



УДК 681.7.068.3:536.02

© *Е. В. Резак, М. Р. Прокопович, 2008*

## УЧЕТ ПОГРЕШНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ДЛИНЫ ОПТИЧЕСКОГО ВОЛОКНА

*Резак Е. В.* – ст. преп. кафедры «Информационные технологии», тел. (4212) 42-59-84, e-mail: moidryg@mail.ru (Хабаровский институт инфокоммуникаций ГОУ ВПО ХФ «СибГУТИ»); *Прокопович М. Р.* – канд. физ. - мат. наук, проф., завкафедрой «Оптические системы связи», тел. (4212) 64-73-54, e-mail: marko@festu.khv.ru (ДВГУПС)

Рассматривается изменение длины оптического волокна в волоконно-оптическом кабеле при изменении температуры, деформационное изменение показателя преломления сердечника оптического волокна при изменении температуры. Данные изменения вызывают погрешность измерения длины оптического волокна.

The variation of the optical fiber length in an optical-fiber cable and the deformation variation in the index of refraction for the optical fiber core with temperature variation are considered. The given variations cause an error in measuring the optical fiber length.

*Ключевые слова:* погрешность, длина оптического волокна, деформация волокна, показатель преломления.

Одним из важных параметров волоконно-оптического кабеля является его длина. Длина кабеля прямым методом измеряется в процессе его производства с нанесением меток для ее определения.

В процессе эксплуатации кабеля его длину прямым измерением определить сложно, а зачастую невозможно. То же можно сказать о расстоянии до места повреждения кабеля от какого-либо из его концов.

В этих случаях используется рефлектометрический или локационный методы, то есть косвенные измерения [1, 2]. В этих методах расстояние  $l$  до повреждения или до конца кабеля определяется по времени распространения посланного в оптический кабель импульса в прямом и обратном направлениях:

$$l = \frac{n_1 t}{2c}, \quad (1)$$

где  $n_1$  – показатель преломления сердечника,  $t$  – время распространения импульса в обоих направлениях,  $c$  – скорость света в вакууме.

В прецизионных косвенных методах длина оптического волокна (ОВ) определяется по фазовому сдвигу синусоидального сигнала, модулирующего высокочастотную поднесущую, которая, в свою очередь, модулирует оптический сигнал [3–6]. В этих случаях необходимо учитывать натяжение оптического волокна и его температуру [3, 5].

Для исключения растяжения ОВ в кабеле вследствие значительной разности температурных коэффициентов расширения кварцевого (ТКР) стекла ( $0,6 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ) и полиэтиленовых оболочек ( $2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ ) кабеля используются две его конструкции.

В первой конструкции ОВ свободно укладывается в модуле при высокой температуре. В процессе охлаждения оптическое волокно в модуле принимает волнистый характер.

Во второй конструкции применяется повив модулей с ОВ. При охлаждении кабеля волокна в модулях смещаются к оси кабеля, а при его нагревании они смещаются к периферии [7–8].

В любой из этих конструкций происходит деформация ОВ, и показатель преломления кварцевого стекла при изменении температуры кабеля будет изменяться как вследствие изменения температуры, так и вследствие деформации изгиба (в первой конструкции) или кручения (во второй конструкции), вызванной тепловым расширением.

Необходимо отметить, что в источниках, детально рассматриваемых конструкции волоконно-оптического кабеля [7–8] не уточняются особенности деформации ОВ, при которой изменяется показатель преломления сердечника волокна.

Источники [3, 5, 7], в которых рассматривается изменение показателя преломления кварцевого стекла при изменении температуры или вследствие давления на кабель, не содержат полных конкретных вычислений для волоконно-оптических кабелей при заданных условиях деформации.

В силу указанных причин температурное изменение показателя преломления сердечника:

$$\Delta n = \left[ \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right)_T + \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right)_R \right] \Delta T. \quad (2)$$

Рассмотрим каждое из составляющих отдельно.

Первое рассмотрено в литературе, так в [5] представлены данные для нахождения составляющей изменения показателя преломления в зависимости

от температуры:  $\frac{1}{n} \left( \frac{\partial n}{\partial T} \right)_T = 0,68 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  для кварцевого стекла. Для оцен

ки второй составляющей формулы (2) необходимо учитывать поведение ОВ.



Рассмотрим расположение ОВ в модуле кабеля первой конструкции. При высокой температуре волокно расположено параллельно оси модуля  $Z$ . С понижением температуры полиэтиленовые оболочки оптического кабеля сжимаются. Кварцевое волокно, имеющее ТКР в 330 раз меньший, чем у полиэтилена, сохраняя свою длину, будет изгибаться в случайно расположенных плоскостях, через которые проходит ось модуля, как показано на рис. 1.

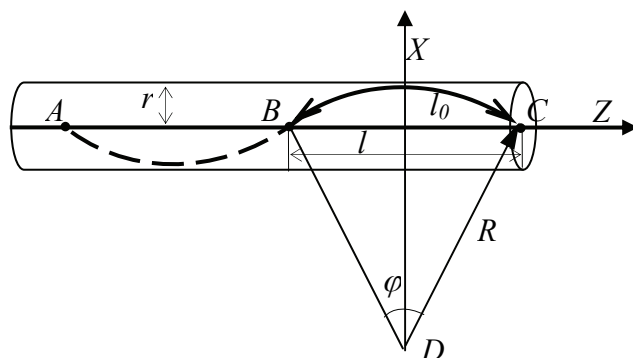


Рис. 1. Волокно в модуле в сжатом и растянутом положениях

Примем условно, что ОВ в изогнутом состоянии располагается в виде отрезков дуг среднего радиуса  $R$  в модуле с внутренним радиусом  $r$ ,

$$R = \frac{r}{\left(1 - \cos \frac{\varphi}{2}\right)}, \quad (3)$$

где  $\varphi$  есть угол, опирающийся на дугу ВС. Этот угол связан с относительным удлинением ОВ  $\delta$  формулой

$$\delta = \frac{l_0 - l}{l_0} = 1 - \frac{2}{\varphi} \sin \frac{\varphi}{2}, \quad (4)$$

где  $l_0$  – длина ОВ,  $l$  – длина хорды ВС. Исходя из физических соображений (деформация волокна в кабеле достаточно малая величина), используем разложение функций  $\sin(\varphi/2)$  и  $\cos(\varphi/2)$  в степенной ряд по  $\varphi$  до  $\varphi^3$  включительно. На основании этого найдем радиус кривизны дуги

$$R = \frac{r}{3\delta}. \quad (5)$$

Величина  $\delta l$  в соответствии с законами теплового расширения будет выражена так:

$$\delta l = \beta(T - T_0), \quad (6)$$

где  $\beta$  – температурный коэффициент линейного расширения (полиэтилена), а  $T_0$  – условная температура, при которой длина ОВ равнялась бы длине модуля.

Подставив это значение  $\delta l$  в формулу (5) и взяв производную по температуре, получим

$$\frac{\partial R}{\partial T} = \frac{r}{3\beta(T - T_0)^2}. \quad (7)$$

Зависимость показателя преломления по сечению изогнутого ОВ является достаточно сложной и несколько зависит от поляризации света [1, 5].

Для света с направлением электрического вектора по оси  $OX$  показатель преломления

$$n_x = n + n^3 \left[ \left( \frac{p_{11}}{2} - \mu p_{12} \right) \frac{a^2 - x^2}{2R^2} + (\mu p_{11} + \mu p_{12} - p_{12}) \frac{x}{2R} \right]. \quad (8)$$

Для света с направлением электрического вектора по оси  $OY$  (ось  $OY$  перпендикулярна плоскости, см. рисунок) показатель преломления

$$n_y = n + n^3 \left\{ [p_{12} - (p_{11} + p_{12})\mu] \frac{a^2 - x^2}{4R^2} + (\mu p_{11} + \mu p_{12} - p_{12}) \frac{x}{2R} \right\}. \quad (9)$$

В формулах (8) и (9)  $n$  – показатель преломления ОВ при нормальных условиях,  $p_{11}$  и  $p_{12}$  – коэффициенты Поккельса для фотоупругости,  $\mu$  – коэффициент Пуассона,  $a$  – радиус сердечника волокна, принимаемый за радиус поля моды,  $x$  – координата сечения ОВ, отсчитываемая от оси волокна вверх.

Средние по сечению показатели преломления для моды  $HE_{11x}$  и моды  $HE_{11y}$  имеют вид [9]:

$$n_{xcp} = n + \frac{n^3 a^2}{8R^2} (p_{11} - 2\mu p_{12}), \quad n_{ycp} = n + \frac{n^3 a^2}{8R^2} [p_{12} - \mu(p_{11} + p_{12})]. \quad (10)$$

Поскольку направления изгибов ОВ в модуле случайным образом меняются, то средний показатель преломления примет вид

$$n_{cp} = \frac{n_{xcp} + n_{ycp}}{2} = n + \frac{n^3 a^2 [(1 - \mu)(p_{11} + p_{12})/2 - \mu p_{12}]}{8R^2}. \quad (11)$$

При значениях  $p_{11} = 0,121$ ,  $p_{12} = 0,270$ ,  $\mu = 0,164$  [5] частная производная среднего показателя преломления сердечника ОВ по радиусу изгиба



$$\frac{\partial n_{cp}}{\partial R} = -\frac{0,03n^3 a^2}{R^3}. \quad (12)$$

Таким образом, деформационная составляющая производной показателя преломления сердечника волокна

$$\left(\frac{\partial n}{\partial T}\right)_R = \frac{\partial n_{cp}}{\partial R} \frac{\partial R}{\partial T} = 0,03 \frac{n^3 a^2}{R^2(T_0 - T)}. \quad (13)$$

На основании формулы (13) можно получить следующее: относительное изменение показателя преломления сердечника ОВ, вызванное деформацией изгиба или кручения за счет теплового расширения составляет величину порядка  $10^{-5}$ . Учитывая разброс значений показателя преломления сердечника ОВ различных марок, данная величина составит значения в интервале  $0,8 \cdot 10^{-5} - 10^{-5}$ .

Согласно формуле (2) с учетом формулы (13), получим: изменение показателя преломления сердечника для ОВ различных марок лежит в пределах  $6,8 \cdot 10^{-5} - 7 \cdot 10^{-5}$ . Полученные результаты уточняют значения, представленные в [5], так как охватывают все составляющие изменения показателя преломления.

Рассматривая данные, полученные выше, можно предположить, что при рефлектометрических измерениях длины оптического кабеля или расстояния до места повреждения кабеля от какого-либо из его концов, погрешность измерения будет составлять величину  $0,0045-0,005\%$  на строительную длину, а с увеличением показателя преломления погрешность измерений уменьшается.

## Библиографические ссылки

1. Иванов А. Б. Волоконная оптика: компоненты, системы передачи, измерения. М., 1999.
2. Гринштейн М. Л., Зюзин М. С. Методы анализа измерения ВОЛС при автоматическом мониторинге // LIGHTWAVE russian edition. 2008. № 1.
3. Измерение удлинения оптического волокна при испытании оптического кабеля на стойкость к растягивающей нагрузке / А. А. Марьенков, М. Л. Гринштейн, Е. К. Каменская, В. Н. Деков // LIGHTWAVE russian edition. 2003. № 2.
4. Капанин Н. С. Волоконная оптика. М., 1969.
5. Волоконно-оптические датчики / Т. Окоси, К. Окамото, М. Оцу, Х. Нисихара, К. Кюма, К. Хататэ. Л., 1990.



6. Резак Е. В., Прокопович М. Р. Влияние изгиба на процесс распространения света в оптическом волокне // Труды Пятой международной научной конференции творческой молодежи, 17–19 апреля 2007. Хабаровск, 2007. Т. 4.
7. Стерлинг Д. Дж. Техническое руководство по волоконной оптике. М., 1998.
8. Одномодульные подвесные оптические кабели для широкополосных сетей доступа // LIGHTWAVE russian edition. 2007. № 3.
9. Резак Е. В. Учет температурного влияния при измерении длины оптического волокна в оптическом кабеле // Бюллетень научных сообщений № 13. Хабаровск, 2008.