

УДК 621.396

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СРОКА СЛУЖБЫ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ, ЭКСПЛУАТИРУЮЩИХСЯ В УСЛОВИЯХ НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР

© 2014 А.А. Воронков, И.Н. Алехин

Поволжский государственный университет телекоммуникаций и информатики

Поступила в редакцию 04.12.2014

В статье рассмотрена технология прогноза срока службы оптического кабеля с учетом приложенной к оптическим волокнам нагрузки в условиях низких отрицательных температур. Показано, что даже незначительные деформации модульных трубок оптического кабеля, эксплуатирующегося при температурах до -50°C могут привести к существенному сокращению срока службы оптического кабеля.

Ключевые слова: *оптический кабель, усталостное разрушение, механические характеристики*

Технология строительства волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП) с использованием подвесных оптических кабелей (ОК) на сегодняшний день получила широкое применение, поскольку обладает рядом преимуществ по сравнению с технологией прокладки ОК в грунт и канализацию: при строительстве подвесных ВОЛП с использованием опор различных линий электропередач (ЛЭП) отсутствует необходимость согласований по отводам земель, а также вопросы согласований с различными ведомствами по пересечению ВОЛП с трубопроводами и другими объектами, поскольку ЛЭП имеет охранную зону. Уже сегодня затраты на землеотводы составляют большую часть от стоимости линейно-кабельных сооружений. По прогнозам, в перспективе эта тенденция будет только возрастать. Помимо этого, строительство подвесных ВОЛП позволяет снизить количество повреждений на участках городской застройки и промышленных зон, а также уменьшить капитальные и эксплуатационные затраты в районах с тяжелыми грунтами.

Строительство подвесных ВОЛП, как правило, осуществляется быстрее по сравнению со строительством подземных линий связи, что для некоторых регионов Российской Федерации может иметь существенное значение. Например, в районах крайнего Севера выполнение монтажных работ можно проводить только зимой, так как в летнее время районы вечной мерзлоты превращаются в болото. При этом температура в данных регионах зимой опускается значительно ниже -10°C . Более того, в процессе технического обслуживания кабельных линий эксплуатирующие

организации нередко вынуждены выполнять ремонтные работы в зимних условиях при низких отрицательных температурах на значительной территории нашей страны.

Разработка новых, стойких к низким температурам материалов, совершенствование конструкций ОК позволили производителям кабелей создать изделия, допускающие их прокладку и монтаж при низких отрицательных температурах, однако на сегодняшний день нормативная документация по прокладке и монтажу ОК при низких отрицательных температурах отсутствует. Допустимые нагрузки на ОК определяются техническими условиями на кабель, но для обеспечения эффективного функционирования ВОЛП в процессе эксплуатации необходима разработка новых технологических приемов прокладки и монтажа ОК, учитывающих изменения свойств кабеля при низких температурах и обеспечивающих ограничение нагрузок на кабель допустимыми для его последующей надежной работы. Отсюда следует актуальность проблемы исследования и разработки методов прокладки и монтажа самонесущих оптических кабелей при низких температурах. В статье особое внимание будет уделено прогнозированию срока службы ОК, подвешенных на опорах контактных сетей и линий электропередачи.

Срок службы ОК линии передачи определяется сроком службы оптического волокна (ОВ) в его конструкции в условиях эксплуатации. В свою очередь, срок службы ОВ во многом определяется процессами усталостного разрушения и существенно зависит от приложенной к нему нагрузки [1-8], которая зависит от конструкции кабеля и внешних условий, в частности, от температуры окружающей среды. По завершении строительства линии передачи могут иметь место остаточные деформации модульных трубок ОК. Такие деформации создают условия

Воронков Андрей Андреевич, кандидат технических наук, профессор кафедры линий связи и измерений в технике связи. E-mail: voronkov@srffc.ru

Алехин Иван Николаевич, кандидат технических наук. E-mail: alekhin-pgati@yandex.ru

для увеличения напряжения в волокнах кабеля при низких отрицательных температурах и, как следствие, снижение срока службы ОК при эксплуатации ВОЛП.

Технология прогноза срока службы ОК с учетом приложенной к ОВ нагрузки. В основе методов прогноза срока службы ОВ лежат статические модели механических напряжений в стекле и кинетические модели роста дефектов. При выборе модели роста дефектов необходимо исходить из следующих положений. Предполагают, что в процессе эксплуатации ВОЛП в ОК и ОВ действуют только статические нагрузки и весь исследуемый период срока службы ОК разбивают на интервалы времени, в течение которых нагрузку на ОВ можно считать постоянной. Это позволило на каждом отдельном интервале времени применить двухстадийную механическую модель.

$$\sigma_j(t_{\max})^{N_i-2} = \sigma_j(t_{\min})^{N_i-2} - \frac{t_{\max} - t_{\min}}{B_i} \sigma_{aj}^{N_i}$$

$$\begin{cases} i = 1, \sigma_{aj}(t) / \sigma(t) < r \\ i = 2, \sigma_{aj}(t) / \sigma(t) \geq r \end{cases} \quad (1)$$

где B_i – константа, учитывающая параметры статической усталости волокна для соответствующих условий окружающей среды, коэффициент интенсивности напряжений и геометрию дефекта на i -ой стадии; N_i – параметр статической усталости кварцевого ОВ на i -ой стадии; σ_{aj} – нагрузка, приложенная к оптическому волокну, на j -ом интервале времени; $\sigma_j(t)$ – прочность ОВ на момент времени t на j -ом интервале времени.

Типичные значения параметров кварцевых ОВ приведены в таблице 1 [4, 8].

Таблица 1. Значения параметров кварцевых ОВ

Параметр	Значение
уровень напряжений при испытаниях на разрыв, ГПа	0,7
пределы изменений N_1	18 – 25
среднее значение N_1	21
среднее значение N_2	4,5
r	0,645
B_1 , ГПа ² ·С	$4,5 \times 10^{-5}$
B_2 , ГПа ² ·С	0,0082

Задавая исходную (инертную) прочность ОВ, вектора σ_{aj} , $t_{\min j}$, $t_{\max j}$ рассчитывали прочность ОВ в конце каждого интервала времени. Полагая, что ОВ разрушается при условии [9]:

$$\sigma_j(t) \leq \sigma_{aj}$$

Таким образом, на основе итерационного подхода определяли ожидаемый срок службы ОВ.

Известно [10], что ОВ в модулях ОК расположено по геликоиде и его радиус кривизны определяется минимальным диаметром модульной трубки и разностью длин волокна и модуля. Изогнутое ОВ находится под напряжением. Механическую нагрузку на поверхности изогнутого кварцевого волокна можно рассчитать по формуле [11]:

$$\sigma_0 = E_0 \cdot (1 + 2.875 \cdot \chi) \cdot \chi \quad (2)$$

где $\chi = b / (R + b + h)$ – деформация растяжения наружного слоя кварцевого волокна; E_0 – величина модуля упругости кварцевого стекла при $\chi \rightarrow 0$, равная 7,4 ГПа; R – радиус изгиба волокна; b – радиус волокна; h – толщина защитного покрытия.

Для определения среднего значения радиуса изгиба ОВ в модулях ОК были взяты результаты [12, 13]. В первом приближении эту величину можно оценить как $R \approx d_m / (2\delta l)$ [13] или $R \approx d_m / (3\delta l)$, где d_m – внутренний диаметр модульной трубки, а δl – оценка относительного удлинения ОВ.

$$R = \frac{d_m}{1 - \cos(\theta/2)} \quad (3)$$

где угол θ определяется при решении уравнения:

$$1 - 2 \cdot \sin(\theta/2) / \theta = \delta l \quad (4)$$

Оценка относительного удлинения из-за изменения температуры рассчитывается по формуле [10, 12, 13]:

$$\delta T = \Delta \alpha \cdot \Delta T \quad (5)$$

где $\Delta \alpha = (\alpha_T - \alpha_{00})$ – разность температурных коэффициентов линейного расширения материала модульной трубки α_T и ОВ α_{00} ; $\Delta T = (T - T_0)$ – разность между текущим значением температуры T и некоторым условным значением температуры T_0 , при которой длина ОВ равнялась бы длине модульной трубки.

Согласно [12] при нормальной температуре среднее значение относительного удлинения равно

$$\delta l_0 = 0.5 \pi^2 d_0^2 / p^2 \quad (6)$$

где d_0 – диаметр модульной трубки по техническим условиям; p – среднее значение шага геликоида волокна в модульной трубке.

Статистические исследования показали, что это значение лежит в пределах от 20 до 100 мм [12]. Соответственно, результирующее значение при температуре T определяется как сумма:

$$\delta l = \delta l_0 + \delta T \quad (7)$$

Если в результате внешних механических воздействий на ОК он был деформирован, а по завершении воздействий имеют место остаточные деформации модульных трубок, то при оценивании напряжений ОВ в модуле при изменении температуры минимальный диаметр модульной трубки определяется приблизительно как разность исходного диаметра модульной трубки по техническим условиям d_0 и ее остаточной деформации Δ_m : $d_m = d_0 - \Delta_m$. На графике (рис. 1) представлены оценки напряжений на поверхности оптического волокна в зависимости от температуры окружающей среды и остаточной деформации модульных трубок в %.

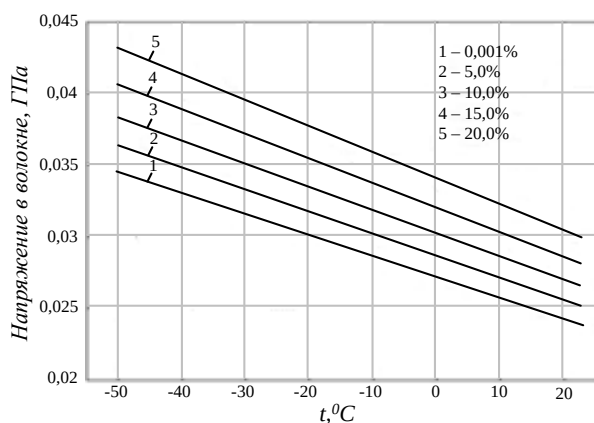
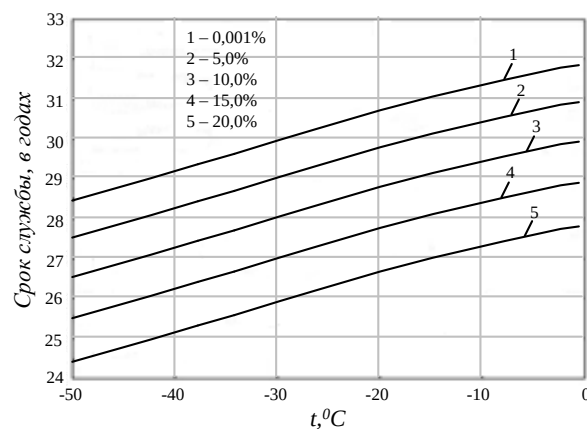
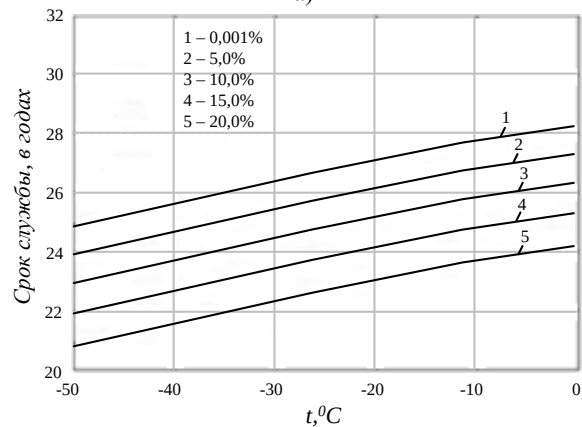


Рис. 1. Графики зависимости напряжений в ОВ от температуры окружающей среды и остаточных деформаций модуля ОК

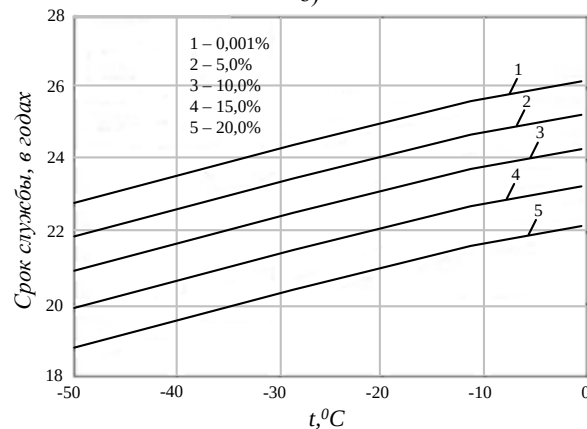
Влияние остаточных деформаций модулей и температуры окружающей среды на срок службы ОК ВОЛП. Описанная технология позволяет строить имитационные модели, учитывающие архивные данные среднемесячных температур в районе, где предполагается прокладка кабеля. В данной работе в целях исследования влияния низких отрицательных температур в сочетании с деформациями модулей на срок службы ОК в условиях эксплуатации полагали, что в зимний период температура постоянна и равна некоторому значению, для которого и выполнялся расчет. Результаты вычислений представлены на рис. 2. На рис. 2а представлены результаты расчетов для гипотетического примера в предположении, что исходная (инертная) прочность ОВ соответствует уровню напряжений при испытаниях его на разрыв. Конечно же, это маловероятно, тем более, если кабель подвергался воздействиям, которые привели к деформациям модульных трубок. На рис. 2б и рис. 2в представлены результаты прогнозов для случаев, когда при изготовлении ОК и в процессе строительства инертная прочность ОВ снижается на 20% и на 30%, соответственно.



а)



б)



в)

Рис. 2. Графики зависимости срока службы ОК от температуры

В первом случае срок службы кабеля менее 25 лет имеет место только при средней температуре в зимний период ниже минус 50 $^\circ\text{C}$ и деформациях модуля более 15%. При снижении исходной прочности ОВ на 20% срок службы кабеля менее 25 лет прогнозируется уже при средней температуре в зимний период ниже минус 30 $^\circ\text{C}$ и деформациях более 5%. При деформациях более 10% срок службы ОК менее 25 лет для всех отрицательных значений средней температуры в зимний период. При снижении исходной прочности на 30% даже незначительные деформации модуля приводят к сокращению срока службы кабеля менее 25 лет для всех отрицательных значений температуры в зимний

период. А при средних значениях температуры зимой ниже минус 20°C прогнозируемый срок службы не превышает 25 лет даже для кабеля с недеформированными модулями.

В целом следует отметить, что деформации модуля до 20% сокращают срок службы кабеля до 4 лет и эта величина практически не зависит от исходной прочности ОВ и температуры, при которой эксплуатируется ОК. Результаты моделирования подтвердили, что одним из наиболее существенных факторов, определяющих срок службы ОК, является исходная прочность ОВ. Показано, что при внешних воздействиях на ОК в процессе строительства и монтажа, приводящих к деформациям модулей и снижению инертной прочности ОВ, даже незначительные деформации модульных трубок могут привести к существенному сокращению срока службы ОК, эксплуатируемых в зимний период при температурах ниже минус 30°C.

Выводы:

1. В результате исследований деформаций модулей ОК при раздавливающих нагрузках показано, что критическая деформация модулей практически линейно зависит от площади свободного пространства в модуле.

2. Разработана технология прогноза срока службы ОК в условиях низких отрицательных температур, согласно которой получены зависимости срока службы кабеля от сезонных колебаний температуры и деформаций модулей ОК.

3. Показано, что даже незначительные деформации модульных трубок кабеля могут привести к существенному сокращению срока службы ОК, эксплуатируемых в зимний период при температурах до -50°C и ниже.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. *Matthewson, M.J.* Optical fiber reliability models // SPIE Critical Review. V. CR50, 1994. P. 3-31.
2. *Glaesemann, G.S.* Advancements in Mechanical Strength and Reliability of Optical Fibers // SPIE Critical Review. 1999. V. CR73. P. 1-23.
3. *Matthewson, M.J.* Optical fiber mechanical testing techniques // SPIE Critical Review. 1994. V. CR50. P. 32-59.
4. *Hanson, T.A.* Incorporating multi-region crack growth into mechanical reliability predictions for optical fibers / *T.A. Hanson, G.S. Glaesemann* // Journal of materials science. 1997. V. 32. P. 5305-5311.
5. *Semjonov, S.L.* Influence of recent high-speed strength testing data on the concept of reliability of optical fiber in telecommunication line / *S.L. Semjonov, M.M. Bubnov* // SPIE Proceedings. 2000. V. 4083. P. 8-15.
6. *Semjonov, S.L.* Concept of reliability of optical fibers // SPIE Proceedings. 2002. V. 4639. P. 1-10.
7. *Glaesemann, G.S.* High speed strength testing of optical fiber / *G.S. Glaesemann, D.A. Clark, T.A. Hanson, D.J. Wissuchek* // Corning Inc. 2003. 14831. P. 12-15.
8. *Semjonov, S.L.* High-speed tensile testing of optical fibers – new understanding for reliability prediction / *S.L. Semjonov, G.S. Glaesemann* // Berlin: Springer, Micro- and Opto-Electronic Materials and Structures: Physics, Mechanics, Design, Reliability, Packaging. 2007. V. 1. P. 595-626.
9. Minimum Optical Fiber Bend Radius // Corning AEN 21 (Revision 4), 2002. P. 3-6.
10. *Воронков, А.А.* Внедрение технологии прогнозирующего контроля при техническом обслуживании ВОЛП / *А.А. Воронков, Л.Н. Шафигуллин* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2011. Том 13, №4(4). С. 1072-1074.
11. *Воронков, А.А.* Оценка изменения качества передачи вследствие деформации конструкции оптического кабеля при низкой температуре / *А.А. Воронков, И.Н. Алехин* // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2012. Том 14, №1(2). С. 533-536.
12. *Stuefflotten, S.* Low temperature excess loss of loose tube fiber cables // Applied optics. 1982. V. 21, No23. P. 4300-4307.
13. *Резак, Е.В.* Учет погрешности измерения длины оптического волокна / *Е.В. Резак, М.Р. Прокопович* // Вестник ТОГУ. 2008. Т. 4, №11. С. 167-172.

FORECASTING THE SERVICE LIFE OF COMMUNICATION OPTICAL CABLES WHICH ARE OPERATED IN THE CONDITIONS OF LOW TEMPERATURES

© 2014 А.А. Voronkov, I.N. Alyokhin

Volga Region State University of Telecommunications and Informatics

In article the technology of forecasting of service life of optical cable taking into account the loading attached to optical fibers in the conditions of low negative temperatures is considered. It is shown, that even insignificant deformations of modular tubes of the optical cable which is operated at temperatures to - 50°C can lead to essential reduction of optical cable service life.

Key words: optical cable, fatigue failure, mechanical characteristics

Andrey Voronkov, Candidate of Technical Sciences, Professor at the Department of Communication Lines and Measurement in Communication Technology. E-mail: voronkov@srttc.ru ; Ivan Alyokhin, Candidate of Technical Sciences. E-mail: alekhin-pgati@yandex.ru