

## ИЗМЕРЕНИЯ НА ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ ПЕРЕДАЧИ

### Постановка задачи

Современные технологии высокоскоростной передачи, такие как SDH и ATM, основаны в первую очередь на использовании оптоволоконных сред [1, 2, 3, 4], которые в настоящее время обеспечивают максимально возможную пропускную способность. Именно поэтому технология оптоволоконных сред передачи в настоящее время бурно развивается во всем мире и в том числе в нашей стране. Предполагается, что в ближайшем будущем оптоволоконные среды передачи полностью вытеснят электрические кабельные среды. Последние будут использоваться только на абонентских участках, хотя в ряде развитых стран уже сейчас коммунальное строительство учитывает прокладку оптоволоконных кабелей до пользователя.

Таким образом, технология оптоволоконных сред передачи является новой, быстро развивающейся и наиболее перспективной, и измерения в этой области являются чрезвычайно важными.

### Измерение параметров волоконно-оптической системы передачи

Рассмотрим типовую схему волоконно-оптической системы передачи (ВОСП), представленную на рис. 1.



Рис. 1

В состав ВОСП входят: оптический передатчик или генератор сигнала, интерфейс оптического генератора, оптическое волокно или кабель с характерными местами сопряжения различных кабелей и сварок и неоднородностями, промежуточные станции или ретрансляторы и оптический приемник сигнала. В ВОСП входят также система передачи, принимающая электрический сигнал и аппаратура сопряжения, которая обеспечивает преобразование электрического сигнала в оптический. Наиболее существенными для измерений в ВОСП являются параметры оптического волокна, точки соединения с аппаратурой передачи/приема и регенерации, места сопряжения различных кабелей и сварочные соединения, а также возможные неоднородности в кабелях, которые обычно служат основной причиной деградации качества связи.

В анализе оптоволоконных кабелей и узлов существенно различаются две категории задач: промышленный и эксплуатационный анализ [5].

Промышленный анализ включает в себя измерения узлов и параметров кабелей перед укладкой. Задачи измерений этого класса возникают при разработке нового оборудования, в процессе производства оптических кабелей и при подготовке кабелей к укладке для определения соответствия характеристик кабеля заданным нормам (анализ кабелей в бухтах). Параметры и характеристики оптических кабелей и аппаратуры линейного тракта, поставляемых предприятиями-изготовителями, измеряют в производственных условиях и оформляют в виде паспортных данных, которые должны соответствовать действующим нормам.

Спецификация промышленного анализа кабелей включает измерения следующих параметров: погонного затухания в оптическом волокне; полосы пропускания и дисперсии; длины волны отсечки; профиля показателя преломления; числовой апертуры; диаметра модового поля; геометрических и механических характеристик оптоволоконного кабеля; энергетического потенциала и чувствительности фотоприемного устройства; уровней оптической мощности устройств.

Учитывая требования высокой точности и автоматизации этого класса измерений, они выполняются системным измерительным оборудованием.

Эксплуатационный анализ оптических кабелей и узлов включает измерения в процессе прокладки кабеля и измерения на этапе эксплуатации. При прокладке кабелей необходимы пошаговые измерения участков кабелей, характеристик участков сварок и сопряжения кабельных сетей, а также окончательные измерения развернутой кабельной сети на этапе приемосдаточных испытаний и паспортизации кабельного хозяйства и ВОСП. При этом измеряют затухание, вносимое срезками кабелей, затухание оптических волокон, а также уровни мощности оптического излучения на выходах передающих и входах приемных оптоэлектронных модулей.

Измерения затухания оптических волокон выполняют в обоих направлениях передачи участков регенерации, что позволяет учесть различия значений измеряемых величин, обусловленные неоднородностями, и выбрать оптимальный вариант использования волокон кабеля [4, 5]. Кроме того, определяют функцию распределения неоднородностей по длине участка регенерации. Данные по распределению неоднородностей оформляют в виде графика и заносят в соответствующий паспорт. Паспорт участка регенерации должен иметь схему соединения волокон в каждой соединительной муфте, где производилось их группирование; измеренные значения уровней оптической мощности на оптических входах и выходах блоков линейных регенераторов, коэффициентов ошибок, а также затухания в обоих направлениях передачи.

Эксплуатационные измерения делятся на профилактические, аварийные и контрольные. Аварийные измерения включают в себя быструю локализацию точек деградации качества кабельной сети. Например, в случае обрыва кабеля необходимо с высокой степенью точности и оперативности локализовать точку обрыва, произвести расконсервацию кабеля, заменить поврежденный участок, произвести сварку и затем полностью измерить характеристики полученного сварочного стыка и восстановленного кабеля. Задачи профилактических и контрольных измерений могут выполняться с помощью специально встроенных в аппаратуру линейного тракта контрольно-измерительных устройств.

Спецификация эксплуатационных измерений кабелей включает в себя:

- измерение уровней оптической мощности,
- измерение переходного затухания,
- определение места и характера повреждения оптоволоконного кабеля,
- стрессовое тестирование аппаратуры ВОСП.

Задачи эксплуатационного анализа выполняются эксплуатационным измерительным оборудованием.

### **Эксплуатационные измерения на ВОСП**

Эксплуатационные измерения включают в себя: измерение уровней оптической мощности, измерение затухания, измерение возвратных потерь, определение места и характера повреждения оптоволоконного кабеля, стрессовое тестирование аппаратуры ВОСП.

Измерения уровней оптической мощности и измерения затухания являются взаимосвязанными. Применительно к оптическим системам передачи решение этой простой задачи имеет определенные трудности, поскольку измерение уровня сигнала в ВОСП зависит от параметров оптического интерфейса генератора тестового оптического сигнала (качества обработки торца волокна, точности юстировки излучателя относительно этого торца и др.). Кроме того, существенным является требование постоянства условий согласования источника сигнала с волокном. Все многообразие технических решений по измерению затухания в

оптическом кабеле объясняется различными способами решения этих проблем. Ниже рассмотрены несколько основных схем проведения таких измерений.

Определение места и характера повреждения оптоволоконных кабелей является существенным для проведения аварийных эксплуатационных измерений.

Стрессовое тестирование аппаратуры ВОСП применяется для определения потенциального резерва цифровых систем передачи по оптической мощности передатчика.

### Метод прямого измерения затухания, вносимого оптическим кабелем

Схема измерения затухания в оптическом кабеле представлена на рис. 2 и представляет собой типичную схему измерения «точка-точка», когда тестовый генератор и анализатор расположены по разным концам тестируемой линии [4, 5].



Рис. 2

По определению затухание в линии определяется выражением:

$$S = 10 \log \frac{P_0}{P_L} = P_0 (\text{дБм}) - P_L (\text{дБм}), \quad (1)$$

где  $P_0$  – уровень сигнала, передаваемый стабилизированным источником сигнала в дБм,  $P_L$  – уровень сигнала, измеряемый оптическим измерителем мощности (ОПМ) на конце измеряемого участка в дБм.

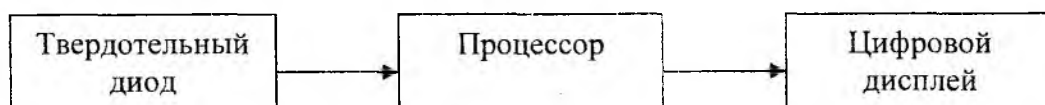


Рис. 3

Схема устройства оптического измерителя мощности представлена на рис.3.

Существует две разновидности схемы измерений: измерение затухания без разрушения кабеля и измерение с разрушением кабеля.

Измерение затухания без разрушения кабеля в точности соответствует схеме, представленной на рис. 2. Этот метод используется обычно для измерения узлов ВОСП, проведения пошагового тестирования ВОСП в точках, позволяющих подключить источник сигнала и ОПМ. Для повышения точности метода обычно используют статистическое накопление результатов или повторение измерений после разрушения нескольких сантиметров кабеля.

Статистическое накопление требует больших временных затрат. Поэтому в случае эксплуатационных измерений затухания кабеля целесообразно использовать рекурсивные процедуры [6], такие, например, как процедуры Калмана-Бьюси или Роббинса-Монро, где на  $k + 1$  шаге представляется оценка измеряемой величины в виде:

$$\hat{x}(k+1) = \hat{x}(k) + K(k) \left[ y(k+1) - H(k)\hat{x}(k) \right], \quad (2)$$

где  $y(k+1) = H(k)x(k) + \xi(k)$  – уравнение наблюдения, формирующее наблюдаемую статистику,  $K(k)$  – коэффициент, обеспечивающий сходимость процедуры (2).

На рис. 4 представлена структурная схема организации измерений с выдачей оценок измерений в систему управления (СУ) и на дисплей оператора.

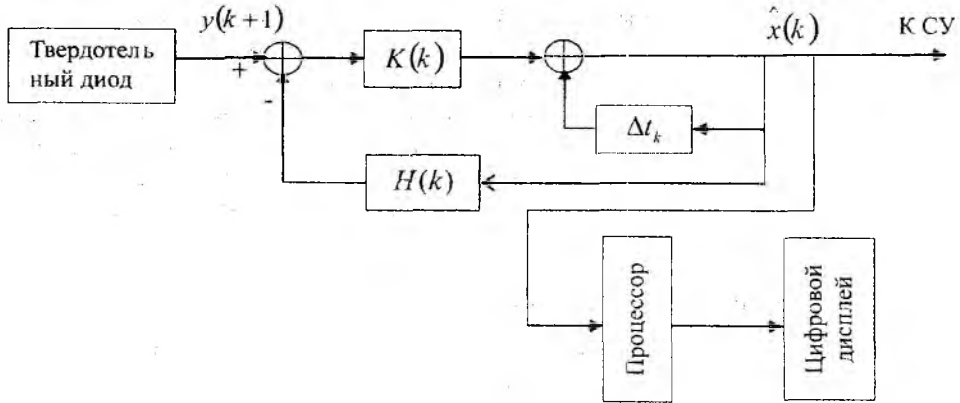


Рис. 4

### Анализ неисправностей в волоконно-оптических системах передачи

Обобщенная блок-схема проведения таких измерений представлена на рис. 5.

Первой задачей поиска неисправности в ВОСП является анализ, относится ли неисправность к электрической части оборудования или к оптической. Для этого с помощью ОРМ

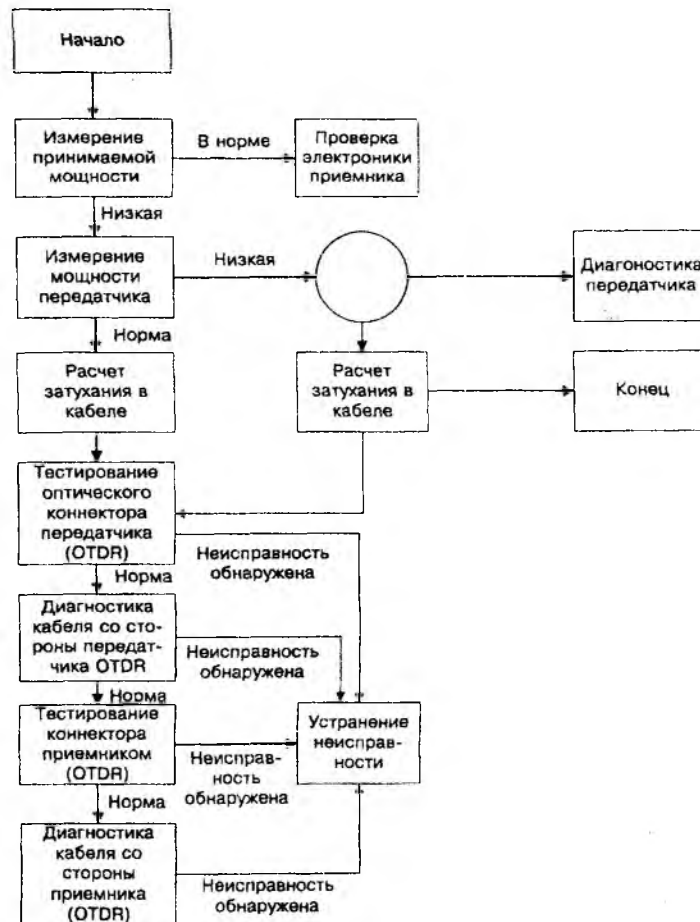


Рис. 5

измеряется уровень оптической мощности и затем производится сравнение с нормативным. Если уровень оптической мощности находится в пределах нормы, неисправность находится в электронной части аппаратуры передачи, которая нуждается в замене или ремонте. Если уровень принимаемой мощности слишком низкий, неисправность находится либо в передатчике, либо в волоконно-оптическом кабеле. Для дальнейшего поиска необходимо измерение выходной мощности передатчика, для чего используются ОРМ и тестовый кабель. Если выходная мощность передатчика низкая, он должен быть отремонтирован. Если мощность находится в пределах нормы, неисправность связана с волоконным кабелем.

Поиск неисправности в кабеле начинается с анализа его связности с использованием визуального дефектоскопа в случае кабелей малой протяженности или OTDR в случае протяженных кабелей. Основными неисправностями кабеля обычно являются коннекторы, сварки с плохим качеством, соединения и обрывы кабеля, обусловленные внешними воздействиями. Для поиска неисправности в коннекторах применяются эксплуатационные микроскопы. Для диагностики сварок и локализации обрывов применяются OTDR с учетом описанных выше ограничений на точность измерений.

### Стрессовое тестирование аппаратуры ВОСП

Проектирование волоконно-оптических систем передачи обязательно включает в себя расчет энергетического бюджета оптического сигнала в ВОСП. Реальное значение обычно отличается от расчетного в связи с различием в качестве сварочных узлов, соединений и т.д. Реальное значение энергетического бюджета оптического сигнала, полученное в ходе приемо-сдаточных испытаний, включается в паспорт ВОСП. В связи с тем, что расчетное значение, как правило, имеет запас по мощности по сравнению с реальным значением, возникает вопрос оценки потенциального запаса по мощности в ВОСП. Знание величины этого запаса может быть использовано для анализа влияния различных условий эксплуатации: например, каково предельное значение затухание заданного узла ВОСП, при котором система передачи еще будет работать.

Для анализа этого запаса по мощности применяются принципы стрессового тестирования, т.е. имитации плохих условий функционирования ВОСП. Для имитации плохого качества ВОСП используются оптические аттенюаторы. Измерения могут сопровождаться анализом цифрового канала связи по параметру ошибки (BER) в зависимости от уровня сигнала в линии. Схема такого измерения представлена на рис. 6.



Рис. 6

Согласно схеме, в линию передачи включается оптический аттенюатор, который вносит дополнительное затухание в ВОСП. При этом измеряется зависимость параметра ошибки BER от уровня вносимого затухания. Предельное значение вносимого затухания, при котором аппаратура ВОСП функционирует согласно ТУ, определяет запас по мощности в ВОСП.

### Перспективы развития измерительных технологий ВОСП

**Развитие технологии WDM.** Развитие измерительных технологий всегда идет параллельно развитию самих технологий телекоммуникаций. Оценивая будущее развитие ВОСП, нельзя не отметить общую тенденцию к переходу к системам передачи с частотным разделением в волоконно-оптических кабелях (Wavelength Division Multiplexing – WDM).

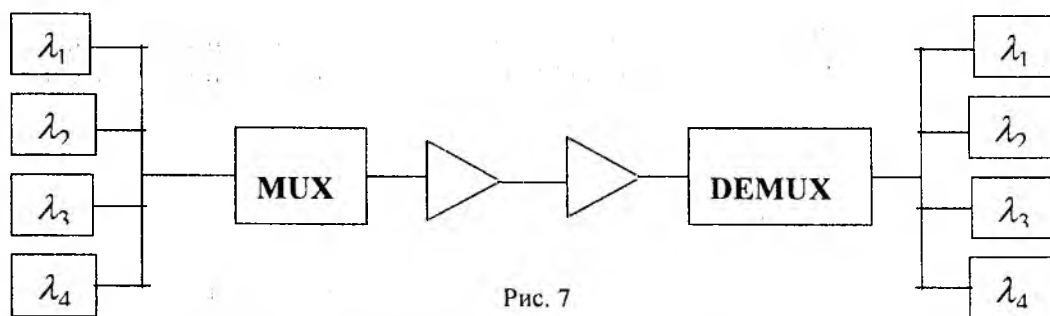


Рис. 7

Схематически такая система представлена на рис. 7. В представленной системе передачи используются четыре длины волн  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ . Модулированные сигналы четырех длин волн поступают в оптический мультиплексор (MUX), затем передаются по оптическому кабелю к демультиплексору (DEMUX), где из группового сигнала снова восстанавливаются четыре значения частоты. В основе технологии WDM лежит частотное разделение (или разделение по длинам волн) в оптической системе передачи. На начальном этапе эта технология предусматривает использование методов фиксированного мультиплексирования/демультиплексирования, однако в перспективе возможно создание высокопроизводительных оптических коммутаторов каналов с частотным разделением.

В контексте развития измерительных технологий внедрение технологии WDM и внедрение мультиплексирования каналов с частотным разделением приводит к необходимости использования для анализа таких ВОСП оптических анализаторов спектра. В связи с перспективой широкого внедрения мультиплексирования с частотным разделением каналов, оптический спектральный анализ становится существенным для тестов эксплуатационного уровня.

Одним из методов такого анализа является метод понижения размерности на основе трансверсального фильтра [7]. Схема такого измерителя представлена на рис. 8.

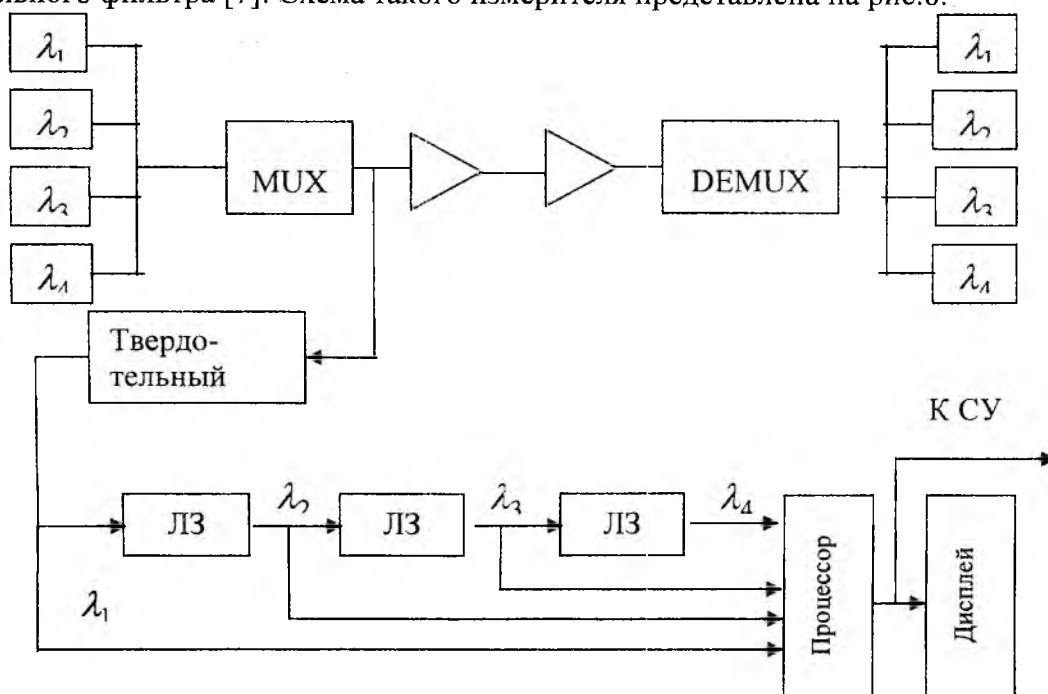


Рис. 8

**Развитие технологии SDH/SONET. Измерение параметров дисперсии.** В настоящее время в связи с интенсивным развитием технологии SDH/SONET с использованием волоконно-оптических систем для передачи широкополосных цифровых сигналов особое значение приобретают измерения параметра дисперсии одномодовых оптических кабелей.

В настоящее время для ограничения влияния дисперсии на передачу широкополосных цифровых сигналов используют более узкополосные лазерные источники с шириной полосы до 0,01 нм, а также волокна с дисперсионным сдвигом. И в том, и в другом случаях необходимость измерения дисперсии в кабеле возникает непосредственно на этапе его инсталляции и приемо-сдаточных испытаний.

Таким образом, измерения дисперсии в волоконно-оптических кабелях выходят за рамки системных измерений и в будущем будут выполняться как эксплуатационные измерения.

Для измерения хроматической дисперсии одномодовых кабелей в основном используются два метода, первый из которых связан с измерением во временной области (метод временной задержки), а второй – в частотной области (фазовый метод). Оба метода удовлетворяют требованиям точности и воспроизводимости результатов и одобрены ИТУ-Т. Однако метод временной задержки является более сложным по сравнению с фазовым методом, и поэтому последний чаще используется на практике.

Фазовый метод основан на измерении фазового сдвига сигнала, модулированного по интенсивности излучения, зондирующего кабель на различных длинах волн. Частота модуляции интенсивности обычно фиксирована и лежит в пределах 30...100 МГц. Измерение зависимости фазового сдвига между сигналами на различных длинах волн позволяет найти зависимость временной задержки сигнала от длины волны, а последующее ее дифференцирование – хроматическую дисперсию.

**Список литературы:** 1. *Иванов А.В.* Контроль соответствия в телекоммуникациях и связи. Ч. 1. Измерения, анализ, тестирование, мониторинг / Сайрус Систем. М., 2000. 375 с. 2. *Бакланов И.Г.* Технологии измерений первичной сети. Ч. 1. Системы E1, PDH, SDH. М.: Эко-трендз. 2000. 142 с. 3. *Бакланов И.Г.* Технологии измерений первичной сети. Ч. 2. Системы АТМ. М.: Эко-трендз. 2000. 140 с. 4. *Бакланов И.Г.* Технологии измерений в современных телекоммуникациях; М.: Эко-Трендз, 1997. 5. *Бакланов И.Г.* Эксплуатационные измерения на ВОЛС // Вестник связи. 1997. №8. 6. *Сейдж Э., Мелс Дж.* Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. / Под ред. *Б.Р. Левина.* М.: Связь, 1976. 496 с. 7. *Ropovskiy V.V.* Signal processing using methods of dimensionality reduction of representation space / The report IV-th International Conference on Antenna Theory And Techniques 9-12 September 2003, Sevastopil, Ukraine, PP. 419 – 420.

*Харьковский национальный  
университет радиоэлектроники*

*Поступила в редколлегию 12.05.2004*