136

- 4. *Guide systems for telecommunications*. 8th ed. Ed. by V.A. Andreev. Moscow: Hotline Telecom, 2018, 396 p. (In Russian.)
- 5. GOST R 56292-2014 *Cables for signaling and blocking. General specifications.* Moscow: Standartinform, 2015. (In Russian.)
- 6. GOST 31995-2012 Cables for signaling and blocking with polyethylene insulation in a plastic shell. Technical conditions. Moscow: Standardinform, 2014. (In Russian.)
- 7. Grodnev I.I., Sergeichuk K.Y. Shielding equipment and cables. Moscow: Svyazist, 1960, 316 p.
- 8. Kaden G. *Electromagnetic screens in high-frequency engineering and telecommunication technology*. Moscow; Leningrad: Gosenergoizdat, 1957. 326 p. (In Russian.)
- 9. Mikhailov M.I. *Influence of external electromagnetic fields on wire communication circuits and protective measures*. Moscow: Svyazizdat, 1959, 583 p. (In Russian.)
- 10. Mikhailov M.I., Razumov L.D., Sokolov S.A. *Electromagnetic influences on communication structures*. M.: Svyaz, 1979, 264 p. (In Russian.)

Received 26.03.2020

УДК 681.7.068

## МЕТОДЫ ОЦЕНИВАНИЯ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОПТИЧЕСКИХ ВОЛОКНАХ

Алехин И.Н., Дашков М.В., Никулина Т.Г.

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Самара, РФ E-mail: alekhin-pgati@yandex.ru

Рассмотрены вопросы влияния изгибов и вызванных изгибами механических напряжений на срок службы оптического волокна в кабеле. Показано, что распределение радиусов изгиба по длине волокна дает однозначную взаимосвязь с распределением механических напряжений. Представлен сравнительный обзор современных методов, применяемых для контроля механических напряжений в оптических волокнах. Сделано заключение, что для современных оптических волокон, обладающих пониженной чувствительностью к изгибам, наиболее перспективным и доступным в реализации является метод поляризационной рефлектометрии, основанный на анализе информации о распределения двулучепреломления по длине оптического волокна. Определены факторы, приводящие к изменению величины двулучепреломления в процессе эксплуатации оптического волокна. Представлены условия, которые необходимо соблюдать при выполнении оценки распределения двулучепреломления по длине оптического волокна.

*Ключевые слова:* оптическое волокно, надежность, срок службы, избыточная длина, оптический кабель, двулучепреломление, поляризация, механическое напряжение, рефлектометрия

## Введение

Срок службы волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) в значительной степени определяется надежностью оптического волокна (ОВ) в строительных длинах оптического кабеля. Срок службы ОВ зависит от его прочности и от приложенной к ОВ механической нагрузки [1]. В отсутствие внешних нагрузок на кабель механические напряжения в ОВ почти целиком определяются изгибами. Изгибы ОВ в строительных длинах возникают вследствие избыточности ОВ в конструкции кабеля. Избыточная длина ОВ, с одной стороны, ограничивает нагрузки на ОВ при продольных воздействиях на кабель, но, с другой стороны, приводит к многократным изгибам волокна по длине кабеля. Для контроля избыточности ОВ в кабеле и равномерности его распределения выполняется мониторинг избыточности ОВ как в процессе производства оптического модуля, так и после завершения процесса изготовления [2]. Но поскольку избыточность ОВ зависит не только от технологических процессов производства оптического модуля, но и от дальнейших операций, выполняемых с модулем при производстве кабеля, в конечном итоге распределение избыточности ОВ в кабеле, по сравнению с исходным модулем, может стать более нерегулярным. В связи с этим задача оценивания распределения механических напряжений OB, вызванных изгибами на строительных длинах кабеля, не теряет своей актуальности. Основными методами, позволяющими оценивать распределения механических напряжений в ОВ, являются: оптическая рефлектометрия во временной области, бриллюэновская и поляризационная рефлектометрия. В статье представлены обзор указанных методов и сравнительный анализ возможности их применения для оценивания распределений механических напряжений в оптических волокнах, вызванных изгибами OB в кабеле.

# Зависимость срока службы OB от механических нагрузок

Теоретическое значение прочности кварцевого стекла SiO<sub>2</sub>, определяемое прочностью связей компонентов, из которых оно состоит, составляет до 13 ГПа [3], что существенно больше измеряемых на практике значений. В 1920 г. Гриффитом была предложена модель, согласно которой на поверхности стекол присутствует сеть микротрецин. При приложении к образцу ОВ растягивающей нагрузки наблюдается концентрация вокруг вершины такой трещины, и разрыв материала в этой области начинается значительно раньше, чем приложенная сила сравняется с прочностью связей в материале.

Таким образом, из-за неоднородностей материалов в стекле или дефектов на поверхности кварцевого стекла могут встречаться механически слабые места по длине ОВ. Распределения таких нерегулярностей в ОВ могут быть учтены только статистически. Поэтому о механической прочности ОВ можно говорить только с определенной вероятностью. Методы прогнозирования срока службы ОВ кабеля [1] базируются на теории надежности ОВ. При этом могут использоваться различные модели: одностадийная модель, определяющая рост микротрещин под действием приложенной нагрузки; совместное применение одностадийной модели и оценок начальной прочности ОВ, характеризующейся параметрами Вейбулла; двухстадийная модель, учитывающая особенности динамики относительно больших микротрещин.

В отсутствие внешних нагрузок на ОК напряжения в ОВ почти целиком определяются изгибами ОВ. В этом случае срок службы оптического кабеля существенно зависит от значения минимального радиуса изгибов ОВ в кабеле, обусловленных избыточной длиной волокон в кабеле. Известно, что механическую нагрузку на поверхности изогнутого кварцевого волокна можно рассчитать по формуле [4]:

$$\sigma_0 = \frac{E_0 r}{R},$$

где  $E_0$  — величина модуля упругости кварцевого стекла; R — радиус изгиба OB; r — радиус кварцевой оболочки OB. Таким образом, зная распреде-

ление радиусов изгиба по длине OB R(z), можно определить распределение механических напряжений  $\sigma_0(z)$ .

#### Методы, основанные на оптической рефлектометрии во временной области

Один из методов оценивания механических напряжений в OB, вызванных изгибами, основан на анализе характеристик обратного рассеяния. Для условно прямого OB (пренебрегая собственной кривизной) коэффициент затухания в области длин волн 1550 нм определяется явлением рэлеевского рассеяния и имеет зависимость вида

$$\alpha_{pp} = \frac{C}{\lambda^4}$$

где C – коэффициент, определяемый конструктивными особенностями ОВ и материалом;  $\lambda$  – длина волны излучения.

Широкое распространение для распределенных измерений коэффициента затухания ОВ получили оптические рефлектометры, работающие во временной области.

Известно, что изгибы ОВ приводят к возникновению дополнительных потерь, обладающих существенной спектральной зависимостью. В [5] предложен метод измерения распределений радиуса изгиба ОВ, основанный на анализе характеристик обратного рэлеевского рассеяния на разных длинах волн. Расчет распределения коэффициентов затухания ОВ для каждой длины волны производится по формуле [5]:

$$\alpha(z,\lambda_i) = \frac{1}{\Delta z} \left| 5 \lg \left[ \frac{P(z-0,5\Delta z,\lambda_i)}{P(z+0,5\Delta z,\lambda_i)} \right] \right|$$

где  $\lambda_i - i$ -я длина волны;  $P(z,\lambda_i)$  – мощность обратного рассеяния в точке с координатой z;  $\Delta z$  – длина участка, на котором определяется коэффициент затухания;  $\alpha(z,\lambda_i)$  – значение коэффициента затухания оптического волокна на длине волны  $\lambda_i$  в точке с координатой z.

Распределение радиуса изгиба оптического волокна определяется по формуле

$$R(z) = R_c - \Delta \alpha(z, \lambda_i) / \eta(\lambda_i)$$

где R(z) – радиус изгиба оптического волокна в точке с координатой *z*;  $R_c$  – критическое значение радиуса изгиба волокна, при котором дополнительными потерями на изгибе можно пренебречь;  $\eta(\lambda_i)$  – параметр, который зависит от длины волны.

$$\Delta \alpha(z, \lambda_i) = \alpha(z, \lambda_i) - \alpha_c(\lambda_i),$$

где  $\alpha_c(\lambda_i)$  – значение коэффициента затухания оптического волокна на длине волны  $\lambda_i$  при радиусе изгиба  $R \ge R_c$ .

Параметры  $\alpha_c(\lambda_i)$ ,  $R_c, \eta(\lambda_i)$  определяются либо экспериментально, по результатам испытаний, либо в результате вычислений по формулам. Предполагается, что измерения выполняются для ряда длин волн и в результате анализа исключаются изменения коэффициента затухания волокна, не связанные с изгибами. При этом рекомендуется выполнять измерения на более длинных волнах, в частности в диапазоне 1625 нм.

Критический радиус изгиба можно рассчитать по формуле [6; 7]:

$$R_c = \frac{3n_{cl}\lambda}{4\pi (NA)^3}$$

где  $n_{cl}$  – показатель преломления оболочки OB; NA – числовая апертура. Для стандартного одномодового ступенчатого оптического волокна, соответствующего рек. МСЭ-Т G.652, критический радиус изгиба составляет 15 мм. С большой долей вероятности можно полагать, что радиус изгиба OB в оптическом кабеле превышает значение, при котором имеют место осцилляции потерь, обусловленных изгибами. Согласно [6; 7], это значение может быть найдено из формулы

$$R_{th} = 2k_0^2 n_{cl}^2 \frac{r}{w^2},$$

где  $k_0 = 2\pi / \lambda$  – волновое число для свободного пространства; r – радиус оболочки OB;  $w^2 = \beta^2 - k_0^2 n_{cl}^2$  – волновое число оболочки OB;  $\beta$  – постоянная распространения OB.

Расчеты показывают, что для стандартного одномодового ступенчатого оптического волокна  $R_{th} > 30$  мм. Среднее значение радиуса изгиба оптического волокна в модульной трубке, как правило, больше 30 мм. Это позволяет воспользоваться для оценивания дополнительных потерь, обусловленных изгибами, известной формулой Маркузе [7; 8]:

$$2\Delta \alpha = \frac{\sqrt{\pi}k_0^2 \exp\left[-\frac{2}{3}\frac{w^3}{\beta^2}R\right]}{e_v w^{3/2} V^2 \sqrt{R}K_{v-1}(wa)K_{v+1}(wa)},$$
$$e_v = \begin{cases} 2, \quad v = 0, \\ 1, \quad v \neq 0; \end{cases} \quad V^2 = k_0^2 r^2 \left(n_0^2 - n_{cl}^2\right),$$

где r – радиус сердцевины OB;  $n_0, n_{cl}$  – показатели преломления сердцевины и оболочки OB соответственно;  $\beta$  – постоянная распространения моды; w – волновое число оболочки OB;  $K_v(z)$  – модифицированная функция Бесселя второго рода порядка v от аргумента z.

Следует отметить, что в настоящее время на всех уровнях сетей связи массовое применение

получают оптические OB нового поколения, обладающие пониженной чувствительностью к изгибам и соответствующие требованиям рек. МСЭ-Т G.657. Ряд ведущих производителей перешел на изготовление OB, совмещающих достоинства OB рек. G.652 и G.657. Таким образом, для подобных OB данный метод неэффективен.

### Методы бриллюэновской рефлектометрии

Широкое распространение для измерения величины продольной деформации ОВ получили методы, основанные на анализе параметров излучения спонтанного или вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна [9; 10]. Суть данного явления заключается в рассеянии оптического излучения на тепловых колебаниях плотности среды – акустических фононах. При этом для рассеянного излучения наблюдается сдвиг по частоте, определяемый выражением

$$\mathbf{v}_B = 2n_{eff}\mathbf{v}_0\frac{V_a}{c},$$

где  $n_{eff}$  – эффективный показатель преломления; c – скорость света в вакууме; скорость звука в ОВ  $V_a = \sqrt{E / \rho}$ , где E – модуль Юнга;  $\rho$  – плотность кварцевого стекла.

В кварцевых ОВ для стоксовой компоненты частотный сдвиг составляет порядка 11 ГГц при длине волны накачки 1550 нм. Величина частотного сдвига обладает линейной зависимостью от продольной деформации ОВ и температуры [10]:

$$f_B(T,\varepsilon) = C_{\varepsilon}\Delta\varepsilon + C_T\Delta T + f_B(T_0,\varepsilon_0),$$

где  $C_{\varepsilon}$  – коэффициент деформации, МГц/µє;  $C_T$  – температурный коэффициент, МГц/°С;  $\Delta \varepsilon$  – изменение величины деформации относительно исходного  $\varepsilon_0$ ;  $\Delta T$  – изменение температуры относительно исходного значения  $T_0$ .

Можно выделить два базовых класса измерительных приборов на основе данного явления: бриллюэновский рефлектометр временной области BOTDR, в котором используется явление спонтанного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна, и бриллюэновский анализатор временной области BOTDA, в котором применяется явление вынужденного рассеяния Мандельштама – Бриллюэна. В первом случае зондирование OB производится импульсным сигналом с одной стороны и анализируется поток обратного рассеяния с учетом спектральных характеристик.

Во втором случае требуется доступ к двум концам ОВ и используются два сигнала, распространяющихся в противоположных направлениях: импульсный сигнал накачки с перестраиваемой частотой и непрерывный зондирующий сигнал. Используя различные методы и технологии (перестраиваемые по частоте оптические источники, оптические спектроанализаторы, радиочастотные методы и т. д.), в результате измерений получают распределение величины частотного сдвига по длине OB, которое далее может быть пересчитано в распределение продольных деформаций и/или температуры.

Методы бриллюэновской рефлектометрии позволяют оценивать продольные механические нагрузки OB, в то время как для анализа поперечных механических нагрузок и воздействий изгибов данные методы малоэффективны.

#### Методы, основанные на поляризационной рефлектометрии

Известно, что механические напряжения в оптическом волокне приводят к изменению поляризационных характеристик. В частности, в результате эффекта фотоупругости в ОВ наводится дополнительное двулучепреломление и меняется ориентация главных оптических осей [11]. Двулучепреломление, наведенное изгибами, определяется выражением [11]:

$$\beta_b = \frac{1}{2} C_s \left( \frac{r}{R} \right)^2,$$

где r — радиус оптического волокна; R — радиус изгиба OB;  $C_s$  — коэффициент фотоупругости.

Коэффициент фотоупругости определяется выражением [11; 12]

$$C_{s} = \frac{1}{2}k_{0}n_{0}^{3}(p_{11} - p_{12})(1 + v_{p}),$$

где  $k_0 = 2\pi/\lambda$  – по-прежнему постоянная распространения в вакууме;  $n_0$  – среднее значение показателя преломления;  $p_{11}$ ,  $p_{12}$  – коэффициенты Поккельса;  $v_p$  – отношение Пуассона.

Двулучепреломление, наведенное в результате асимметричной поперечной нагрузки, определяется выражением [12]:

$$\beta_f = 4C_s \frac{f}{\pi r E},$$

где f – механическая нагрузка на единицу длины OB;  $C_s$  – коэффициент фотоупругости; r – внешний радиус оптического волокна; E – модуль Юнга.

Таким образом, информация о распределении двулучепреломления по длине ОВ может служить критерием оценки распределения механических нагрузок, и для решения данной задачи могут быть использованы методы поляризационной рефлектометрии [13–18].



Рисунок. Схема оптического поляризационного рефлектометра

Для измерения протяженных участков OB (более 2 км) применяется поляризационная рефлектометрия во временной области POTDR. Схема POTDR отличается от схемы стандартного оптического рефлектометра наличием поляризационного анализатора перед фотоприемником POTDR. В качестве поляризационного анализатора применяют линейный поляризатор, поляризационный расщепитель с четверть-волновой пластиной или интегральный анализатор параметров Стокса, так как зачастую требуется измерять поляризационную характеристику при различных состояниях поляризации. На рисунке представлена одна из возможных схем POTDR.

Принцип работы заключается в зондировании ОВ оптическими импульсами заданной длительности, формируемыми лазерным диодом (ЛД). Дополнительно может быть установлен поляризатор для обеспечения линейной поляризации зондирующего сигнала. При распространении оптического импульса в ОВ излучение рассеивается на флуктуациях показателя преломления (рэлеевское рассеяние) и часть рассеянного излучения возвращается в обратном направлении. Поток обратного рассеяния проходит через контроллер поляризации КП и линейный поляризатор, выступающий в роли анализатора, и в фотодетекторе ФД преобразуется в электрический сигнал. Обработка полученных характеристик производится в блоке управления и математической обработки БУМО. Применение контроллера поляризации позволяет получить полную информацию о состоянии поляризации излучения. Полученные таким образом поляризационные характеристики обратного рассеяния содержат информацию о двулучепреломлении исследуемого ОВ [18]. В [12-17] были рассмотрены методы оценки распределения двулучепреломления по результатам анализа характеристик обратного рассеяния. Устройство и принцип работы различных модификаций поляризационных рефлектометров описаны в патентах [19-22].

Для того чтобы оценить распределение двулучепреломления по длине OB, должны быть соблюдены следующие условия:  пространственное разрешение, определяемое длительностью зондирующего импульса, должно быть как минимум сопоставимо с длиной участка, подверженного воздействию (что приводит к целесообразности использования импульсов не более 10 нс);

 отношение «сигнал-шум» характеристики обратного рассеяния должно обеспечивать запас, необходимый для выявления характерных биений (для требуемой точности, соответствующей типовым значениям наведенного двулучепреломления, требуется порядка 6–8 дБ);

 нужно восстановить полную информацию о распределении состояния поляризации излучения обратного рассеяния по длине волокна;

 необходимо учесть влияние как наведенного механическими нагрузками двулучепреломления, так и изменения ориентации главных осей двулучепреломления.

#### Заключение

В работе приведен сравнительный обзор методов оценивания распределения механических напряжений в оптических волокнах, вызванных, в частности, изгибами ОВ в модуле оптического кабеля. Сделаны выводы о потенциальных возможностях применения для решения данной задачи поляризационной рефлектометрии. Сформулированы общие требования к методике измерения поляризационных характеристик обратного рассеяния.

Исследование проводится при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-38-00505 мол\_а.

#### Литература

- 1. TIA/EIA-455-31-C. FOTP-31. Proof Testing Optical Fiber by Tension, 2005. 24 p.
- Об избыточной длине ОВ в оптическом кабеле / Б.В. Авдеев [и др.] // Фотон-Экспресс. 2003. № 6. С. 8–14.
- Griffioen W. Optical fiber mechanical reliability. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1995. 224 c.
- 4. Matthewson M.J., Kurkjian Ch.R. Strength measurement of optical fibers by bending // Journal Amer. Ceram. Soc. 1986. № 11 (69). P. 815–821.
- Distributed fiber bend and stress measurement for determining optical fiber reliability by multiwavelength optical reflectometry: patent US 2014/0362367 A1; pub. date 11.12.2014. 15 p.
- Investigation of bending loss in a single-mode optical fibre / A. Zendehnam [et al.] // Pramana Journal of Physics. 2010. № 4. P. 591–603. DOI: 10.1007/s12043-010-0052-5.

- Burdin V.A. Methods of optical fiber curvature measurement on loose-tube optical cable delivery length // Proc. SPIE. 2015. № 9807. P. 98071A-1–7. DOI: 10.1117/12.2234631.
- Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers // J. Opt. Soc. Am. 1976. Vol. 66. № 3. P. 216–220. DOI: 10.1364/JOSA.66.000216.
- Bao X., Chen L. Recent Progress in Brillouin Scattering based fiber sensors // Sensors. 2011. № 11. P. 4152–4187. DOI: 10.3390/s120708601.
- Galindez-Jamioy C.A., L'opez-Higuera G.M. Brillouin distributed fiber sensors: An overview and applications // Journal of Sensors. 2012. P. 1–17. DOI: 10.1155/2012/204121.
- Ulrich R., Rashleigh S.C., Eickhoff W. Bending-induced birefringence in single-mode fibers // Opt. Lett. 1980. Vol. 5. P. 273–275. DOI: 10.1364/OL.5.000273.
- Rashleigh S.C. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers // Journal of Lightwave Technology. 1983. № 1 (2). P. 312–331. DOI: 10.1364/LAOP.2014.LTu1A.1.
- Rogers A.J. Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions // Appl. Opt. 1981. Vol. 20. P. 1060–1074. DOI: 10.1117/12.959037.
- Ellison J.G., Siddiqui A.S. A fully polarimetric optical time-domain reflectometer // IEEE Photon. Technol. Lett. 1998. Vol. 10. P. 246–248. DOI: 10.1109/CLEO.1998.676453.
- Fully distributed polarization properties of an optical fiber using the backscattering technique / M. Wuilpart [et al.] // Proc. SPIE. 2000. Vol. 4087. P. 396–404.
- Shatalin S.V., Rogers A.J. Location of high PMD sections of installed system fiber // Journal of Lightwave Technology. 2006. Vol. 11. № 24. P. 3875–3881.
- 17. Burdin V.A. The method for a measurement of the excess fiber length on the cable delivery length by using the polarization reflectometry // Proc. SPIE. 2016. № 10342. P. 103421E-1-8. DOI: 10.1117/12.2270791.
- Hartog A.H., Payne D.N., Conduit A.J. Polarisation optical-time-domain reflectometry: experimental results and application to loss and birefringence measurements in single-mode optical fibers // 6th European conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC). York UK. 1980. P. 4.
- 19. Polarization-OTDR for measuring characteristics of optical fibers: patent US 6,724,469 B2; date of patent 20.04.2004. 14 p.

- 20. Polarized lightwave reflectometry method (POTDR): Patent US 7,126,678 B2; date of patent 24.10.2006.
- 21. Polarization optical time domain reflectometer and method of determining PMD: Patent US 7920,253 B2; date of patent 05.04.2011. 18 p.
- Devices and methods for characterization of distributed fiber bend and stress: Patent US 2016/0123837 A1; pub. date 05.05.2016. 77 p.

Получено 17.03.2020

Алехин Иван Николаевич, к.т.н., доцент кафедры линии связи и измерения в технике связи (ЛС и ИТС) Поволжского государственного университета телекоммуникаций и информатики (ПГУТИ). 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-66. E-mail: alekhin-pgati@yandex.ru

**Дашков Михаил Викторович,** к.т.н., доцент кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-66. E-mail: mvd.srttc@gmail.com

Никулина Татьяна Геннадьевна, к.т.н., доцент кафедры ЛС и ИТС ПГУТИ. 443010, Российская Федерация, г. Самара, ул. Л. Толстого, 23. Тел. +7 846 228-00-66. E-mail: ntg81@list.ru

## METHODS FOR ESTIMATING THE MECHANICAL STRESSES DISTRIBUTION IN OPTICAL FIBERS

Alekhin I.N., Dashkov M.V., Nikulina T.G. Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, Samara, Russian Federation E-mail: alekhin-pgati@yandex.ru

The article considers the effect of bends and mechanical stresses caused by bending on the service life of optical fiber in the cable. It is shown that the bends distribution along the fiber length provides an unambiguous relationship with the distribution of mechanical stresses. A comparative review of modern methods used to control mechanical stresses in optical fibers is presented. The conclusion is drawn that the most promising and inexpensive method to implement for modern single-mode bend-insensitive fibers is the polarization reflectometry based on the analysis of information on the birefringence distribution along the optical fiber length. The factors leading to a change in the magnitude of birefringence during the operation of the optical fiber are determined. The conditions that are necessary to observe when measuring the birefringence distribution along the optical fiber length are presented.

*Keywords:* optical fiber, reliability, service life, excess length, optical cable, birefringence, polarization, mechanical stress, reflectometry

## **DOI:** 10.18469/ikt.2020.18.2.03

**Alekhin Ivan Nikolaevich,** Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD in Technical Science, Assistant Professor. Tel. +7 846 228-00-66. E-mail: alekhin-pgati@yandex.ru

**Dashkov Michael Viktorovich,** Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD in Technical Science, Assistant Professor. Tel. +7 846 228-00-66. E-mail: mvd.srttc@gmail.com

**Nikulina Tatyana Gennadyevna,** Povolzhskiy State University of Telecommunication and Informatics, 23, L. Tolstoy Street, Samara, 443010, Russian Federation; PhD in Technical Science, Assistant Professor. Tel.+7 846 228-00-66. E-mail: ntg81@list.ru

## References

- 1. TIA/EIA-455-31-C. FOTP-31. Proof Testing Optical Fiber by Tension. TIA/EIA Publ. 2005.
- 2. Avdeyev B.V. et al. On the excess length of optical fiber in an optical cable. *Foton Express*, 2003, vol. 32, no. 6, pp. 8–14. (In Russian.)

- 3. Griffioen W. *Optical fiber mechanical reliability*. Eindhoven: Technische Universiteit Eindhoven, 1995. 224 p.
- 4. Matthewson M.J., Kurkjian Ch.R. Strength measurement of optical fibers by bending. *J. Amer. Ceram. Soc.*, 1986, vol. 69, no. 11, pp. 815–821.
- 5. Chen H., Chen X., Yao X.S. *Distributed fiber bend and stress measurement for determining optical fiber reliability by multi-wavelength optical reflectometry*. Patent US, no. US 2014/0362367 A1, 2014.
- 6. Zendehnam A. et al. Investigation of bending loss in a single-mode optical fibre. *Pramana Journal of Physics*, 2010, vol. 74, no. 4, pp. 591–603. DOI: 10.1007/s12043-010-0052-5.
- 7. Burdin V.A. Methods of optical fiber curvature measurement on loose-tube optical cable delivery length. *Proc. SPIE*, 2015, vol. 9807, pp. 98071A-1–7. DOI: 10.1117/12.2234631.
- 8. Marcuse D. Curvature loss formula for optical fibers. *J. Opt. Soc. Am.*, 1976, vol. 66, no. 3, pp. 216–220. DOI: 10.1364/JOSA.66.000216.
- 9. Bao X., Chen L. Recent Progress in Brillouin Scattering Based Fiber Sensors. *Sensors*, 2011, no. 11, pp. 4152–4187. DOI: 10.3390/s120708601.
- 10. Galindez-Jamioy C.A., L'opez-Higuera G.M. Brillouin distributed fiber sensors: An overview and applications. *Journal of Sensors*, 2012, pp. 1–17. DOI: 10.1155/2012/204121.
- 11. Ulrich R., Rashleigh S.C., Eickhoff W. Bending-induced birefringence in single-mode fibers. *Opt. Lett.*, 1980, no. 5, pp. 273–275. DOI: 10.1364/OL.5.000273.
- 12. Rashleigh S.C. Origins and control of polarization effects in single-mode fibers. *Journal of Lightwave Technology*, 1983, vol. 2, no. 1, pp. 312–331. DOI: 10.1364/LAOP.2014.LTu1A.1.
- 13. Rogers A.J. Polarization-optical time domain reflectometry: a technique for the measurement of field distributions. *Appl. Opt.*, 1981, no. 20, pp. 1060–1074. DOI: 10.1117/12.959037.
- 14. Ellison J.G., Siddiqui A.S. A fully polarimetric optical time-domain reflectometer. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1998, no 10, pp. 246–248. DOI: 10.1109/CLEO.1998.676453.
- 15. Wuilpart M. et al. Fully distributed polarization properties of an optical fiber using the backscattering technique. *Proc. SPIE*, 2000, vol. 4087, pp. 396–404.
- 16. Shatalin S.V., Rogers, A.J. Location of high PMD sections of installed system fiber. *Journal of Lightwave Technology*, 2006, vol. 24, no. 11, pp. 3875–3881.
- 17. Burdin V.A. The method for a measurement of the excess fiber length on the cable delivery length by using the polarization reflectometry. *Proc. SPIE*, 2016, vol. 10342, pp. 103421E-1–8. DOI: 10.1117/12.2270791.
- Hartog A.H., Payne D.N., Conduit A.J. Polarization optical-time-domain reflectometry: experimental results and application to loss and birefringence measurements in single-mode optical fibres. 6th European conference and Exhibition on Optical Communication (ECOC), UK, 1980, 4 p.
- 19. Leblanc M. Polarization-OTDR for measuring characteristics of optical fibers. Patent US, no. US 6,724,469 B2, 2004.
- 20. Fayolle Ph. et al. Polarized lightwave reflectometry method (POTDR). Patent US, no. US 7,126,678 B2, 2006.
- 21. Cyr N., Chen H. Polarization optical time domain reflectometer and method of determining PMD. Patent US, no. US 7920,253 B2, 2011.
- 22. Chen H., Chen X., Yao X.S. Devices and methods for characterization of distributed fiber bend and stress. Patent US, no. US 2016/0123837 A1, 2016.

Received 17.03.2020