

ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СВЯЗИ

Ю.В.Аграфонов, Д.Б.Липов, А.Н.Малов, А.В.Овчинкин

Иркутский государственный университет,

Иркутский филиал Института Лазерной Физики СО РАН, e-mail: lipov@tcms12.rt.ru

1. Введение

Становление волоконно-оптических телекоммуникационных технологий выдвигает все новые и новые проблемы, которые имеют преимущественно системный характер или связаны с конкретной спецификой условий эксплуатации. Не является исключением и начавшаяся эксплуатация сибирских волоконно-оптических линий связи (ВОЛС).

Строительство ВОЛС в Сибири выявило ряд уникальных проблем, с которыми до сих пор не приходилось сталкиваться как в других странах, так и в западных регионах страны. Сибирская специфика определила целесообразность монтажа ВОЛС в грозотроссе линий электропередач (ЛЭП), что, в свою очередь, обуславливает необходимость эксплуатации волокон при температурах от (-60°C) до (+50°C). Необходимость преодоления больших незаселенных пространств также принуждает эксплуатировать участки протяженностью до 180км. Испытание уже готовых участков ВОЛС выявило, например, возрастание затухания среды ВОЛС, проложенной в грозотроссе, из-за циклических температурных воздействий на оконечные участки кабеля в муфтах. Другими проблемами являются грозовые, сейсмические и ветровые влияния на надежность

работы ВОЛС, электроэрозия оболочек световодов вблизи высоковольтных проводов, дефектообразование в местах соединений волокон под действием вечной мерзлоты. Большое значение приобретает и решение задачи диагностики удаленных волоконно-оптических каналов с центрального диспетчерского пункта.

Можно предположить, что дальнейшее развитие ВОЛС и решение указанных проблем будет связано с широким применением методов и средств компьютерной оптики и с использованием элементов дифракционной оптики во всех каскадах волоконного канала связи.

Целью настоящей работы является предварительная формулировка некоторых проблем эксплуатации, тестирования и диагностики ВОЛС на примере сибирских участков, проложенных в грозотроссах ЛЭП.

2. Нагрузка и механические деформации оптического волокна.

Влияние температуры на характеристики кабельной линии можно проиллюстрировать следующей таблицей, показывающей монтажные стрелы провеса для пролета длиной 450 м.

Монтажные стрелы провеса троса.

t, C	-30	-20	-10	0	10	20	30
Стрела провеса, м	8,46	8,92	9,38	9,84	10,30	10,76	11,22

В оптических кабелях со свободной укладкой модулей в результате эксплуатации при низких температурах из-за разности коэффициентов термического расширения металлической и волоконной части (соответственно $12,9 \cdot 10^{-6} \text{C}^{-1}$ и $8 \cdot 10^{-7} \text{C}^{-1}$), происходит процесс продольного сжатия волоконных модулей. При этом модули (в идеальном случае) располагаются спиралью. Для кабеля сечением 60 мм² эта спираль имеет следующие параметры: диаметр – 1 мм, шаг скрутки ~ 8 см. Поэтому понятно, что при понижении температуры помимо осесимметричного сжатия, вызванного усадкой и возможной кристаллизацией полимерных оболочек и гелевого наполнителя оптического модуля, меняющего числовую апертуру световода, помимо собственного температурного сжатия кварца, на волокно действуют силы сжатия в продольном и поперечном направлениях.

Вычисляя длину троса в пролёте с учётом изменения стрелы провеса [1]:

$$L = l + \frac{3}{8} \frac{f^2}{l} \quad [\text{м}],$$

где L -искомая длина кабеля, l –длина пролёта, f – стрела провеса, получим $L_{-30} = 450,424$ м, $L_{+30} = 450,746$ м $\Rightarrow \Delta L = 0,322$ м, где ΔL - изме-

нение длины кабеля в одном полёте, т.е. для технологической длины 4,5 км разность длин при критических температурах составляет ~3 м, что вызывает поджимание оптических модулей и, как следствие, может изменить оптические характеристики волокна.

Точное решение задачи об изменении свойств оптического волокна (ОВ) сводится к нахождению тензоров напряжения при одностороннем поперечном сжатии при продольно-поперечной нагрузке. Поскольку комплексно рассмотреть данный вопрос пока не представляется возможным, рассмотрим вышеперечисленные нагрузки отдельно.

Предположим, что к световоду приложены силы, действующие в одной плоскости, и радиус изгиба ОВ достаточно велик. Тогда компоненты тензора напряжения можно представить в следующем виде [2]:

- для точек, лежащих на оси x ($y=0$)

$$\sigma_{xx} = \frac{P_n}{\pi l b} \left[\frac{b^2 - x^2}{b^2 + x^2} \right] \quad (1)$$

$$\sigma_{yy} = -\frac{P_n}{\pi l b} \left[\frac{64b^2}{4b^2 + 4x^2} - 1 \right]$$

- для точек, лежащих на оси y ($x=0$)

$$\sigma_{xx} = \frac{P_n}{\pi b}$$

$$\sigma_{yy} = -\frac{P_n}{\pi b} \left(\frac{1}{b-y} + \frac{1}{b+y} - \frac{1}{2b} \right) \quad (2)$$

$$\sigma_{xy} = 0$$

Эпюры напряжений для указанных осей, соответствующие ур. (1) и (2), представлены на рис.1.

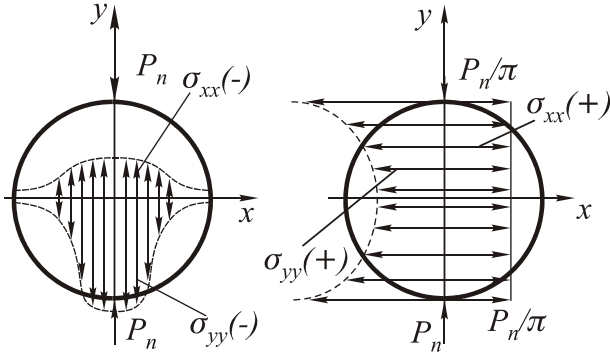


Рис.1. Эпюры напряжения при поперечном сжатии световода: a - на оси x , b - на оси y ; (знаки "+" и "-" означают соответственно растяжение и сжатие).

Как видно из рисунка, поле напряжений в световоде имеет сложную структуру. Используя полученные компоненты, можно получить и тензор диэлектрической постоянной, который показывает, что световод становится анизотропным. Компоненты тензора напряжения выглядят следующим образом:

$$\varepsilon_{xx} = \frac{1+\mu}{E} [(1-\mu)\sigma_{xx} - \mu\sigma_{yy}]$$

$$\varepsilon_{yy} = \frac{1+\mu}{E} [(1-\mu)\sigma_{yy} - \mu\sigma_{xx}] \quad (3)$$

$$\varepsilon_{xy} = \frac{1+\mu}{E} \sigma_{xy}$$

где $\mu = \frac{\lambda}{2(\lambda+G)}$ - коэффициент Пуассона, G - модуль упругого сдвига, λ - параметр Ламе.

При распространении излучения через анизотропный световод [2] могут возникать две ортогонально поляризованные волны. Это является одной из причин уширения импульса при приложенных механических нагрузках, т.к. из-за оптической анизотропии возникает разница в постоянных распространения поляризованных волн, плоскости поляризации которых по-разному ориентированы относительно приложенных сил. Экспериментальные исследования показывают [2], что при одностороннем поперечном сжатии, заметно увеличивается и затухание.

Рассмотрим вопрос о возникновении продольно-поперечной нагрузки при термоусадке элементов кабеля. Благодаря малому поперечному сечению трубки кабеля (в которой находятся ОВ) в сравнении с его длиной, влияние термоусадок можно проанализировать на примере линейно упругого продольного сжатия стержня (рис.2).

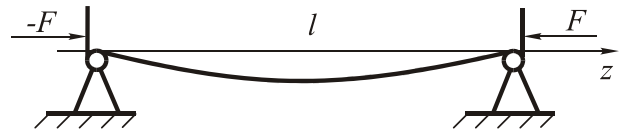


Рис.2. Линейно упругое сжатие стержня.

Уравнение равновесия стержня в деформированном состоянии имеет вид [3]:

$$\frac{d^2}{dz^2} \left(EJ \frac{d^2 x}{dz^2} \right) + F \frac{d^2 (x+x_0)}{dz^2} = q \quad (4)$$

где F - продольная сжимающая сила, q - поперечно распределённая нагрузка, которая также может вызывать прогиб провода, x_0 - начальный прогиб световода.

Уравнение можно привести к виду

$$\frac{d^4 x}{dz^4} + k^2 \frac{d^2 x}{dz^2} = -k^2 \frac{d^2 x}{dz^2} + \frac{q}{EJ} \quad (5)$$

$$k^2 = \frac{F}{EJ}$$

где E - модуль Юнга, $J = \frac{\pi b^4}{4}$ - момент инерции световода радиуса b . Общее решение уравнения равновесия будет

$$x(z) = \left(\frac{q}{Fk^2} - e_0 \right) \left(\frac{1 - \cos kl}{\sin kl} \right) \sin kz + \left(e_0 - \frac{q}{Fk^2} \right) \cos kz + \frac{ql}{2F} z + \left(\frac{q}{Fk^2} - e_0 \right) + \frac{qz^2}{2F} - \frac{a_0 F / F_{кр}}{1 - F / F_{кр}} \sin \left(\frac{\pi z}{l} \right) \quad (6)$$

где e_0 - эксцентриситет ОВ в модуле.

При отсутствии поперечной нагрузки

$$x(z) = e_0 \left[\left(\frac{1 - \cos kl}{\sin kl} \right) \sin kz + \cos kz - 1 \right] - \frac{a_0 F / F_{кр}}{1 - F / F_{кр}} \sin \left(\frac{\pi z}{l} \right) \quad (7)$$

где $F_{кр} = \pi^2 \frac{EJ}{l^2}$ - критическая эйлерова сила, a_0 - амплитуда изгиба. Приближённо продольную силу можно вычислить по формуле

$$F = SE\Delta T \alpha_k \quad (8)$$

где S - площадь поперечного сечения кабеля, E - модуль упругости кабеля, ΔT - разность температур, α_k - коэффициент термического расширения металлической части кабеля. Из (8) находим $F \sim 0,63$ кг.

Необходимо заметить, что такая постановка задачи (продольное сжатие стержня с закреплёнными концами) справедлива, поскольку оптоволоконные модули удерживаются в точках схода с опоры в кабеле силой трения $F_{тр}$ (рис.3), иначе бы модули выходили в муфту.

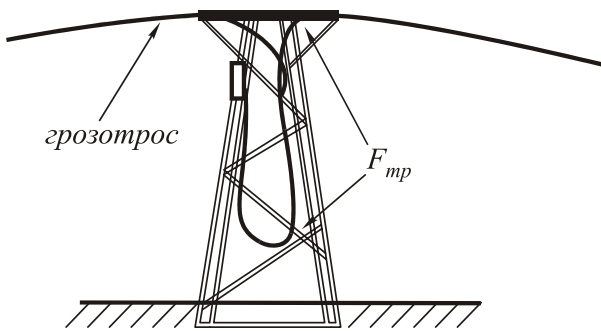


Рис.3. Схема расположения кабеля на опорах ЛЭП.

В процессе эксплуатации кабель испытывает циклические нагрузки [4] при изменении ветрового напора и температуры, что приводит к наложению колебаний разной длины волны и амплитуды (рис.4). Если, ввиду малости диаметра укладки ОВ жгута его можно считать струной, то этими колебаниями являются: стоячая волна самого волоконного жгута; собственные колебания кабеля (вибрация) с длиной волны $\lambda \sim 10$ м и амплитудой $A \sim 3$ мм; периодические ветровые нагрузки, вызывающие колебания с длиной волны $\lambda \sim 2L$ м и амплитудой до $A \sim 1$ м.

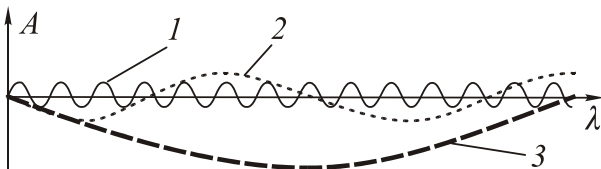


Рис.4. Колебания, испытываемые ОВ (схематично):
1 - положение ОВ в кабеле, 2 - колебания кабеля,
3 - изменение стрелы провеса при ветровой нагрузке.

Подобная цикличность изменения нагрузки на ОВ, скорее всего, ведёт к плавной деградации волновода, скорость которой, пока что, установить невозможно. Необходимо учитывать ещё и то, что, вследствие неупругого растяжения кабеля, ежегодно сжимающие нагрузки на волокно будут снижаться, как показано на рис.5. (по расчётам Fujikura Ltd. [5] через 10 лет удлинение кабеля составит 0,038 %, т.е. для длины 4,5 км оно будет $\sim 1,7$ м), но это приведёт к увеличению растягивающей нагрузки.

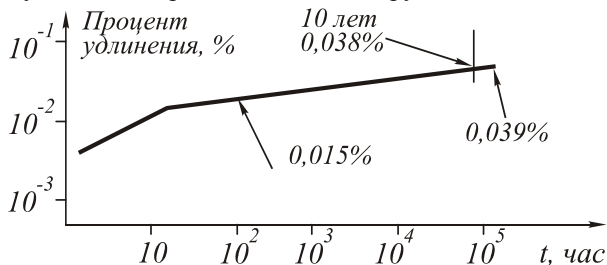


Рис.5. Характеристика удлинения кабеля сечением 60 мм^2 .

Приведём расчёты критических радиусов изгиба для ОВ и коэффициентов термоусадки металлической части кабеля. Взаимосвязь для коэффициента термоусадки, диаметра трубки и радиуса изгиба имеет вид [2]:

$$\alpha = \frac{r/R}{2(1-r/R)} \quad (9)$$

где α - коэффициент термической усадки кабеля, r - внутренний радиус трубки, R - радиус изгиба ОВ. Минимальный радиус изгиба ОВ равен

$$R_{\min} = \frac{l_n^2}{4\pi^2 r} \quad (10)$$

где l_n - период изгиба ОВ после завершения процесса усадки.

Из [6] для ОВ минимальный радиус изгиба равен $\sim 3,6$ см, для ОВ модуля - $\sim 7,2$ см, свободный ход жгута ОВ модулей ~ 1 мм ($r = 0,5$ мм). Из (8) находим α_{\max} для ОКГТ, он составляет $\alpha_{\max} = 0,003$, т.е. для $L = 4,5$ км $\Delta L = 13,5$ м. В реальных условиях $\alpha = 7,8 \cdot 10^{-4}$, т.е. $\Delta L = 3,5$ м. Из (9) найдём минимальный период укладки ОВ $l_{n,\min} = 3,8$ см, но реально он в три раза больше.

Как уже отмечалось выше, температура окружающей среды непосредственно влияет на характеристики передачи сигнала в оптическом волокне. Прежде всего изменение температуры сказывается через изменение показателя преломления $\beta_T = \frac{dn}{dT}$.

Температурная зависимость показателя преломления приводит к временной задержке импульса излучения, распространяющегося по световоду. Другим механизмом влияния температуры на передаточные характеристики световода является возникновение термических напряжений в световоде, у которых полимерная оболочка имеет более высокую температуру затвердевания, чем сердечник. Термические напряжения связаны с упругими свойствами материалов световода, зависящими от температуры, и коэффициентом термического расширения этих материалов следующим образом:

$$\sigma_{zz} = \int_{T_1}^{T_2} \left[\frac{E(r,T)}{1-\mu(r,T)} \right] [\alpha(r,T) - C(T)] dT \quad (11)$$

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{r^2} \int_0^r \sigma_{zz}(r) r dr; \dots \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{zz} - \sigma_{rr}$$

где

$$C(T) = \frac{\int_0^b \left[\frac{E(r,T)\alpha(r,T)}{1-\mu(r,T)} \right] r dr}{\int_0^b \left[\frac{E(r,T)}{1-\mu(r,T)} \right] r dr}$$

Эти напряжения вызывают в градиентном световоде изменение числовой апертуры ~ 4 %.

Таким образом, даже использование стандартных для ЛЭП методик оценки механических величин показывает, что ВОЛС могут оказаться чрезвычайно сложными в эксплуатации. Следует отметить, что пока остается неисследованным и вопрос влияния на качество передачи оптических сигналов усталостных процессов в стекле, а вернее, в тонком волокне, в котором свойства стекла могут значи-

тельно отличаться от характеристик массивных образцов.

3. Технологические проблемы оптических световодов

Оптическое волокно и кабель являются достаточно новым промышленным товаром и их эксплуатационное качество поэтому далеко от параметров обычных электротехнических изделий. Наряду со стандартными требованиями к минимизации уровня затухания сигнала в ВОЛС и в местах состыковки волокон, повышению эффективности ввода-вывода излучения и др., при эксплуатации системы в условиях резко континентального климата Восточной Сибири на первое место вышел дефект «выдавливания волокна» в стыковочных муфтах.

Характерной особенностью резко континентального климата является наличие больших температурных суточных колебаний - до 20 градусов. При расположении оптических волокон в грозотросе размах суточных колебаний может достигать и 40 градусов за счет лучистого солнечного нагрева кабеля и муфт. Можно предположить, что основной причиной "выдавливания" волокон из оболочки является сильное отличие коэффициента температурного расширения пластиковой оболочки оптического модуля (ОМ) от параметров оптических волокон (ОВ). С большой уверенностью можно утверждать, что при изготовлении кабеля модификация полимера для обеспечения морозостойчивости была проведена без дополнительных мер по стабилизации эксплуатационных свойств полимера. Поэтому при эксплуатации под действием суточных температурных колебаний через 1-2 месяца происходит значительное выдвигание волокон из оболочки – до 50 мм. Процесс выдавливания обусловлен механотермической деструкцией полимера и имеет необратимый характер. После окончания основной стадии деструкции (примерно через 3 месяца) полимер переходит в стадию физического и химического старения. При реальной эксплуатации циклическая термическая деструкция полимера усугубляется и постоянными микровибрациями ОМ, передающимися от висящего между опорами грозотроса.

"Выдавливание" ОВ происходит по механизму "храпового колеса" и инициируется движением оболочки ОМ, а фиксация выдвинутого волокна относительно оболочки происходит на витках спирального повива ОВ вокруг силового элемента ОМ. Поэтому температурные колебания и в зимний и в летний период будут вызывать дальнейшее развитие подобного дефекта. Учитывая возможный значительный лучистый нагрев муфт в летний период можно предположить усиление этого дефекта в летнее время. "Выдавливание" волокон из ОМ имеет статистический характер и поэтому можно утверждать, что те ОМ и муфты, в которых данный дефект еще отсутствует, испортятся несколько позже.

Для подавления дефекта в качестве первой меры сейчас предпринимается перемонтаж соединений в муфтах, а затем будет переработана конструкция муфт с заменой прямоугольной кассеты на круглую

со спиральной укладкой волокна, обеспечивающей пространственный запас для расположения выдавленных участков без нежелательных изгибов. Для полного устранения дефекта необходимо при изготовлении кабеля использовать полимер, подвергнутый структурной стабилизации при помощи известных технологических методов (ИК, УФ облучение, СВЧ-нагрев, введение химических присадок-стабилизаторов и др.). При этом необходимо, конечно, проведение соответствующих испытаний в Сибирских условиях.

В целом, возникший дефект "выдавливания" ОВ представляется весьма существенным и резко сокращающим эксплуатационную надежность всей линии. Он потребует, при его неустранении, постоянного проведения значительного объема ремонтно-восстановительных работ.

4. Проблемы диагностики и тестирования ВОЛС

В настоящее время для проверки качества линий связи используется оптические рефлектометры [7]. Они используют в своей работе принцип обратного Релеевского рассеяния. Информация о результатах зондирования линии выводится в виде рефлектограммы, показывающей изменение затухания в зависимости от длины линии. Для анализа используется компьютерная аппроксимация большого количества зондирующих импульсов. Практика работы с рефлектометрами различных фирм-изготовителей выявила ряд недостатков этих поистине замечательных дорогостоящих приборов.

Перед началом работы оператору необходимо ввести длину зондирующего импульса, что необходимо для детального исследования определённого участка трассы. Для просмотра и анализа коротких линий или близлежащих участков ВОЛС и сростков необходимо измерение на минимально коротких длительностях зондирующего импульса (≈ 10 нсек), при этом, однако, дальний конец линии будет «зашумлён» и анализ его будет невозможен. При тестировании удаленного участка трассы и/или всей линии необходимо использовать длинные зондирующие импульсы, но тогда начало трассы оказывается в «мертвой зоне», в которой невозможно оценить процессы на ближнем конце линии, а также происходит видимое на рефлектограмме «размывание» неоднородностей типа сварного соединения, что затрудняет точность определения его местоположения. Для решения этой проблемы желательна разработка способов формирования опорных или реперных точек непосредственно на волокне, чтобы при измерении оказалось бы возможным осуществить «привязку» к определённому географическому местоположению.

При анализе рефлектограмм измеритель периодически сталкивается с минимыми неоднородностями, которые реально на волокне не существуют – это так называемые фантомы (рис.6), обусловленные переотражением или иными факторами, возможно, связанными с нюансами обработки информации микропроцессором. Можно предложить следующую классификацию подобных фантомов:

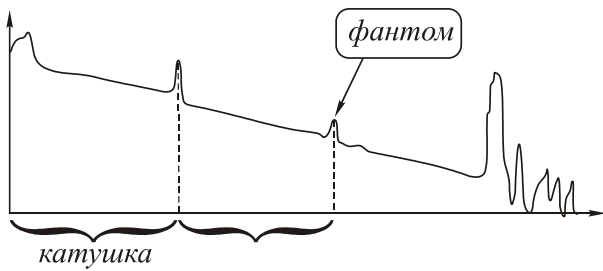


Рис. 6. «Фантомные» максимумы рефлектограммы.

1. Фантом "Зеркальный близнец". Данный фантом встречается зачастую при использовании измерительной катушки (в основном при входном контроле ВОЛС) и появляется на расстоянии равном длине измерительной катушки от всплеска на стыке самой катушки с линией (рис. 6). Зеркальный близнец" появляется в результате френелевского отражения от механического соединителя на стыке измерительной катушки с линией. Этот фантом, несмотря на мнимое отражение (которое можно принять за микротрещину), не вносит какого-либо затухания. Эффект замечен на рефлектометрах разных фирм. Похожий фантом известен ещё по "металлическим" рефлектометрам типа P5-10. При появлении данного фантома рекомендуется добавить в место соединения катушки с линией каплю иммерсионной жидкости.
2. Фантом "Пик". Данный фантом обнаруживается при измерении участка ВОЛС длиной до 70 км рефлектометром Hellion фирмы Wavetek. Выглядит фантом как пик, скачущий при измерении вверх-вниз. Встречается крайне редко, причина его появления пока неизвестна (возможно происходит из-за отражения от конца линии). Замечены случаи исчезновения этого фантома при изгибе конца или смачивании коннектора иммерсионной жидкостью.
3. Фантом "Ступень вверх". Наблюдается довольно редко. Впервые нами замечен на участке длиной 168,096 км, причём на одном волокне из 16 при измерении HP E6008 (рис.7). Фантом характеризуется сверхъестественно большой амплитудой - до -2,3 дБ – и появляется на разных расстояниях, в зависимости от длины импульса (см. рис.7 и рис.8). При появлении фантома "Ступень вверх" рекомендуется произвести измерение на других длинах импульса или повторить измерение другим прибором.

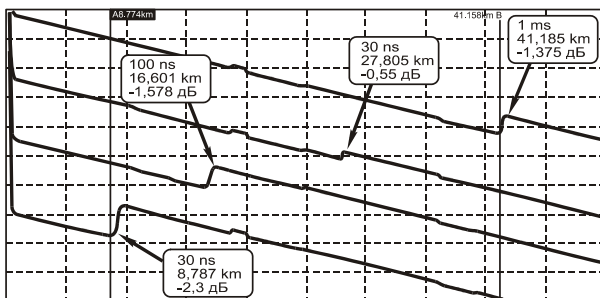


Рис.7. Фантом типа «ступенька вверх».

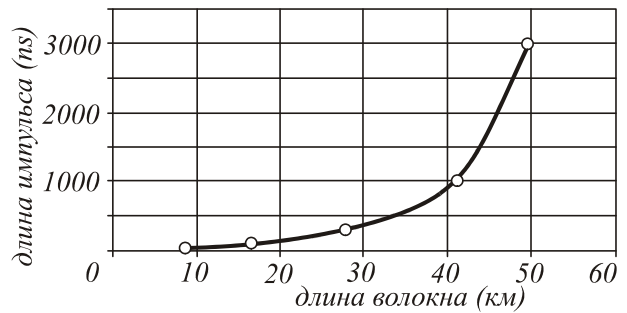


Рис.8.

Таким образом, понятно, что много проблем возникает из-за использования при измерении зондирующих импульсов с фиксированной длительностью. Поэтому представляется перспективной разработка рефлектометров с автоматически изменяющимися зондирующими импульсами, что позволит путём аппроксимации рефлектограмм на разных длительностях импульсов избавиться как от «мёртвых зон», так и от «зашумлённости» удаленных участков, а также поможет выявлять фантомы типа «Пик» и «Ступень вверх». Наряду с этим необходимо создание алгоритма обработки рефлектограмм, который бы удалял фантомы, перемещающиеся по длине волокна при изменении длительности импульсов, из результирующей рефлектограммы. Также необходимо автоматическое удаление фантома типа «зеркальный близнец».

Имеющиеся в реальных образцах рефлектометров программные средства для обработки результатов зондирования далеки от совершенства и поэтому на практике почти не используются. Это связано, например, с неточным определением местонахождения сварных соединений, пропуском соединений с «нулевым» затуханием, а также и с неточным определением самой величины затухания. Нельзя признать действенным и так называемый метод двустороннего анализа рефлектограмм. Поэтому совершенствование программ обработки рефлектограмм и алгоритмов работы подобных приборов представляется перспективным и актуальным направлением деятельности.

Разработка новых принципов диагностики и тестирования ВОЛС не теряет своей актуальности, а, наоборот, приобретает все большую и большую практическую значимость. На первый план выдвигаются задачи обнаружения нелокализованных дефектов и контроля механических напряжений в волокне. Недавно были предложены новые приборы, работающие на принципе регистрации Брюллиэновского рассеяния [8]. Брюллиэновские рефлектометры (BOTDR) в отличие от их обычных предшественников позволят определить натяжение волокна в зависимости от длины волокна. С их помощью окажется возможным выявить участки с повышенным натяжением, требующие замены в связи с повышенным риском возникновения микротрещин. Также следует отметить, что в настоящее время для диагностики волоконно-оптических каналов используется только временная модуляция оптического сигнала, что не позволяет получать информацию о

состоянии вещества по сечению волокна. Использование пространственной модуляции вводимого в волокно излучения с помощью дифракционных оптических элементов – в идеале перестраиваемых управляющими электрическими импульсами – позволило бы повысить качество таких измерений.

4. Заключение

Приведенные данные показывают, что задача создания надежных волоконно-оптических систем телекоммуникационных систем еще далека от своего окончательного решения. Проблемы, возникающие при реальной эксплуатации ВОЛС требуют проведения не только технологических, но и фундаментальных исследований. Решающий вклад в решение этих проблем можно ожидать от применения методов компьютерной и интегральной микрооптики, что, в свою очередь, может способствовать и развитию новых подходов в этих областях науки и технологии.

5. Благодарности

Авторы выражают благодарность за помощь и плодотворные обсуждения главному инженеру ТЦМС-12 АО «Ростелеком» к.т.н. А.М.Калягину, начальнику службы средств диспетчерского и технологического управления АОЭиЭ «Иркутскэнерго»

С.М.Глушкову и инженеру АОЭиЭ «Иркутскэнерго» Ю.Н.Исайкину.

Литература

1. Инженерно-технический справочник по электро-связи. Кабельные и воздушные линии связи. \ Под ред. . К.Я. Сергейчук. М: “Связьиздат”, 1961.
2. А.Г. Мурадян, И.С Гольдфарб, В.П. Иноземцев. Оптические кабели многоканальных линий связи. М: “Радио и связь”, 1987.
3. В.Г. Зубчанников. Основы теории упругости и пластичности. М: “Высшая школа”, 1990.
4. К.П. Крюков, Б.П. Новгородцев. Конструкции и механический расчёт линий электропередачи. Л.: “Энергия”, 1970.
5. Изменение длины оптоволоконного кабеля в грозотросе (ОКГТ). Тех. документация Fujikura Ltd, 1998.
- 6.Рекомендуемые процедуры монтажа для ОПТ-GW. Волоконно-оптический кабель, встроенный в грозотросс. Alcoa Fujikura Ltd., 1994.
7. Д.Дж.Стерлинг. Волоконная оптика. Техническое руководство. –М.: «Лори», 1998.
8. В.А.Бурдин. Бриллюэновские оптические рефлектометры. –АО «Связь - Автоматика – Монтаж», Самара, 1999.