соколов, С. А.** Защита магистральных оптических линий связи от электромагнитных полей / С. А. Соколов // Технологии и средства связи № 3. – 2006. – 237 с.
- 14 **Слепов, Н. Н.** Современные технологии цифровых оптоволоконных сетей связи / Н. Н. Слепов. – М. : Радио и связь, 2000. – 468 с.
- 15 ТКП 212–2010 (02140) Правила проведения измерений магистральных, внутризоновых и местных волоконно-оптических линий передачи. – Минск : ОАО «Гипросвязь», 2010. – 62 с.
- 16 **Убайдулаев, Р. Р.** Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдулаев. – М. : Техносфера, 2003. – 237 с.
- 17 **Фомичев, В. Н.** Анализ причин повреждения волоконно-оптических линий связи / В. Н. Фомичев, В. В. Евдочков // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2012. – № 2 (25). – 77 с.
- 18 **Фомичев, В. Н.** Метод обнаружения мест возможных повреждений в волоконно-оптическом кабеле / В. Н. Фомичев, В. В. Евдочков // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2010. – № 2 (21). – 138 с.
- 19 **Фомичев, В. Н.** Автоматизированный метод обнаружения неоднородностей в волоконно-оптическом кабеле методом суммирования рефлектограмм / В. Н. Фомичев, В. В. Евдочков, Н. Ю. Столярова // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2013. – № 2 (27). – 88 с.

20 **Фомичев, В. Н.** Сравнительный анализ рефлектограмм оптических волокон автоматизированным методом по различным показателям / В. Н. Фомичев, А. С. Круглик, Н. Ю. Столярова // Вестник Белорусского государственного университета транспорта: Наука и транспорт. – 2013. – № 2 (27). – 92 с.

21 **Фриман, Р.** Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М. : Техносфера, 2007. – 512 с.

22 **Шевченко, Д. Н.** Теория вероятностей и математическая статистика: учебно-метод. пособие для студентов электротехнических специальностей / Д. Н. Шевченко. – Гомель : БелГУТ, 2006. – 318 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Исследование волоконно-оптических линий передачи	3
1.1 Сведения из теории	3
1.2 Затухание оптического волокна	6
1.3 Кабельные потери	9
1.4 Измерение параметров волоконно-оптических линий передачи	12
1.5 Измерение ВОЛП с помощью оптических рефлектометров	16
1.6 Конструкция оптического рефлектометра	17
1.7 Принцип работы оптического рефлектометра	19
1.8 Типы событий на рефлектограммах	22
1.9 Основные характеристики оптического рефлектометра	25
1.10 Параметры измерений оптических волокон	30
1.11 Расшифровка и анализ рефлектограммы оптического волокна	32
1.12 Причины повреждений волоконно-оптических линий передачи	37
1.13 Воздействие электромагнитных полей на подземные волоконно-оптические кабели	39
1.14 Особенности измерений волоконно-оптических линий передачи	42
1.15 Корреляционный анализ рефлектограмм оптических волокон	47
2 Практические занятия	500
2.1 Лабораторная работа № 1	50
2.2 Лабораторная работа № 2	555
Контрольные вопросы	59
Список использованных источников	600

Учебное издание

ФОМИЧЕВ Владимир Николаевич
ЖИГАЛИН Игорь Олегович

Специальные измерения и техническая диагностика

Лабораторный практикум

Часть 2

Редактор *Л. С. Репикова*
Технический редактор *В. Н. Кучерова*
Корректор *Т. А. Пугач*

Подписано в печать 04.09.2017 г. Формат 60x84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать на ризографе.
Усл. печ. л. 3,72. Уч.-изд. л. 3,72. Тираж 100 экз.
Зак № . Изд. № 135

Издатель и полиграфическое исполнение:
Белорусский государственный университет транспорта.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/361 от 13.06.2014
№ 2/104 от 01.04.2014
Ул. Кирова, 34, 246653, Гомель