

**КОМПЛЕКСНЫЙ ПОДХОД К ИССЛЕДОВАНИЯМ КОРОТКИХ  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

Измерения параметров световодов можно производить на различных этапах создания волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), из которых наиболее важные: производство волоконных световодов, изготовление оптического кабеля (стадия заводской приемки), проектирование ВОЛС, т. е. совокупности различных функциональных узлов и дискретных элементов, образующих линию связи [1]. К числу последних, кроме световодного кабеля, относятся различные элементы крепления, соединения концов кабеля между собой и с другими элементами, такими, как источники и приемники оптического излучения, разветвители, переключатели.

Большинство существующих методов измерений в основном используется на первых двух этапах [2]. Применение их при проектировании осложняется неоднозначностями получаемых результатов [3]. Причинами этого для многомодовых волоконных световодов являются различные характеристики распространения направляемых мод и межмодовая связь, приводящие к зависимости результатов измерений от способа и условий возбуждения, длины световода, внешних воздействий. В целях устранения влияния указанных явлений при проведении экспериментов обычно создают специальные условия возбуждения, чаще всего отличающиеся от реальных, либо не учитывают специфику коротких [4] отрезков многомодовых световодов и тем самым вносят ошибку в оценку исследуемых параметров. Эти подходы приводят к искажению действительных характеристик.

Возьмем в качестве примера такой параметр, как потери мощности передаваемого сигнала. В виде лабораторных установок и промышленных приборов существует большое число методов измерения потерь — как их суммарных значений, так и отдельных составляющих. Однако отмеченные неоднозначности результатов затрудняют измерения потерь в световодах и линии связи в целом. При сравнении результатов измерений в одном образце различными методами или на различных установках получаемые расхождения оказываются значительно больше, чем это следует из анализа ошибок измерений.

Рассмотренные особенности экспериментальных исследований ВОЛС приводят к тому, что попытки идентифицировать получаемые результаты измерений с реальными характеристиками линий связи дают существенные расхождения и ошибки [2]. В соответствии с этим возникают трудности, связанные с использованием серийно выпускаемых измерительных приборов, в которых не учи-

тывается специфика начальных участков или используются средства, ее ограничивающие. Поэтому при проведении измерений на этапе проектирования ВОЛС, особенно коротких, следует применять специальные методики и установки.

В случае использования протяженных линий большинство параметров, необходимых для проектирования, определяется на стадиях производства волоконных световодов, оптических кабелей, соединительных элементов передающих и приемных устройств. Это числовая апертура и коэффициент затухания световода, их дисперсионные свойства, предельные вносимые затухания в соединителях. Ширина и форма диаграммы направленности, модовый состав возбуждаемого в световоде сигнала не представляют интереса, поскольку влияние этих параметров незначительно и практически обнаружить его в ВОЛС большой длины очень сложно. При проектировании коротких ВОЛС следует учитывать влияние условий возбуждения и длины линии, которое сказывается на всех характеристиках ВОЛС, как оптических, так и передаточных. В связи с этим новые содержание приобретают оптические характеристики, в частности числовая апертура, характеристики передачи, касающиеся распространения света в световоде, в том числе, связанные с несущей (затухание амплитуды сигнала вдоль световода), и модуляционные характеристики. Влиянием условий возбуждения определяется важность получения информации о свойствах применяемых передающего и приемного элементов. Необходим контроль оптических и передаточных характеристик излучателей и приемников оптического сигнала. Следовательно, измерение этих характеристик обязательно при проектировании коротких ВОЛС.

Основные параметры, подлежащие измерению на стадии проектирования коротких ВОЛС, можно разделить на четыре группы: параметры источника оптического сигнала; параметры приемника; параметры направляющей системы (световода или кабеля) и параметры линии связи в целом.

К числу параметров источника нужно отнести поток излучения светодиода или лазера, ширину диаграммы излучения и направление ее максимума относительно оси корпуса, спектральный состав излучения. Измеряемыми параметрами приемника являются спектральная чувствительность, амплитудная характеристика и темновой ток. Параметры направляющей системы — суммарные и дополнительные потери, соответствующие заданной длине отрезка, характеристикам излучателя и условиям возбуждения. При исследовании линии связи в целом к перечисленным параметрам следует добавить затухание в соединительных элементах, включая соединители световода (кабеля) с передатчиком, приемником и друг с другом, а также дополнительное затухание вследствие возмущения, вносимого соединителем в распределение мощности по направляемым модам.

В случае изучения модулированных сигналов к последним двум группам присоединяются такие параметры, как дисперсия, иска-

жения формы импульсов, измерения которых должны проводиться уже на заключительном этапе.

Необходимо особо подчеркнуть: измерения перечисленных параметров должны быть взаимосвязанными и анализу следует подвергать весь комплекс полученных результатов. При изменении хотя бы одного из подлежащих контролю параметров нельзя говорить о сохранении справедливости полученных ранее результатов. Таким образом, необходим комплексный подход к контролю параметров коротких ВОЛС.

На основании изложенного предложена методика комплексных измерений параметров элементов и узлов волоконно-оптических линий связи малой длины в процессе их проектирования. В соответствии с этой методикой измерения осуществляются по этапам, указанным на рис. 1.

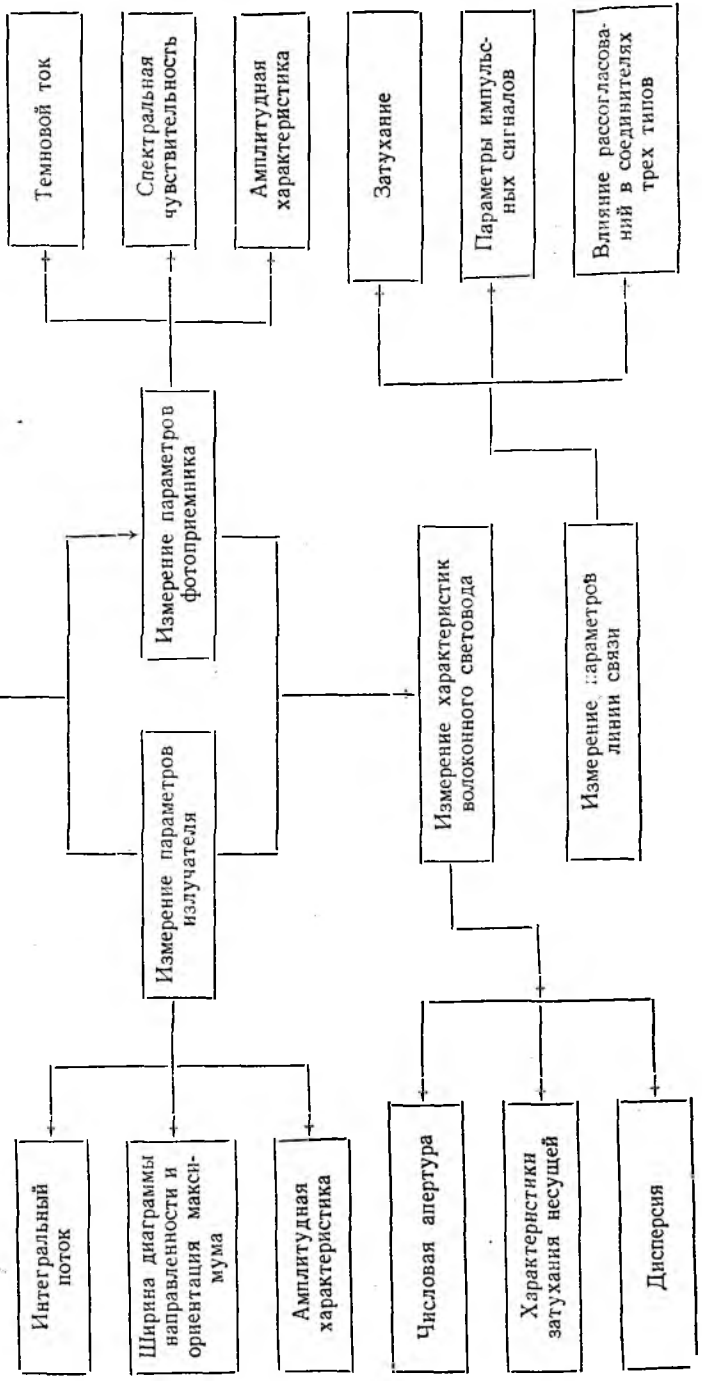
Особенностью методики является то, что она предусматривает последовательное проведение всех измерений с применением только тех элементов и узлов (излучателей, приемников, волоконных кабелей, соединителей), которые будут использованы в проектируемой линии связи. Данная особенность в сочетании с проведением комплексных измерений приведет к тому, что будет выполнено главное требование, предъявляемое на стадии проектирования, — максимальное приближение условий измерений к эксплуатационным условиям линии связи.

Комплексные измерения параметров достаточно широкого круга элементов и узлов представляют определенные трудности. Измерение большинства параметров требует применения специальных методов и средств, которые, как правило, сложно использовать в других исследованиях. Реализовать измерение всех указанных параметров в рамках одной установки практически невозможно. Результаты исследования коротких ВОЛС, в том числе и полученные авторами, определяют условие обязательного исследования параметров, характеризующих условия возбуждения и возбужденный в световоде сигнал. Поэтому для наиболее полного удовлетворения требованиям методики комплексных измерений разработали установку, которая обеспечивает измерение необходимых параметров излучателей, а также параметров волоконных световодов и кабелей, включая исследования модового состава.

Установка включает нестандартные узлы и приспособления, позволяющие осуществлять взаимную юстировку исследуемых элементов ВОЛС (излучателей, передатчиков, фотодиодов, приемников, световодов, кабелей) и составляющие в совокупности с ними макет ВОЛС, а также комплекс стандартной измерительной аппаратуры, обеспечивающей работу ВОЛС и измерение отдельных ее параметров.

Выполненные на рассмотренной установке исследования при помощи комплексной методики позволили получить ряд результатов, подтверждающих специфику коротких ВОЛС и позволяющих ее учесть в процессе их проектирования. В частности, провели

Выполнение общих требований к проведению измерений



серию экспериментов по измерению потерь в образцах многомодовых световодов (разной длины) со ступенчатым профилем показателя преломления при изменениях ширины возбуждающего пучка.

Исследования параметров серийных излучателей показали, что он имеет в пределах числовой апертуры световодов достаточно большие флюктуации ширины диаграмм направленности, например, для излучателя ИЛПН-301-1 они достигают 50 % и более. Поэтому в ходе эксперимента необходимо было обеспечить изменение ширины возбуждающего пучка в указанных пределах. Применение различных экземпляров излучателей в данном случае нецелесообразно ввиду внесения дополнительных ошибок измерений, связанных со случайными погрешностями юстировки, разбросом энергетических и других параметров излучателей. Исходя из этого в ходе

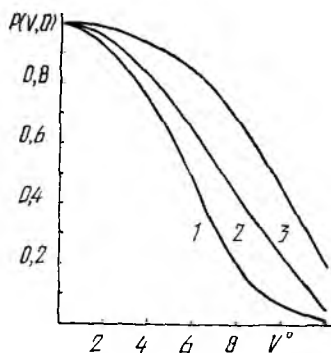


Рис. 2

измерений использовался только один экземпляр излучателя ИЛПН-301-1 при исследовании случая узконаправленного начального возбуждения или АЛ-123А при равномерном начальном возбуждении, а взаимное положение излучателя и входного торца световода в поперечной плоскости поддерживалось постоянным. Различные условия возбуждения создавались путем изменения осевого зазора между излучающей плоскостью и торцом световода. В зависимости от расстояния между элементами изменялся максимальный угол наклона лучей, падающих на торец, и соответ-

ственно этому — наибольший угол распространения возбуждаемых направляемых мод. Таким образом, достигалось изменение распределения мощности возбуждаемого сигнала по модам. На рис. 2 представлены характеристики начального распределения мощности, полученные методом дальнего поля при ширине зазора 10, 200, 700 мкм (кривые 3, 2, 1). Длина световода в данном случае составляла 0,25 м. Из представленных характеристик следует, что такая методика позволяет получить необходимое 50 %-е изменение полуширины начального распределения возбуждаемого сигнала.

Измерения потерь проводились на рассмотренной установке методом обламывания. Результаты измерений потерь в образцах различной длины в зависимости от осевого зазора  $h$  в узле возбуждения представлены на рис. 3. По нижней шкале оси абсцисс отложены значения  $h$ , а соответствующие им значения апертуры возбуждаемых пучков, полученные из кривых распределения модовой мощности по половинному уровню и названные условной апертурой, — по верхней шкале. При этом шкала NA1 соответствует экспериментальным данным для излучателя ИЛПН-301-1, а шкала NA2 — излучателя АЛ-123А. По оси ординат отложены значения относительных потерь. Они представляют собой отношение потерь

при изменяющемся зазоре (текущие потери) к потерям при минимальном расстоянии между излучателем и торцом световода, когда условная апертура принимает наибольшее значение. Минимальный зазор был равен 10 мкм.

Анализ результатов показывает, что влияние характеристик возбуждающего пучка наибольшее в коротких отрезках. При длине

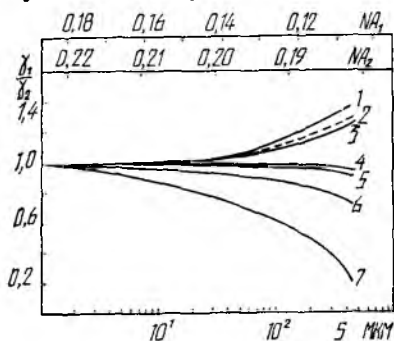


Рис. 3

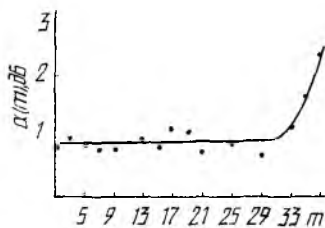


Рис. 4

5 м данные измерений различаются более чем на 60 % для флюктуаций полуширины. Наиболее вероятной причиной этого является дифференциальное модовое затухание, так как другие эффекты (связь мод, высвечивание оболочечных мод) на таких длинах проявляются очень слабо. На рис. 4 представлены результаты исследования дифференциальных модовых потерь для тех же световодов. Сравнение их с распределениями мощности (рис. 2) свидетельствует о том, что увеличение вклада высших типов мод, как это имеет место при уменьшении зазора, приведет к росту суммарных потерь.

Удлинение световода влечет за собой перераспределение мощности за счет мод и, как следствие, увеличение потерь для относительно маломодового начального распределения, что и подтверждается уменьшением влияния ширины зазора при длине световода 25 м (рис. 3, кривая 6).

Представляет интерес обратный эффект, получаемый для больших длин световодов, когда с ростом зазора для длин световода, больших некоторой длины  $L$ , потери увеличиваются. Причиной этого являются следующие особенности примененной методики измерений. Увеличение зазора, кроме уже рассмотренного сужения конуса, возбуждаемого сердцевину пучка излучения, приводит к более интенсивной относительной засветке оболочки. Моды оболочки могут распространяться на значительные расстояния, десятки и сотни метров, участвуя в передаче информации. Поэтому на малых длинах их влияние не сказывается, хотя их затухание так же, как и связь мод, влияет на увеличение потерь для малых условных апертур. При длинах в несколько десятков метров и более затухание мод оболочки превышает другие потери, что и приводит к росту потерь для длин 60, 200, 700 м (рис. 3, кривые 1, 2, 3).

Из полученных результатов также следует, что указанные эффекты имеют различный характер и для излучателей разных типов. Чем более высокой направленностью обладает излучатель, тем значительнее проявляется влияние флюктуаций его диаграммы направленности и условий возбуждения, что следует из анализа кривых для излучателя АЛ-123А (рис. 3, кривые 4, 5). В данном случае эффект возрастания потерь с увеличением зазора не обнаружен ввиду практически неизменной относительной интенсивности возбуждения оболочки.

Таким образом, в результате экспериментальных исследований параметров элементов коротких ВОЛС выявлен различный характер изменения потерь при изменении условий возбуждения в зависимости от длины контролируемого световода и его качества. Установлено, что в коротких многомодовых световодах с уменьшением числа возбуждаемых направляемых мод наблюдается уменьшение потерь, в то время как при увеличении длины потери возрастают. Очевидно, что на практике при проектировании коротких ВОЛС, а также в процессе их испытаний возможно возникновение ошибок, связанных с флюктуациями диаграмм направленности источников излучения. Исключить их можно двумя путями. Первый — выбор типов излучателей, параметры которых соответствуют требованиям установившегося режима распределения модовой мощности, что не всегда может быть приемлемо. Второй — учет рассмотренных эффектов с помощью предложенных комплексных измерений параметров элементов, входящих в состав проектируемой ВОЛС.

Список литературы: 1. *Bouillie M.* Les techniques de mesures sur fibre optiques // *Londe électrique*. — 1981. — 61, N 8. — P. 54—61. 2. *Costa B., Cordo B.* Fibre characterisation. *Optical fibre communication*. — Torino: S. n., 1980. — Part 1. — 262 p. 3. *Dauglas L. e. a.* Interlaboratory measurement comparison to determine the attenuation and bandwidth of graded-index optical fibers // *Appl. Opt.* — 1981. — 20, N 14. — P. 2412—2419. 4. *Сухованов И. А., Терещенко А. И.* О потерях в коротких линиях связи на основе многослойных диэлектрических волноводов // *Радиотехника*. — 1985. — Вып. 73. — С. 100—103.

Поступила в редколлегию 14.04.86

УДК 621.391:621.394

М. А. ИВАНОВ, канд. техн. наук, И. И. СВАТОВСКИЙ, И. А. ЯКОВЛЕВ,  
канд. физ.-мат. наук

#### ПРИЕМ НЕОРТОГОНАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ С ФАЗОВО-ЧАСТОТНОЙ МОДУЛЯЦИЕЙ

Применение известных методов демодуляции фазово-частотно-манипулированных (ФЧМ) сигналов со сложными форматами [1] сопровождается существенными потерями неортогональности [2]. Поэтому представляется целесообразным исследовать возможности