

УДК 535.317.2

**МОНИТОРИНГ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА  
ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКИХ ЛИНИЙ СВЯЗИ**

МАНЬКО А.А.

Одесская национальна академия связи им. А.С. Попова

**THE MONITORING OF TEMPERATURE MODE  
OF FIBER-OPTIC COMMUNICATION LINES**

MANKO A.A.

Odessa National Academy of Telecommunications n. a. A.S. Popov

***Аннотация.** В работе рассмотрен метод мониторинга температурных режимов волоконно-оптических линий связи, проложенных вдоль энергетических линий. Проведен расчет уровня импульсного сигнала, отраженного от участка с повышенной температурой. Отмечено достаточно высокую чувствительность предложенного метода. Выполнено экспериментальное исследование участков с повышенной температурой.*

***Abstract.** This paper presents a method of temperature monitoring of fiber-optic communication lines, located along the energy lines. The calculation of the pulse level of the signal reflected from the area of high temperature is produced. Rather high sensitivity of the proposed method is pointed. Experimental study of high temperature areas is produced.*

**ВВЕДЕНИЕ**

В настоящее время построено значительное количество волоконно-оптических линий связи (ВОЛС), обеспечивающих функционирование магистральных оптических сетей связи [1]. При этом ВОЛС, проложенные вдоль линий электропередачи и теплоэнергетических линий, при отклонении режимов функционирования последних от нормы или повреждениях могут подвергаться определенным тепловым воздействиям. В результате воздействия, при эксплуатации оптического волокна в условиях повышенной температуры происходит ускорение процессов старения материала. Это приводит к тому, что ухудшаются механические свойства материала и, как следствие, уменьшается срок службы линий связи [2]. С другой стороны, локальное повышение температуры оптического кабеля (ОК), расположенного рядом с энергетическими коммуникациями, может свидетельствовать об их аномальном режиме работы. При этом, наличие аномального режима может указывать на возможность аварии и предшествовать аварийному состоянию. Таким образом, представляет интерес определение момента и места возникновения аномальных ситуаций и режимов на энергетических линиях для предупреждения последствий их возникновения.

С этой целью на высоковольтных электрических сетях используются интеллектуальные системы мониторинга распределения температуры вдоль энергетической линии [3]. В качестве датчика в них используется оптическое волокно (ОВ), вмонтированное в электрический кабель. При этом для получения информации о состоянии волокна используют такие нелинейные эффекты в оптическом волокне, как рассеяние Рамана и рассеяние Бриллюэна.

Изучение спектральных характеристик рассеянного сигнала в таком случае позволяет определить температуру оптического волокна в определенном месте, а также измерить расстояние до него. Вместе с этим, оборудование, использующее представленные принципы, является достаточно сложным и дорогостоящим.

В то же время на волоконно-оптических линиях связи, в том числе на тех, что обеспечивают функционирование энергосетей, имеет место использование оптических импульсных рефлектометров для определения распределенных параметров и характеристик линий, а также их локальных характеристик [4].

Как правило, стандартные модели рефлектометров, предназначенных для решения этих задач, имеют высокую разрешающую способность как по уровню затухания (до  $\pm 0,001$  дБ), так и по расстоянию (до  $\pm 1$  м). Таким образом, представляет интерес применение более простых и недорогих методов в сочетании с широко распространенным стандартным оборудованием для оптического мониторинга ВОЛС, проложенных вдоль энергетических сетей.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

На данный момент контроль и мониторинг ВОЛС осуществляется, как правило, с помощью оптических рефлектометров [3]. Оптическая рефлектометрия ОК позволяет определить наличие в кабеле неоднородностей, вызванных локальным изменением параметров оптического волокна. При этом одной из причин такого изменения может быть повышение температуры окружающей среды [3]. Таким образом, для оценки влияния на особенности рефлектограммы участков оптического волокна (ОВ) с аномальной температурой необходимо провести рассмотрение факторов, определяющих зависимость параметров ОВ от температуры.

На рис.1 приведено изображение оптического волокна, включающего участок с повышенной температурой  $t_2^0$ . С обеих сторон этого участка температура оптического волокна составляет  $t_1^0$ . Следствием повышения температуры могут стать изменения показателя преломления стекла  $n$ , числовой апертуры волоконного световода  $NA$ , а также диаметра сердцевинки волокна  $D$ . Все эти факторы могут привести к появлению дополнительных потерь [5] и отображению соответствующих событий на рефлектограмме. Так, потери из-за вариации показателя преломления сердцевинки волокна с температурой определяются (для резкой границы перехода между участками волокна) согласно выражению [5]:

$$\alpha_n = -10 \lg(4n_1(t_1)n_1(t_2) / (n_1(t_1) + n_1(t_2))^2) \text{ [дБ]}, \quad (1)$$

где  $n_1(t_1)$  и  $n_1(t_2)$  – показатели преломления стекла сердцевинки с нормальной и повышенной температурой соответственно. При этом  $n_1(t_2) = n_1(t_1) + (\partial n_1 / \partial t)\Delta t$ , где  $\Delta t$  – разность температур участков, а  $\partial n_1 / \partial t$  – температурный коэффициент показателя преломления стекла сердцевинки.

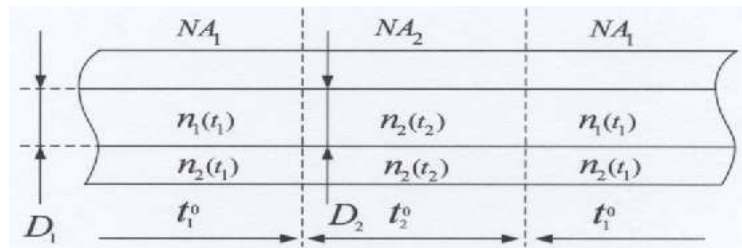


Рисунок 1 – Структурная схема оптического волокна, содержащего нагретый участок

Изменение показателей преломления сердцевинки и оболочки ( $n_1$  и  $n_2$ ) с температурой приводит к изменению такого важного параметра волоконного световода, как числовая апертура –  $NA = \sqrt{(n_1)^2 - (n_2)^2}$ . Потери при вариации апертуры возникают в том случае, если апертура части волокна, передающей сигнал,  $NA_1$  больше апертуры части волокна, принимающей сигнал  $NA_2$ , и определяются как [5]:

$$\alpha_{NA} = 10 \lg(NA_1 / NA_2)^2 \text{ [дБ]}. \quad (2)$$

При  $NA_1 \leq NA_2$  апертурные потери не возникают. При этом, величину  $NA_2$  можно определить с учетом зависимости показателей преломления от температуры из соотношения:  $NA_2 = NA_1 + (\partial NA / \partial n_1)(\partial n_1 / \partial t)\Delta t + (\partial NA / \partial n_2)(\partial n_2 / \partial t)\Delta t$ .

Потери при вариации диаметров сердцевинки оптического волокна в результате нагрева возникают, когда диаметр сердцевинки волокна передающего участка больше диаметра сердцевинки принимающего участка, и определяются соотношением [5]:

$$\alpha_D = 10 \lg(D_1 / D_2)^2 \text{ [дБ]}, \quad (3)$$

где  $D_1$  и  $D_2$  диаметры сердцевины волокна передающего и принимающего участков соответственно. В этом случае величину  $D_2$  можно найти из соотношения:  $D_2 = D_1 + (\partial D / \partial t) \Delta t$ , где  $\Delta t$  – разность температур участков. При  $D_1 \leq D_2$  потери не возникают.

С целью определения уровня отраженного импульсного сигнала в работе были проведены расчеты температурной зависимости коэффициента отражения от аномального участка волокна. Длительность импульса составляла 10 нс, что отвечало уровню релейского рассеяния – 70 дБ [4]. Температура нормального волокна составляла в расчетах 20° С. Результаты расчетов приведены на рис. 2.

Тут  $P_{REF}$  – мощность сигнала, отраженного от участка с аномальной температурой,  $P_{REL}$  – мощность релейского рассеяния,  $P_C$  – мощность импульсного тестирующего сигнала. Слева приведена шкала, которая обозначает уровень отраженного сигнала по отношению ко входному импульсу. Справа приведена шкала, которая определяет уровень отраженного сигнала по отношению к уровню обратного релейского рассеяния.

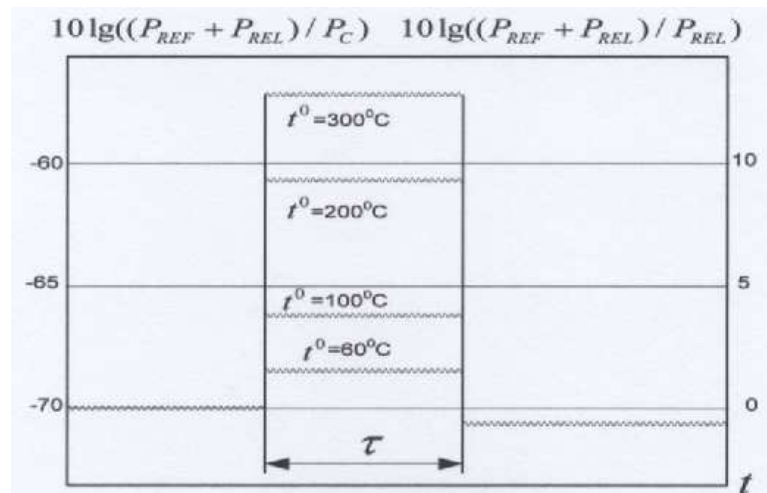


Рисунок 2 – Рефлектограмма участка линии с повышенной температурой при разных значениях температуры участка

Как видно из графиков, пользуясь рефлектометрическими методами можно определить на волоконно-оптической линии связи место нахождения участка волокна с повышенной температурой. Кроме того, благодаря изменению с температурой показателя преломления аномального участка можно оценить температуру волокна.

При этом наличие развитых рефлектометрических методов измерений позволяет провести экспериментальные исследования в этой области [4], что также являлось целью данной работы.

### РЕФЛЕКТОМЕТРИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЧАСТКОВ ВОЛС С ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРОЙ

Таким образом, с учетом вышесказанного, в работе были проведены экспериментальные рефлектометрические исследования участка оптического волокна с повышенной температурой, входящего в состав ВОЛС. Для моделирования оптической линии использовалось волокно, отвечающее стандарту МСЭ G.652. Длина отрезка составляла примерно 2 км. Нагреванию подвергался участок длиной 20 м, расположенный посередине линии. Длительность импульса составляла 6 нс, что отвечало коэффициенту обратного релейского рассеяния -72 дБ [4]. Измерения были проведены для двух длин волн – 1550 нм и 1310 нм. Температура окружающей среды составляла 21°С. Фрагмент рефлектограммы, содержащий нагретый до температуры 90°С участок, представлен на рис. 3.

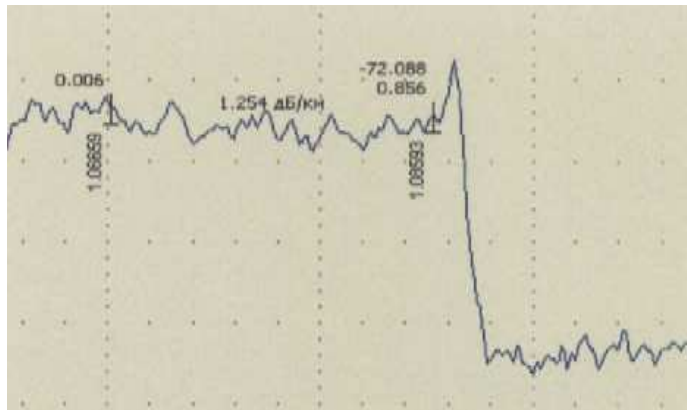


Рисунок 3– Фрагмент рефлектограммы. Температура участка: 90 °С;

$$\lambda = 1550 \text{ нм}; \Delta = 0,856 \text{ дБ}$$

Рефлектометр располагался с левой стороны от участка. Как видно из рефлектограммы, с правой стороны участка наблюдается перепад величиной  $\Delta = 0,856$  дБ, вызванный потерями на конце участка. Кроме того, ступеньке предшествует пик в 0,2 дБ. Наличие пика, как правило, вызывается отражением сигнала, и в данном случае это могут быть микроизгибы волокна, вызванные температурными деформациями. На рис. 4 приведен аналогичный фрагмент рефлектограммы, полученной на длине волны 1310 нм.

Ступенька на ней также присутствует, но ее величина значительно меньше –  $\Delta = 0,248$  дБ, при этом пик, характерный для отраженного сигнала, отсутствует. При понижении температуры перепады затуханий уменьшаются, и при 68°С составляют 0,522 дБ и 0,139 дБ на длинах волн 1550 нм и 1310 нм соответственно. Общий вид рефлектограммы на длине волны 1310 нм при температуре 61 °С представлен на рис. 5. Перепад затухания в этом случае составляет 0,102 дБ. При температуре 50°С уровень перепада составляет 0,057 дБ на длине волны 1550 нм и при дальнейшем снижении температуры определить наличие и расположение перепада на рефлектограмме становится затруднительно. При снижении температуры до исходного уровня рефлектограмма также принимает вид, имевший место до проведения испытаний.

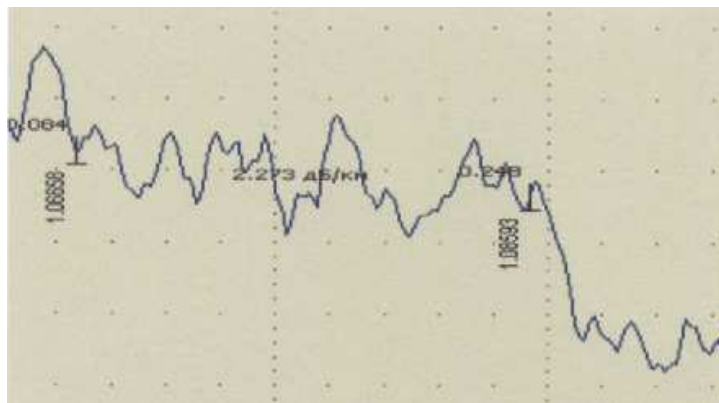


Рисунок 4 – Фрагмент рефлектограммы. Температура участка: 90 °С;

$$\lambda = 1310 \text{ нм}; \Delta = 0,248 \text{ дБ}$$

Изменение потерь в ОК при понижении температуры может использоваться для уточнения места повреждения кабеля [6]. С этой целью в конкретном месте расположения ОК производится его охлаждение жидким азотом в специальном устройстве (муфте) в пределах короткого (точечного) участка. После чего проводятся рефлектометрические измерения расстояния до поврежденного участка с включением в схему измерения охлажденного участка. Затухание этого участка составляет 0,2...1,0 дБ, и он отчетливо виден на рефлектограмме. Таким образом, с высокой точностью производится привязка места повреждения на ВОЛС к месту с хорошо известными координатами.

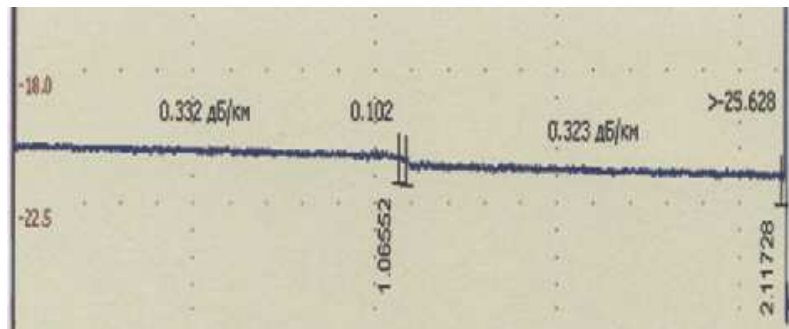


Рисунок 5 – Общий вид рефлектограммы. Температура участка: 61 °С;

$$\lambda = 1310 \text{ нм}, \Delta = 0,102 \text{ дБ}$$

Температурная зависимость свойств и параметров оптического волокна позволяет использовать ОК, проложенный вдоль трубопроводов и теплотрасс, для функций их мониторинга [7], [8]. В случае повреждения теплотрассы возникают локальные температурные изменения, которые могут быть зарегистрированы соответствующей аппаратурой. Кроме того, небольшие утечки теплоносителя могут свидетельствовать о наличии аномального режима и быть сигналом для проведения работ по предупреждению аварийного режима.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, проведенные расчеты и измерения подтверждают возможность определения наличия и места расположения в составе волоконно-оптической линии связи участков с повышенной температурой с целью предотвращения возможных аварийных ситуаций в энергетических и тепловых сетях, а также для принятия мер по повышению долговечности и надежности оптических линий связи.

### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Фриман Р. Волоконно-оптические системы связи / Р. Фриман. – М.: Техносфера, 2003. – 440 с.
- 2 Пестриков В.М. Длительная прочность оптических волокон в условиях старения материала / Пестриков В.М. - Физика и химия стекла. – 2000. – т.26. – № 2. – С. 244-257.
- 3 Погорілий Л.Г., Особливості оптичного моніторингу температурних режимів високовольтних енергетичних ліній / Л.Г. Погорілий, О.О. Манько, О.В. Колченко Енергетика та електрифікація. – 2011. – № 8. – С.25 – 29.
- 4 Листвин А.В., Рефлектометрия оптических волокон / А.В. Листвин, В.Н. Листвин - М.: ЛЕСАР арт, 2005. 208 с.
- 5 Убайдуллаев Р.Р. Волоконно-оптические сети / Р.Р. Убайдуллаев. – М.: ЭКО-ТРЕНДЗ, 2001. – 262 с.
- 6 [Электронный ресурс] [www.kingfisherfiber.com/Products/ColdClamp/ColdClamp.pdf](http://www.kingfisherfiber.com/Products/ColdClamp/ColdClamp.pdf).
- 7 Турбин А.И. Создание и применение комплексной системы мониторинга состояния трубопроводов «Омега» / А.И. Турбин Трубопроводный транспорт (теория и практика). – 2011. – №2(24). – С.46 – 48.
- 8 [Электронный ресурс] <http://www.sensor.net.co.uk>.