

СРОКИ СЛУЖБЫ ОПТИЧЕСКИХ КАБЕЛЕЙ. АНАЛИЗЫ. РИСКИ

УДК 621.391

А.Ю. Тсым, Head of Laboratory of FGUP TSNIIS, Dr. Sc. (Engineering), Senior Research Scientist, Professor of "Future-Proof Telecommunication Technologies and Services" Department of MTUSI, Honorary Worker of the RF Communication Industry

А.Ю. Цым, начальник лаборатории ФГУП ЦНИИС, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, профессор базовой кафедры «Перспективные телекоммуникационные технологии и услуги» МТУСИ, Заслуженный работник связи Российской Федерации

The article is devoted to the memory of Yu.T. Larin.

Статья посвящается памяти Ю.Т. Ларина

Аннотация. Рассмотрены традиционные показатели (гамма-процентный и назначенный сроки службы) и критерии (физический и моральный износ) долговечности кабелей. Введён новый критерий долговечности для оптических кабелей российской информационной инфраструктуры – несопоставимый риск потери связности сети. Показана исключительная важность задания в нормативной правовой документации параметров предельного состояния ОК. Приведены теоретические модели «старения» оптических волокон и кабелей. Предложены меры по обеспечению долговечности ОК и сделан вывод о необходимости аудита ОК в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: оптическое волокно, оптический кабель, срок службы, предельное состояние, сеть связи, интенсивность отказов, аудит.

Abstract. The traditional indicators (gamma-percent and assigned service life) and criteria (physical and moral wear) of cable durability are considered. A new criterion of durability for optical fiber cables (OC) of the Russian information infrastructure has been introduced - the disproportionate risk of loss of network connectivity. The critical importance of setting parameters of the ultimate state of OC in the normative legal documentation is shown. Theoretical models of the "aging" of optical fibers and cables are presented. Measures to ensure the durability of OC are proposed and a conclusion is drawn on the need to audit OC during operation.

Key words: optical fiber, optical fiber cable, lifetime, limit state, communication network, failure rate, audit.

*Материал поступил в редакцию 23.03.2020
E-mail: 4639528@mail.ru*

Срок службы (useful lifetime, lifetime – англ.). Рассмотрим основные показатели и критерии долговечности оптических кабелей (ОК). К показателям долговечности относят: гамма-процентный срок службы, исчисляемый как календарная продолжительность от начала эксплуатации ОК, в течение которой он не достигнет предельного состояния с заданной вероятностью γ , выраженной в процентах, и назначенный срок службы – длительность эксплуатации ОК, при достижении которой применение ОК по назначению должно быть прекращено.

Традиционные критерии долговечности: физический износ – техническое состояние ОК, при котором дальнейшая его эксплуатация нецелесообразна, так как затраты на ремонт превышают доход от его использования, моральный износ – несоответствие параметров ОК современным условиям его эксплуатации.

При помощи этих показателей и критериев определяются предельный и соответственно остаточный срок службы оптического кабеля. Одним из аспектов идентификации ОК как объекта определения остаточ-



ного срока службы является установление: ведёт или не ведёт к катастрофическим последствиям переход ОК в предельное состояние. С этим свойством связан выбор показателя долговечности: среднего или гамма-процентного срока службы.

Критерием свойства «не ведёт к катастрофическим последствиям» является переход в предельное состояние без опасности для жизни и здоровья людей, при незначительных или умеренных экономических потерях. В этом случае оценивается средний срок службы.

Из вышесказанного видно, какое значение приобретает официальное определение «предельного состояния». Предельное состояние определяется по совокупности признаков, установленных в нормативной документации. Важно подчеркнуть, что в настоящее время ни компании-операторы, ни администрация связи не приступили к разработке нормативной правовой документации, регламентирующей предельное состояние оптических кабелей.

Особенности российской информационной инфраструктуры заключаются в том, что, во-первых, основные магистральные волоконно-оптические линии передачи (ВОЛП) были построены в относительно короткий промежуток времени около 25 лет назад, и, во-вторых, их топология ограничивает возможности резервирования. Эти обстоятельства показали необходимость введения нового критерия долговечности: ведёт или не ведёт переход ОК в предельное состояние к несоразмерному риску потери связности сети. С учётом этого критерия в качестве показателя долговечности ОК следует установить гамма-процентный срок службы.

Таким образом, согласно классификации теории надёжности, оптический кабель – объект конкретного назначения вида II – в процессе эксплуатации может находиться более чем в двух состояниях: работоспособном, неработоспособном, частично работоспособном (при частичных отказах); непрерывного длительного применения, восстанавливаемый, обслуживаемый, стареющий, с заданной гамма-процентной вероятностью срока службы.

Срок службы кабелей с полиэтиленовой защитной оболочкой. Кинетика старения полиэтилена (ПЭ) характеризуется уравнением [2]:

$$T_{HO} = k\tau + T_{HO}^{ИСХ},$$

где k – константа скорости изменения T_{HO} ;
 τ – время старения;
 T_{HO} – специальный параметр на графике энтальпия/температура при постоянной скорости нагрева проб изоляции (оболочки) в термогравиметрическом анализаторе.

Расчёт остаточного срока службы ОК производится по формуле:

$$\tau_{OCT} = \frac{T_{HO}^q - T_{HO}^{ДОП}}{T_{HO}^{ИСХ} - T_{HO}^q} \tau_q,$$

где τ_{OCT} – остаточный срок службы ОК от момента диагностирования;
 τ_q – срок службы ОК до момента диагностирования;
 $T_{HO}^{ИСХ}, T_{HO}^q, T_{HO}^{ДОП}$ – исходное, текущее и допустимое значение параметра T_{HO} .

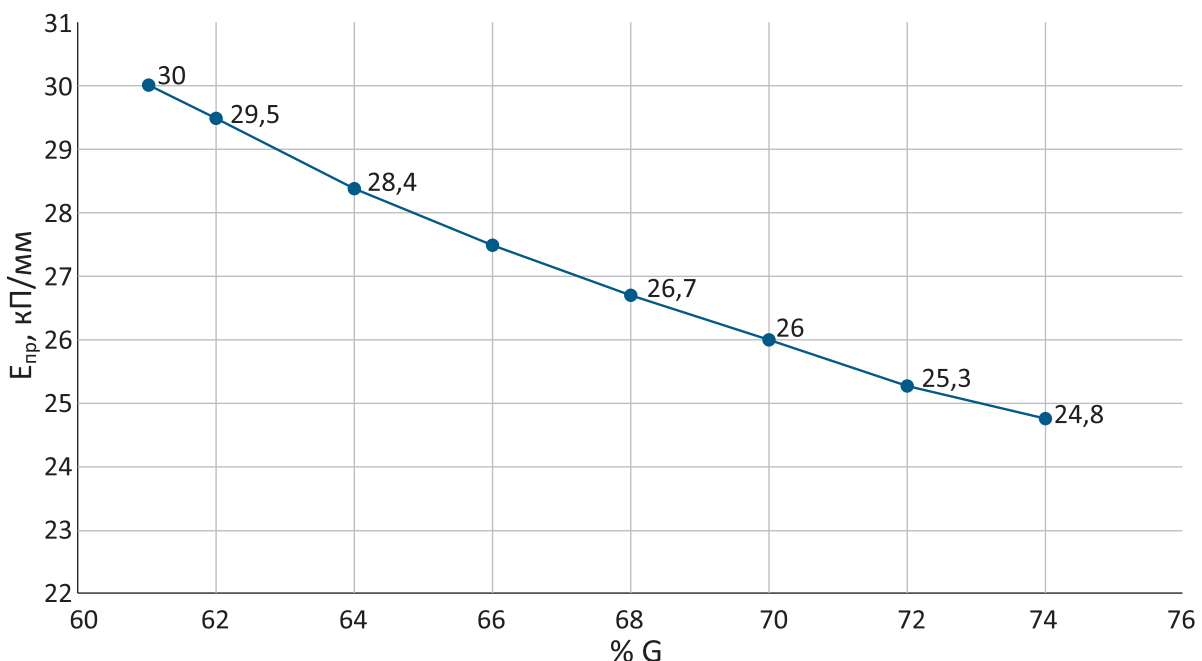


Рис. 1. Зависимость электрической прочности ПВХ-пластиката от показателя ΔG

Срок службы кабелей с поливинилхлоридной (ПВХ) защитной оболочкой. Кинетика старения ПВХ-пластиката характеризуется уравнением:

$$k = \frac{1}{\tau} \ln \frac{G_0 + a\Delta G_D - b}{G_0 + a\Delta G_{\text{СОСТ}} - b},$$

где G_0 – масса всех компонентов ПВХ-пластиката, кроме пластификатора, z ;
 $\Delta G_{\text{исх}}$, $\Delta G_{\text{сост}}$ – значения показателя в исходном состоянии и после старения;
 a , b – эмпирические коэффициенты.
 Расчёт остаточного срока службы ОК производится по формуле:

$$\tau = \tau_D \frac{\ln \frac{G_0 + a\Delta G_D - b}{G_0 + a\Delta G_{\text{ПП}} - b}}{\ln \frac{G_0 + a\Delta G_{\text{ИСХ}} - b}{G_0 + a\Delta G_D - b}},$$

где $\tau_{\text{ост}}$ – остаточный срок службы ОК, лет;
 τ_D – срок службы ОК до момента диагностирования;
 ΔG_D – значение показателя ΔG при диагностировании;
 $\Delta G_{\text{ПП}}$ – минимальное допустимое значение показателя ΔG .

Относительная потери массы образца ПВХ-оболочки, характеризующая и скорость старения, и остаточный срок службы, может быть определена по степени снижения электрической прочности. Зависимость [1, 2] электрической прочности образцов ПВХ-пластиката толщиной 1 мм от показателя G (марка пластиката И40-14, рецептура Э40-1) показана на рис. 1.

Срок службы оптического волокна. Механические свойства оптического волокна (ОВ) характеризуются параметрами, приведёнными в табл. 1.

Рассмотрим теоретические модели старения ОВ [3–6]. Уравнение для долговечности кварцевых ОВ [14]:

$$t_{\text{stat}} = \frac{a \cdot h}{\sigma_0^2 \cdot \omega \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \lambda}} \cdot \left(K_{I0} + \frac{k \cdot T \cdot \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \lambda}}{\omega} \right) \times \exp \left(\frac{\Delta G - N_A \cdot \omega \cdot K_{I0} / \sqrt{2 \cdot \pi \cdot \lambda}}{R \cdot T} \right) = \frac{a \cdot h}{\sigma_0 \cdot \omega} \cdot \left(\beta_0 + \frac{k \cdot T}{\sigma_0 \cdot \omega} \right) \cdot \exp \left(\frac{\Delta G - N_A \cdot \beta_0 \cdot \sigma_0 \cdot \omega}{R \cdot T} \right),$$

где $a = 4$ для поверхностных трещин и $a = 8$ для внутренних дефектов;
 K_{I0} – начальный коэффициент интенсивности напряжений;
 β_0 – начальный коэффициент концентрации напряжений в вершине трещины;
 $\lambda = 0,45 \cdot 10^{-9}$ м – среднее расстояние, на которое смещается фронт растущей микротрещины при разрыве одной межатомной связи в её вершине, равное среднему диаметру кремний-кислородных колец сетки стекла;
 k и h – постоянные Больцмана и Планка;
 T – температура среды;
 N_A – число Авогадро;
 R – газовая постоянная.

Потенциал Гиббса ΔG и активационный объём ω определяются в зависимости от условий среды, а коэффициент β – уравнением [2]:

$$\beta = \frac{\sigma_{\text{top}}}{\sigma_0} = \sqrt{\frac{l}{2 \cdot \lambda}} \geq 1, \text{ где } \sigma_{\text{top}} = \frac{K_I}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \lambda}}.$$

Величина растягивающего напряжения на первой неразорванной связи в вершине растущей микротрещины

$$K_I \approx \sigma_0 \cdot \sqrt{\pi \cdot l}.$$

Реальная прочность ОВ оказывается на 2–3 порядка меньше, чем теоретическая. Основное влияние на прочность ОВ оказывает наличие микротрещин на его поверхности, образующихся в процессе вытяжки

Таблица 1
 Механические параметры оптического волокна

Параметр	Значение
Натяжение при испытании механической прочности, ГПа	0,7
Динамическая разрывная прочность, ГПа	38
Усилие снятия акрилового двухслойного защитного покрытия, Н	1,3...8,9
Адгезия покрытия к кварцевому световоду – усилие отрыва, Н	6,2...22,2
Собственный радиус изгиба ОВ, м не менее	2
Параметры динамической и статической усталости, не менее	20
Масса на единицу длины, г/км	64



[3–6]. Единичная микротрещина характеризуется коэффициентом интенсивности напряжений:

$$K_I = \sigma Y \sqrt{c},$$

где σ – механическое напряжение, приложенное к ОВ, МПа;
 $Y = 1,13$ – безразмерный коэффициент, учитывающий геометрическую форму микротрещины;
 c – глубина микротрещины, м.

Рост микротрещины характеризуется двумя этапами. На первом этапе значение интенсивности K_I меньше критического значения (для кварцевых ОВ $K_{I_{кр}} = 0,189 \text{ Мпа} \cdot \text{м}^{0,5}$). При этом происходит непрерывный рост микротрещины, описываемый линейным дифференциальным уравнением:

$$\frac{dc}{dt} = AE_p^n,$$

где A – постоянная, зависящая от типа ОВ;
 E_p – реальное значение модуля упругости ОВ, МПа;
 n – коэффициент коррозии, зависящий как от материала ОВ, так и от внешних условий.

Решением дифференциального уравнения является линейная функция. Поэтому длительность первого этапа тем больше, чем меньше значение напряжения, приложенного к ОВ.

Когда значение K_I достигает $K_{I_{кр}}$, начинается второй этап роста микротрещины.

Он протекает до полного рассечения волокна практически мгновенно – со скоростью звука в стекле.

Косвенная оценка остаточного срока службы ОВ может быть получена при помощи многократного по-

следовательного измерения его затухания [7]. Если измеренное значение затухания ОВ больше, чем было раньше, то возможно, что микротрещина достигла сердцевины ОВ и вскоре произойдет его разрушение.

Поэтому измерение затухания ОВ целесообразно проводить при изготовлении и на всех этапах его использования:

- после вытяжки, при входном контроле на заводе, изготавливающем ОК;
- при контроле строительной длины ОК в ОТК завода-изготовителя;
- при входном контроле заказчика строительства ВОЛП, приобретшего ОК;
- при входном контроле на приобъектовом складе строителя-подрядчика (иногда этот контроль совмещается с предыдущим);
- перед прокладкой ОК; после прокладки ОК; после монтажа муфт;
- в процессе приёмо-сдаточных испытаний элементарного кабельного участка (ЭКУ);
- после ремонта ОК, выполненного в процессе устранения повреждения на линии;
- в процессе эксплуатации линейно-кабельных сооружений ВОЛП.

Прочность ОВ существенно зависит от натяжения в процессе контрольной нагрузки при перематке (proof-test). На рис. 2 показаны статистические зависимости [10–15] между разрушающим усилием и вероятностью отказа для ОВ, прошедших (нижняя кривая) и не прошедших (верхняя кривая) proof-test при стандартном растягивающем усилии 100 КПа (кПа) на квадратный дюйм. Распределения получены в представительной выборке из 194 образцов длиной по 20 м.

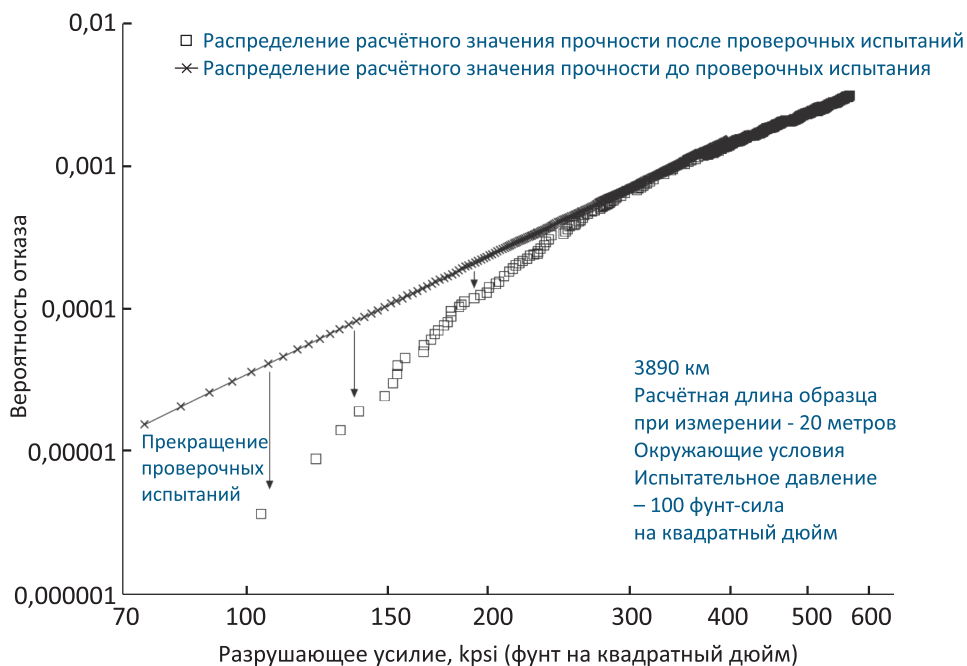


Рис. 2. Зависимость между разрушающим усилием и вероятностью отказа ОВ

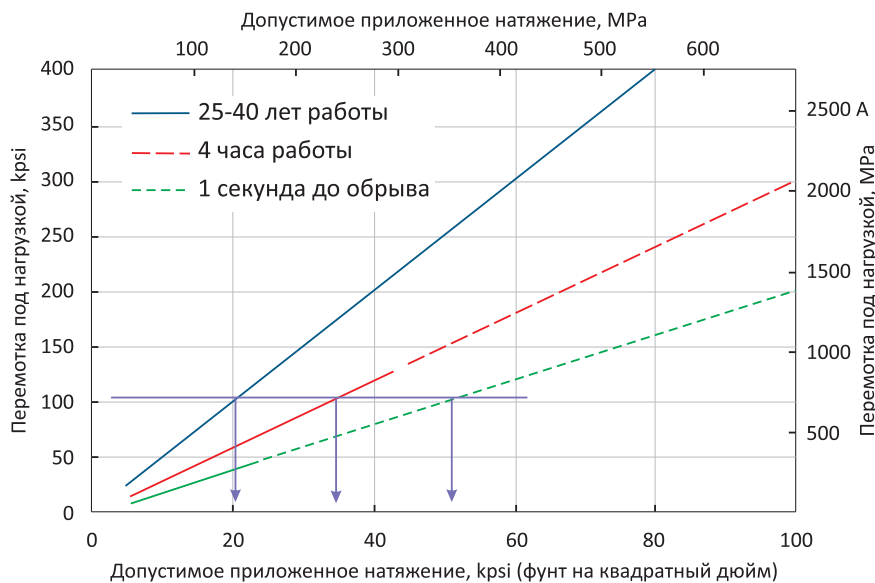


Рис. 3. Соотношение между натяжением ОВ при перемотке и допустимым длительным при эксплуатации

На рис. 3 показана зависимость срока службы ОВ от величины натяжения при перемотке и допустимого натяжения в процессе эксплуатации. Из приведённых зависимостей следует, что для обеспечения длительного срока службы нагрузка при перемотке ОВ должна быть, по крайней мере, в 5 раз больше постоянной эксплуатационной нагрузки. При снижении этого соотношения до 2 срок службы ОВ снижается до 1 секунды.

Вопросы надёжности сетей связи были и остаются приоритетными для отраслевой науки [7–9]. Ещё в 1999 году Центральный научно-исследовательский институт связи (ЦНИИС) разработал комплекс документов для решения вопросов нормирования качества, надёжности, терминологии и технико-экономической эффективности новых технологий создания и эксплуатации линейно-кабельных сооружений транспортной сети связи

В рамках этой НИР созданы «Рекомендации по оценке долговечности оптических кабелей». В них предложены следующие меры по обеспечению долговечности ОК:

1. В процессе эксплуатации определять остаточный срок службы по следующему алгоритму:

- провести анализ технической документации;
- провести осмотр линейно-кабельных сооружений;
- выявить зоны с наименее благоприятными условиями эксплуатации;
- отобрать пробы для лабораторных испытаний;
- провести лабораторные испытания;
- выполнить анализ результатов исследования.

На основании полученных данных следует определять оптимальные сроки капитального ремонта и реконструкции линий связи с ОК.

2. После землетрясений, оползней, селей и других явлений, вызывающих сдвиги грунта, необходимо проконтролировать распределение механических напряжений по длине волокна при помощи бриллюэновского рефлектометра. На линейно-кабельных сооружениях ВОЛП, проложенных в зоне вечной мерзлоты, и на подвесных ОК на воздушных ВОЛП такие измерения следует проводить регулярно, но не реже 1 раза в год.

3. На всех этапах изготовления и использования ОВ необходимо проводить измерения его затухания. Вычисление разности между измеренным и паспортным значениями коэффициента затухания ОВ проводится с целью выявления действительного изменения затухания в каждом конкретном ОВ, когда измеренное значение соответствует норме [8]. Измеренное при входном контроле значение коэффициента затухания каждого ОВ содержит в себе относительную погрешность 5 %. Паспортное значение коэффициента затухания ОВ получено в результате измерения на заводе-изготовителе. Современные методы измерения затухания ОВ: и метод обратного рассеяния, и метод обрыва имеют практически одинаковую точность. Поэтому можно считать, что максимальная относительная погрешность паспортного значения коэффициента затухания ОВ также равна 5 %. В период с момента отправки ОК с завода-изготовителя до момента производства входного контроля затухание ОВ может увеличиться, например, за счёт роста микротрещин. Наличие указанных выше погрешностей затрудняет выявление действительного изменения коэффициента затухания, так как оба фактора (рост микротрещины, и погрешности измерения) могут одинаково служить причиной увеличения значения оптических потерь. Строго говоря, в этой ситуации доступно лишь определение вероятности действительного измене-



Таблица 2

Результаты расчёта увеличения коэффициента затухания ОВ

$\delta\alpha$, дБ	$2\delta\alpha/\sigma_{расч}$	$P(\delta\alpha)$
0,005	1	0,1587
0,01	0	0,5
0,015	-1	0,83313
0,02	-2	0,9772
0,025	-3	0,9986
0,03	-4	0,9999

ния коэффициента затухания ОВ. Расчёт этой вероятности P проводится при следующих исходных данных:

- погрешности измерения коэффициента затухания ОВ носят случайный характер и их распределения подчиняются нормальному закону с одинаковыми параметрами: математические ожидания равны 0, средние квадратические отклонения равны $\sigma = \alpha \times 0,05 / 3$;
- среднее значение коэффициента затухания равно 0,2 дБ/км; распределение разности между измеренным при входном контроле и паспортным значениями коэффициента затухания ОВ подчиняется нормальному закону с параметрами: математическое ожидание равно 0, среднее квадратическое отклонение равно $\sigma_{разн} = \sigma\sqrt{2} \approx 0,05[\text{дБ} / \text{км}]$.

Примем в качестве порогового значения двухсигмовое положительное отклонение разности коэффициентов затухания ОВ. При этом условии попадание разности в интервал от $-\infty$ до $2\sigma_{разн}$ означает, что коэффициент затухания ОВ по существу не изменялся, а различие заводского и контрольного значений вызвано взаимодействием погрешностей измерений; попадание разности в интервал от $+2\sigma_{разн}$ до $+\infty$ означает, что имеет место действительное изменение коэффициента затухания, $\delta\alpha$.

При наличии действительного увеличения коэффициента затухания ОВ распределение разности будет подчиняться нормальному закону с той же дисперсией, но с математическим ожиданием равным $\delta\alpha$, то есть сдвинутым вправо. Этот сдвиг вправо может быть учтён соответствующим сдвигом влево заданного порогового значения.

Вероятность выявления $\delta\alpha$ определяется с помощью табулированного интеграла Лапласа:

$$P(\delta\alpha) = 1 - \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{2\delta\alpha/\sigma_{разн}} e^{-t^2/2} dt.$$

В табл. 2 приведены результаты расчёта увеличения коэффициента затухания ОВ.

Таким образом, при увеличении коэффициента затухания на 0,01 дБ/км вероятность выявления равна 50 %; увеличение на 0,02 дБ/км выявляется практически во всех случаях.

Аудит сетей оптических кабелей. Из всего сказанного выше следует необходимость проведения постоянного аудита сетей оптических кабелей, предусматривающего:

- анализ международных и отечественных нормативно-технических документов, регламентирующих долговечность оптических кабелей;
- создание методики оценки остаточного срока службы оптического волокна с учётом прочности ОВ; зависимости долговечности ОВ от нагрузки и статической усталости ОВ;

- рефлектометрические измерения коэффициента затухания оптического волокна и прогнозирование остаточного срока службы по их результатам;

- проведение масштабного статистического исследования реального срока службы ОВ и ОК на линиях связи компаний;

- оптимизацию самовосстанавливающихся структур на полностью оптических транспортных сетях;

- разработку рекомендаций по модернизации волоконно-оптических линий связи и по методике прокладки новых оптических кабелей с учётом требований к долговечности оптических волокон и оптических кабелей.

Интенсивность отказов. Долговечность ОВ и ОК непосредственно связана с интенсивностью отказов (рис. 4). При уменьшении остаточного срока службы интенсивность отказов экспоненциально возрастает, и коэффициент готовности сети связи резко уменьшается.

Здесь уместно сказать, что Федеральное министерство транспорта и цифровой инфраструктуры Германии представило стратегический план инвестировать 100 млрд евро в развёртывание национальной высокоскоростной широкополосной сети связи к 2025 году. Эта инфраструктура вберёт в себя самые современные оптические технологии и мобильный стандарт 5G, чтобы национальная сеть Gigabit удовлетворяла постоянно растущие требования приложений Виртуальная реальность и Интернет вещей (IoT).

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Достоверные теоретические модели и результаты экспериментальных исследований показывают, что оптические кабели имеют срок службы 25–30 лет.

2. Основные волоконно-оптические линии связи страны сооружены в короткий промежуток времени 20–25 лет назад, и подходят к рубежу износа, за которым начнётся период резкого повышения интенсивности отказов.

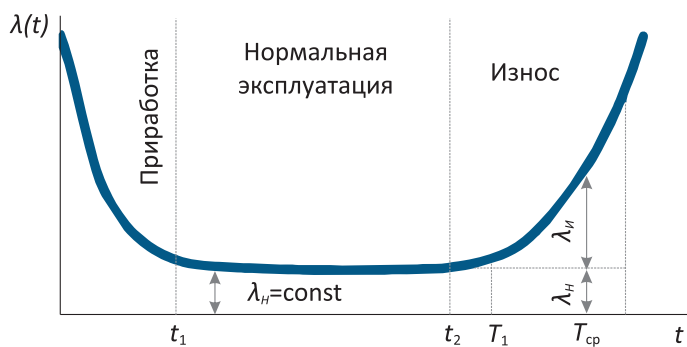


Рис. 4. Интенсивность отказов в зависимости от времени

3. Топология магистральных линий связи страны неблагоприятна. Резкое повышение интенсивности отказов ВОЛС неминуемо приведёт к потере устойчивости сети связи.

4. В качестве критерия долговечности оптических кабелей целесообразно принять гамма-процентный срок службы.

5. Назрела необходимость организации на базе ЦНИИС и ВНИИ кабельной промышленности центра мониторинга остаточного срока службы волоконно-оптических линий связи транспортных сетей вне

Список литературы

1. **Ларин Ю.Т.** Оптические кабели: методы расчёта конструкций. Материалы. Надёжность и стойкость к ионизирующему излучению. – М.: Престиж, 2006. – 304 с.

2. **Ларин Ю.Т.** Оптические кабели. – М.: Престиж, 2006. – 304 с.: ил.

3. **Ларин Ю.Т.** Надёжность оптических волокон. Аналитическая информация. – М.: Информэлектро, 1990. – 40 с.

4. **Зеленяк-Кудрейко И.В., Коршунов В.Н., Ксенофонтов С.Н., Ларин Ю.Т.** Прогнозирование надёжности оптических кабельных линий связи с учётом проверочных испытаний оптических волокон // Электросвязь. – 1990. – № 12. – С. 25–28

5. **Зеленяк-Кудрейко И.В., Коршунов В.Н., Ларин Ю.Т.** Параметры надёжности оптических кабелей // Электросвязь. – 1994. – № 1. – С. 25–28.

6. **Зеленяк-Кудрейко И.В., Коршунов В.Н., Ксенофонтов С.Н.** Прочность кварцевых оптических волокон при воздействии произвольных механических нагрузок // Радиотехника. – 1989. – № 10. – С. 76–80

7. **Воронцов А.С., Коршунов В.Н., Цым А.Ю.** Оценка долговечности ВОЛС // Электросвязь. – 1999. – № 2. – С. 9–13.

зависимости от их официальной принадлежности, с задачами:

– проведение масштабного статистического исследования реального срока службы ОК и ОВ на линиях связи компаний-операторов связи;

– проведение мониторинга остаточного срока службы ОК и ОВ на магистральных транспортных сети связи;

– выдача рекомендаций по оптимальным срокам реконструкции ВОЛС с учётом предельных сроков службы ОК и ОВ на магистральных транспортных сети связи;

– выдача рекомендаций по оптимизации самовосстанавливающихся структур на полностью оптических транспортных сетях;

– выдача рекомендаций по методике прокладки новых оптических кабелей с учётом требований к долговечности оптических кабелей, а также требований к надёжности и живучести (связности) транспортной сети волоконно-оптических линий связи.

6. Разработать, согласовать с операторами, занимающими доминирующее положение на рынке, и утвердить «Правила технического обслуживания ВОЛС», в которых регламентировать процесс эксплуатации ВОЛС с учётом результатов мониторинга остаточного срока службы волоконно-оптических кабелей и оптических волокон.

8. **Воронцов А.С., Цым А.Ю., Петров Ю.М.** Повышение надёжности волоконно-оптических линий передачи при помощи статистической процедуры входного контроля кабеля. – М.: Сб. научных трудов ЦНИИС, 1998. – С. 64–73

9. Техническое заключение по результатам анализа возможностей использования спектров бриллюэновского рассеяния для разработки неразрушающего метода измерения параметров ОВ/ОК, характеризующих его надёжность. П/р С.Э. Питерских, ЦНИИС-РТК, отчет по договору 5-1-1(99), 1999 г.

10. Minimum Optical Fiber Bend Radius // Corning EN 21 (Revision 4), 2002.

11. **Matthewson M.J.** Optical fiber reliability models // SPIE Critical Review. V. CR50, 1994. – P. 3-31.

12. **Glaesemann G.S.** Advancements in Mechanical Strength and Reliability of Optical Fibers // SPIE Critical Review. V.CR73, 1999. – P. 1–23.

13. **Matthewson M.J.** Optical fiber mechanical testing techniques // SPIE Critical Review. V.CR50, 1994. – P. 32–59.

14. IEC TR 62048 Optical fibres – Reliability – Power law distribution theory, ed. 3.0 (2014-01), 70 p.

15. IEC TR 60793 Optical fibres – Part 1-30: Measurement methods and procedures – Fibre proof test, ed. 2.0 (2010-05), 25 p.