

О влиянии на цикл деградации оптического кабеля метода восстановления связи путем соединения кабеля в месте обрыва

В. П. Шувалов¹, Б. П. Зеленцов, И. Г. Квиткова¹

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

Аннотация: В процессе эксплуатации на оптоволоконный кабель действуют различные факторы, которые приводят к отказам. Обычно считается, что наиболее слабым звеном в оптическом кабеле является оптоволокно, и поэтому в статье рассматриваются именно отказы оптоволоконного кабеля. Гарантийный срок службы оптоволоконного кабеля, который задается производителем, равен 25 годам. В настоящее время на многих участках трасс, где проложен оптический кабель, срок его эксплуатации уже превышает гарантийный, и встает вопрос о его замене на новый. Как правило, срок службы оптического кабеля превышает гарантийный срок службы, т.к. кабель в процессе эксплуатации подвергается техническому обслуживанию и ремонту. В данной статье предложена методика расчета цикла деградации оптоволоконного кабеля, определяющего время его замены на новый, учитывающая действие постепенных и внезапных отказов. Причиной постепенных отказов является старение оптического кабеля и рост ослабления сигнала, в результате чего возникает деградационный отказ (снижение уровня принимаемого сигнала ниже критического), который приводит к замене оптического кабеля. Появление внезапного отказа, вызванного посторонним вмешательством, сопровождается ремонтными работами по соединению кабеля в месте обрыва. Появление каждого нового соединения приводит к дополнительному ослаблению сигнала и сокращению времени цикла деградации. Для обнаружения внезапных отказов проводится периодический контроль технического состояния оптоволоконного кабеля. В рамках предложенной методики предполагается, что цикл деградации оптического кабеля разбивается на состояния деградации определенной длительности, которые, в свою очередь, состоят из интервалов проверки состояния оптоволоконного кабеля в кабеле. При этом рассматриваются математические модели с применением полумарковских процессов, отражающие состояние оптического кабеля на одном периоде проверки, в одном состоянии деградации, на цикле деградации. Также получены выражения и зависимости, показывающие, как влияют внезапные и постепенные отказы на сокращение продолжительности цикла деградации оптического кабеля.

Ключевые слова: волоконно-оптический кабель, деградационный отказ, внезапный отказ, показатели надежности, периодический контроль, период проверки, цикл деградации, срок службы, затухание сигнала, соединение в месте обрыва кабеля, полумарковский процесс.

Для цитирования: Шувалов В. П., Зеленцов Б. П., Квиткова И. Г. О влиянии на цикл деградации оптического кабеля метода восстановления связи путем соединения кабеля в месте обрыва // Вестник СибГУТИ. 2024. Т. 18, № 4. С. 87–100, <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-4-87-100>.



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

© Шувалов В. П., Зеленцов Б. П., Квиткова И. Г., 2024

Статья поступила в редакцию 20.06.2024;
переработанный вариант – 02.07.2024;
принята к публикации 11.07.2024.

1. Введение

В процессе эксплуатации на оптоволоконный кабель (ОК) действуют различные факторы, которые, в конечном счете, в результате деградационных процессов оптоволоконного

приводят к отказам. Гарантийный срок службы оптоволокна, который задается производителем, равен 25 годам. Понятно, что гарантийный срок от начала эксплуатации и срок до замены ОК – это разные сроки. И, как правило, срок службы ОК превышает гарантийный срок. Так, известно, что оптические кабели, проложенные в конце 60-х годов прошлого века в Америке, успешно эксплуатировались и спустя 40 лет [1], разумеется, подвергаясь техническому обслуживанию и ремонту (ТО и Р). В процессе ТО и Р может выполняться ремонт участков кабеля путем соединения в местах обрыва, замена отдельных участков кабеля, замена всего ОК [2, 3]. Решение о том, какая стратегия ТО и Р будет наиболее выгодной и обеспечит приемлемый срок службы объекта, является сложной технико-экономической задачей [4–8].

Вопросам оценки срока службы ОК, после которого требуется его замена, посвящено множество работ [9–13 и др.]. В [9] приведены теоретические модели старения оптического волокна и кабелей. В [10] рассмотрены возможные сценарии прогноза срока службы ОК на основе известной взаимосвязи срока службы и вероятности повреждения волокна в кабеле. В [11] рассматривается ОК, разбитый на участки. При этом замена участка осуществляется как при появлении внезапного отказа, так и деградиационного отказа, вызванного старением оптоволокна.

В [11] введено понятие цикла деградации и показано, что цикл деградации участка растет с ростом интенсивности внезапных отказов, если эти отказы сопровождаются заменой участка ОК. Под циклом деградации в [11] понимается время от начала эксплуатации участка ОК до его замены. Здесь же введено понятие планового цикла деградации как времени замены участка ОК при отсутствии внезапных отказов.

Далее рассматривается задача определения цикла деградации для случая, когда при внезапных отказах осуществляется соединение в месте обрыва ОК, что приводит к росту коэффициента затухания, величина которого зависит от способа соединения (сварка, механическое соединение) [14].

2. Описание модели деградации оптического кабеля

В процессе эксплуатации оптического кабеля происходят переходы между состояниями деградации [15, 16]. Состояние деградации оценивается параметром затухания сигнала. Значение параметра затухания сигнала возрастает от состояния к состоянию. Это означает, что при некотором состоянии параметр затухания, при отсутствии внезапных отказов, достигает такого значения (предельного значения), при котором наступает деградиационный отказ, который назовем плановым. После наступления планового деградиационного отказа происходит восстановление участка путём его замены на новый. Для определения времени наступления планового деградиационного отказа можно воспользоваться методом, предложенным в [10].

Начальным состоянием цикла деградации является состояние, соответствующее минимальному значению параметра затухания. В каждом состоянии деградации, характеризующимся заданной (планируемой) продолжительностью, может произойти внезапный отказ (обрыв ОК), после чего происходит восстановление участка. Затем происходит переход к следующему состоянию деградации.

В каждом состоянии деградации внезапный отказ происходит с определённой, одинаковой для каждого состояния деградации, интенсивностью. Для обнаружения этого отказа, имеющего скрытый характер, производится достоверный контроль технического состояния оптоволокна путём проведения периодических проверок. Для этого состояние деградации разбивается на постоянные интервалы, называемые периодами проверки. В конце каждого такого периода производится проверка технического состояния оптического волокна. Продолжительность проверки является пренебрежимо малой величиной по сравнению с периодом проверки. Если на периоде проверки происходит

внезапный отказ, то он обязательно обнаруживается в момент проведения проверки, после чего производится его устранение (восстановление после отказа) [17–22].

В каждом состоянии деградации имеет место деградационный процесс и может произойти внезапный отказ [23]. Этот фактор усиливает деградационный процесс, что приводит к сокращению числа состояний деградации перед отказом. Внезапный отказ прерывает состояние деградации, вызывая восстановление и переход в следующее состояние. В соответствии с этим представлением, в последнем состоянии деградации имеет место деградационный отказ, приводящий к замене ОК.

При построении модели надежности для описанных выше условий составляются диаграммы состояний-переходов, отражающие процесс деградации на разных уровнях: на одном периоде проверки, в одном состоянии деградации, на цикле деградации. Для объяснения сути подхода к формированию модели число состояний деградации и число периодов проверки принято равным пяти. В дальнейшем полученный результат обобщается на произвольное число состояний деградации и произвольное число периодов проверки.

Вероятности переходов между состояниями, используемые в математической модели, определены как переходные вероятности полумарковского процесса. Так, вероятность p_{ij} – это вероятность перехода из i -го состояния в j -е состояние при условии, что происходит выход из i -го состояния.

Планируемое время цикла деградации ОК $T_{ЦД}$ разбивается на n состояний деградации с постоянной продолжительностью $T_{Д}$:

$$T_{ЦД} = n \cdot T_{Д}, \quad (1)$$

а плановая продолжительность одного состояния деградации разбивается на m периодов проверки $T_{ПП}$:

$$T_{Д} = m \cdot T_{ПП}. \quad (2)$$

Ниже приводятся обозначения состояний событий, используемых в моделях (табл. 1), исходные характеристики модели (табл. 2) и вычисляемые характеристики модели (табл. 3), которые будут в дальнейшем использованы в статье.

Таблица 1. Обозначение состояний и событий, используемых в моделях

Обозначение	Наименование
ЦД	Цикл деградации
Д	Состояние деградации
ПП	Период проверки
ДО	Деградационный отказ
ВО	Внезапный отказ
РС	Работоспособное состояние
НС	Неработоспособное состояние
ПРС	Проверка оптоволокну в работоспособном состоянии в конце периода проверки
ПНС	Проверка оптоволокну в неработоспособном состоянии в конце периода проверки
В	Восстановление после внезапного отказа
ВД	Восстановление после деградационного отказа

Таблица 2. Исходные характеристики модели

Обозначение	Наименование
$T_{\text{цд}}$	Планируемое время цикла деградации
$T_{\text{д}}$	Планируемая продолжительность одного состояния деградации
$T_{\text{пп}}$	Продолжительность периода проверки
m	Планируемое число периодов проверки в одном состоянии деградации
n	Планируемое число состояний деградации на одном цикле деградации
λ	Интенсивность внезапных отказов
μ_1	Интенсивность восстановления после внезапного отказа
μ_2	Интенсивность восстановления после деградационного отказа
b_i	Значение параметра затухания в i -м состоянии деградации
Δb	Увеличение параметра затухания за счёт деградационного процесса в одном состоянии деградации
$\eta \cdot \Delta b$	Увеличение параметра затухания за счёт внезапного отказа

Таблица 3. Вычисляемые характеристики модели

Обозначение	Наименование
$p_{\text{во}}$	Вероятность того, что внезапный отказ не произойдёт на одном периоде проверки
$q_{\text{во}}$	Вероятность внезапного отказа на одном периоде проверки
$p_{\text{д}}$	Вероятность непосредственного перехода между двумя состояниями деградации
$q_{\text{д}}$	Вероятность восстановления после внезапного отказа в одном состоянии деградации
$p_{\text{пп}}$	Вероятность перехода к следующему периоду проверки в одном состоянии деградации
$q_{\text{пп}}$	Вероятность перехода к восстановлению после внезапного отказа на одном периоде проверки
$m_{\text{пп}}$	Среднее число периодов проверки в одном состоянии деградации
$n_{\text{д}}$	Среднее число попаданий в состояния деградации на одном цикле деградации
$n_{\text{в}}$	Среднее число восстановлений после внезапного отказа на одном цикле деградации
$t_{\text{д}}$	Средняя продолжительность одного состояния деградации
$t_{\text{цд}}$	Средняя продолжительность цикла деградации
$t_{\text{в}}$	Среднее время восстановлений после внезапного отказа на одном цикле деградации

2.1. Диаграмма состояний-переходов на одном периоде проверки

Диаграмма состояний-переходов на одном периоде проверки представлена на рис. 1. Процесс переходов на одном периоде проверки заканчивается:

- 1) переходом на следующий период проверки с вероятностью $p_{\text{пп}}$, равной

$$p_{\text{пп}} = p_{\text{во}} = \exp(-\lambda \cdot T_{\text{пп}}); \quad (3)$$

- 2) переходом к следующему состоянию деградации с вероятностью $q_{\text{пп}}$, равной

$$q_{\text{пп}} = 1 - p_{\text{пп}} = 1 - \exp(-\lambda \cdot T_{\text{пп}}). \quad (4)$$

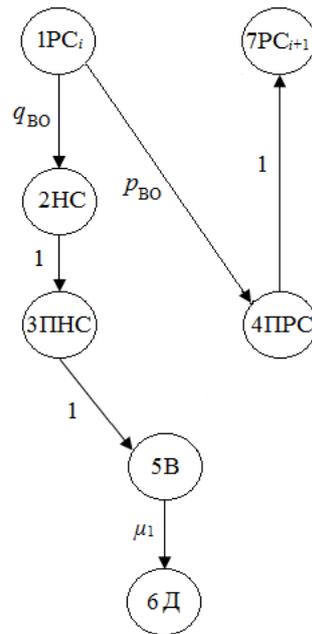


Рис. 1. Диаграмма состояний-переходов на одном периоде проверки

2.2. Диаграмма состояний-переходов в одном состоянии деградации

Каждое состояние деградации разбивается на постоянные периоды проверки. Результат проверки технического состояния выдаётся в конце каждого периода.

Диаграмма состояний-переходов в одном состоянии деградации приведена на рис. 2.

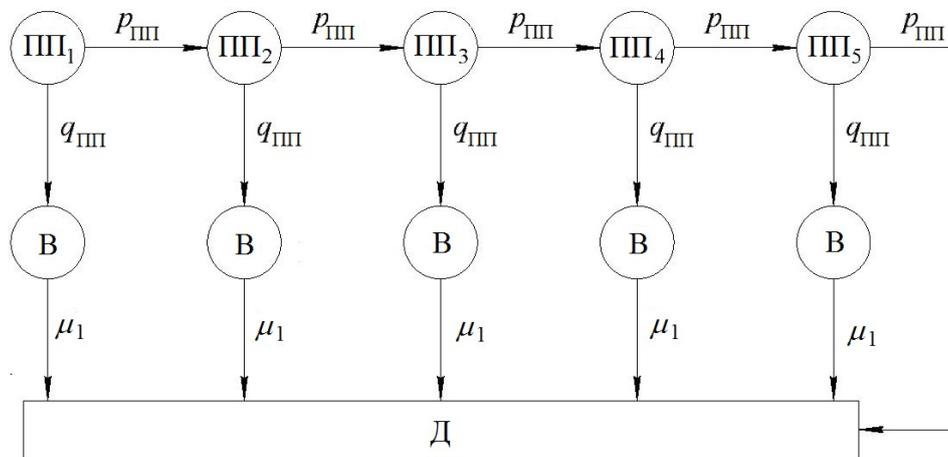


Рис. 2. Диаграмма состояний-переходов между периодами проверки в одном состоянии деградации

На каждом периоде проверки ПП_{*i*} ($i = 1, 2, 3, 4, 5$) может произойти внезапный отказ, что приводит к восстановлению ОК и переходу в следующее состояние деградации с вероятностью $q_{ПП}$, определяемой выражением (4). Если внезапный отказ не происходит, то имеет место переход на следующий период проверки, а на последнем периоде проверки – переход к следующему состоянию деградации. При этом возможны два варианта такого перехода:

1) переход при отсутствии внезапного отказа на всех периодах проверки с вероятностью

$$p_D = p_{ПП}^5, \tag{5}$$

где $p_{ПП}$ определяется выражением (3);

2) переход на восстановление при внезапном отказе на одном из периодов проверки с вероятностью

$$q_{\text{Д}} = 1 - p_{\text{ПП}}^5. \quad (6)$$

В соответствии с диаграммой рис. 2 число периодов проверки в одном состоянии деградации является случайным. Среднее число таких периодов определяется случайным числом периодов проверки и вероятностью этого числа, то есть случайное число периодов проверки происходит с вероятностью $p_{\text{ПП}}^{i-1} \cdot q_{\text{ПП}}$, где $i = 1, 2, \dots, 5$. Отсюда следует, что среднее число периодов проверки в одном состоянии деградации при $m = 5$ вычисляется по формуле (7):

$$m_{\text{ПП}} = 1 \cdot q_{\text{ПП}} + 2 p_{\text{ПП}}^1 \cdot q_{\text{ПП}} + 3 p_{\text{ПП}}^2 \cdot q_{\text{ПП}} + 4 p_{\text{ПП}}^3 \cdot q_{\text{ПП}} + 5 p_{\text{ПП}}^4 \cdot q_{\text{ПП}} = \frac{1 - p_{\text{ПП}}^5}{1 - p_{\text{ПП}}}. \quad (7)$$

Средняя продолжительность одного состояния деградации определяется выражением (8)

$$t_{\text{Д}} = m_{\text{ПП}} \cdot T_{\text{ПП}}. \quad (8)$$

2.3. Диаграмма состояний-переходов на одном цикле деградации

Цикл деградации охватывает продолжительность эксплуатации оптического кабеля от начального состояния деградации до критического состояния, то есть состояния с деградационным отказом. Поэтому цикл деградации включает в себя нахождение в состояниях деградации и в состояниях восстановления после внезапных отказов.

На рис. 3 приведена диаграмма состояний-переходов с пятью состояниями деградации и вероятностями переходов $p_{\text{Д}}$ из (5).

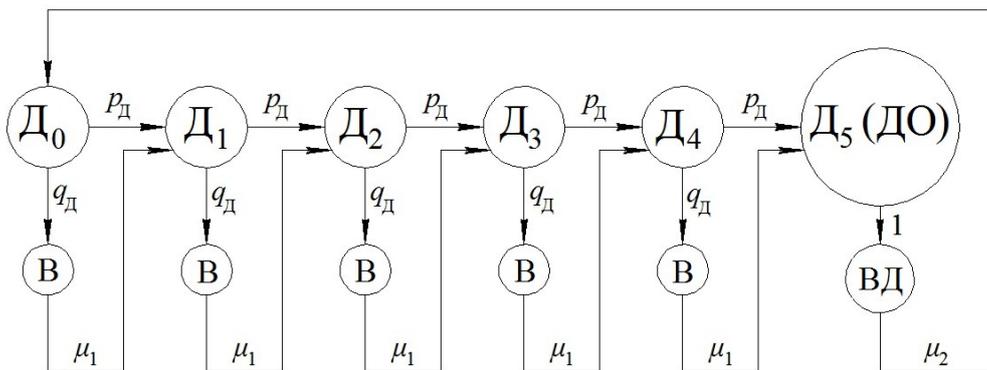


Рис. 3. Диаграмма состояний-переходов на одном цикле деградации

В состояниях D_0, D_1, D_2, D_3, D_4 имеет место нарастание затухания, а в состоянии D_5 происходит деградационный отказ. После деградационного отказа производится восстановление ОК с интенсивностью μ_2 , заканчивается цикл деградации и начинается новый. Начальным состоянием цикла деградации является состояние D_0 .

Непосредственный переход из текущего состояния деградации к следующему состоянию деградации происходит при условии, что в текущем состоянии деградации не было внезапного отказа. На диаграмме (рис. 2) с 5 периодами проверки вероятность перехода в следующее состояние деградации равна $p_{\text{Д}}$, а выход из текущего состояния деградации на восстановление происходит с вероятностью $q_{\text{Д}}$, которая определяется выражением (6).

3. Затухание сигнала в процессе деградации и определение цикла деградации

В процессе деградации оптоволокна параметр затухания сигнала увеличивается на значение Δb в одном состоянии деградации.

Внезапный отказ в любом состоянии деградации приводит к увеличению параметра затухания оптоволокна в следующем состоянии. При этом он может вызывать разное изменение параметра затухания. Это явление учитывается с помощью коэффициента η , который назовем коэффициентом влияния внезапного отказа на деградационный процесс. При $\eta = 0$ внезапные отказы не влияют на процесс деградации; при $\eta = 1$ внезапные отказы оказывают такое же влияние, как деградационный процесс в одном состоянии; при $\eta > 1$ внезапные отказы оказывают большее влияние по сравнению с деградационным процессом в одном состоянии.

Увеличение параметра затухания в одном состоянии Δb и $\eta \cdot \Delta b$ передается следующему состоянию при переходе в него.

Итак, нарастание параметра затухания сигнала при переходе $D_i \rightarrow D_{i+1}$ происходит за счёт следующих факторов:

- 1) переход параметра затухания b_i из состояния D_i в состояние D_{i+1} ;
- 2) увеличение параметра затухания на величину Δb за счёт деградационного процесса в состоянии D_i ;
- 3) увеличение параметра затухания за счёт внезапного отказа на величину $\eta \cdot \Delta b$.

Переход $D_i \rightarrow D_{i+1}$ происходит как при отсутствии, так и при возникновении внезапного отказа. В любом случае параметр затухания в состоянии D_{i+1} увеличивается на величину Δb за счёт деградационного процесса в состоянии D_i . Однако увеличение параметра затухания от внезапного отказа имеет место только в случае, если это событие происходит. Поскольку вероятность этого события равна q_D , то увеличение параметра затухания в среднем будет равно $\eta \cdot \Delta b \cdot q_D$.

Нарастание параметра затухания при переходе $D_i \rightarrow D_{i+1}$ выражается следующим образом:

$$b_{i+1} = b_i + \Delta b + \eta \cdot \Delta b \cdot q_D.$$

Отсюда следует, что, если расчёт параметра затухания в состоянии D_i производится при условии того, что в состоянии D_0 значение параметра затухания равно нулю, то:

$$b_i = i \cdot (1 + \eta \cdot q_D) \cdot \Delta b.$$

Таким образом, параметр затухания сигнала в состоянии D_i зависит от номера состояния, коэффициента η и вероятности восстановления после внезапного отказа.

При интенсивности внезапных отказов $\lambda \neq 0$ и коэффициенте $\eta \neq 0$ нарастание параметра затухания сигнала при переходе от состояния к состоянию будет больше по сравнению с плановым значением Δb . Плановый деградационный отказ наступает при значении параметра затухания $n \cdot \Delta b$. Тогда деградационный отказ, не являющийся плановым, наступит при выполнении условия $b_i \geq n \cdot \Delta b$. В этом случае номер критического состояния с деградационным отказом I выражается неравенством:

$$I \geq \frac{n}{1 + \eta \cdot q_D} = \frac{n}{1 + \eta \cdot [1 - \exp(-\lambda \cdot T_D)]}, \quad (9)$$

где T_D определяется выражением (2).

Значение I является одновременно числом состояний, входящих в цикл деградации.

При выполнении условия (9) деградационный цикл завершается в состоянии D_i . При этом производится замена ОК, а затем - дальнейшая его эксплуатация с новым плановым циклом деградации, продолжительность которого определяется из (1).

Итак, деградационный отказ, обусловленный влиянием внезапных отказов, может наступить в некотором состоянии D_i , где $i \leq n$, то есть число состояний цикла деградации уменьшается по сравнению с плановым значением n .

Средняя продолжительность цикла деградации зависит от I и среднего времени восстановления после деградационного отказа:

$$t_{\text{ЦД}} = I \cdot \left(t_D + \frac{q_D}{\mu_1} \right) + \frac{1}{\mu_2}. \quad (10)$$

Прогнозируемое уменьшение числа состояний деградации по отношению к плановому числу можно определить следующим образом:

$$\delta_I = \frac{I}{n}. \quad (11)$$

Прогнозируемое изменение продолжительности цикла деградации по отношению к плановой продолжительности:

$$\delta_{\text{ЦД}} = \frac{I \cdot t_{\text{Д}}}{T_{\text{ЦД}}} = \delta_I \cdot \frac{1 - p_{\text{ПП}}^m}{1 - p_{\text{ПП}}}, \quad (12)$$

где δ_I определяется выражением (11).

Средняя частота восстановлений после внезапного отказа на цикле деградации:

$$\nu_{\text{В}} = \frac{1}{t_{\text{Д}} + q_{\text{Д}}/\mu_1}. \quad (13)$$

Частота $\nu_{\text{В}}$ из (13) представляет собой среднее число внезапных отказов в единицу времени. Размерность этой частоты может быть выражена в единицах 1/час или 1/год. Этот показатель позволяет планировать техническое обслуживание ОК, расходы на замену участков ОК и другие статьи расходов.

4. Пример расчета цикла деградации участка оптического кабеля

Для исследования поведения продолжительности цикла деградации участка ОК в зависимости от влияния внезапных отказов в условиях периодического контроля введены следующие исходные данные:

- планируемое число состояний деградации $n=30$;
- планируемая продолжительность одного состояния деградации $T_{\text{Д}} = 1 \text{ год} = 8760 \text{ ч}$;
- период проверки $T_{\text{ПП}} = 0.5 \text{ ч}$;
- интенсивность восстановления после внезапного отказа $\mu_1 = 0.25 \text{ 1/ч}$;
- интенсивность восстановления после деградационного отказа $\mu_2 = 0.1 \text{ 1/ч}$.

Значения интенсивностей восстановления μ_1 и μ_2 выбраны в соответствии с РД 45.047-99.

При заданных значениях n и $T_{\text{Д}}$, в случае отсутствия внезапных отказов на всем интервале планируемого цикла деградации, увеличение параметра затухания за счёт деградации в одном состоянии можно принять равным $\Delta b = 0.2 \text{ дБ}$ при энергетическом запасе в 6 дБ [24], когда наступает плановый деградационный отказ. При наличии внезапных отказов восстановление участка оптического кабеля после отказа увеличивает параметр затухания на 0.05 дБ при сварном способе соединения оптических волокон и на 0.5 дБ - при механическом соединении оптических волокон [24]. Таким образом, увеличение параметра затухания за счёт внезапного отказа $\eta \Delta b$ равно 0.05 дБ либо 0.5 дБ при $\Delta b = 0.2 \text{ дБ}$. Тогда коэффициент влияния внезапного отказа η равен 0.25 и 2.5 соответственно.

На рис. 4 приведен график зависимости средней продолжительности одного состояния деградации из выражения (8) от интенсивности внезапных отказов $\lambda = 0, 10^{-7}, \dots, 10^{-3} \text{ 1/ч}$.

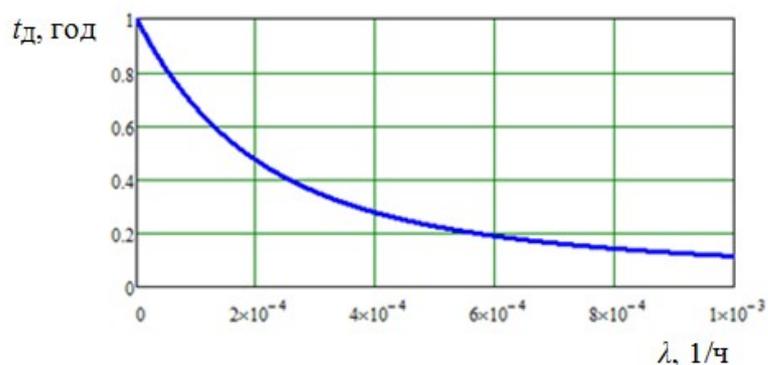


Рис.4. Зависимость средней продолжительности одного состояния деградации $t_{\text{Д}}$ от интенсивности внезапных отказов λ

Увеличение числа отказов в течение состояния деградации значительно сокращает продолжительность цикла деградации и ускоряет переход в следующее состояние деградации с худшими характеристиками оптического волокна на участке ОК. Причем также сокращается количество состояний деградации на цикле деградации участка ОК.

Прогнозируемое уменьшение числа состояний деградации по отношению к плановому значению, определяемое выражением (11), описывается графиком на рис 5.

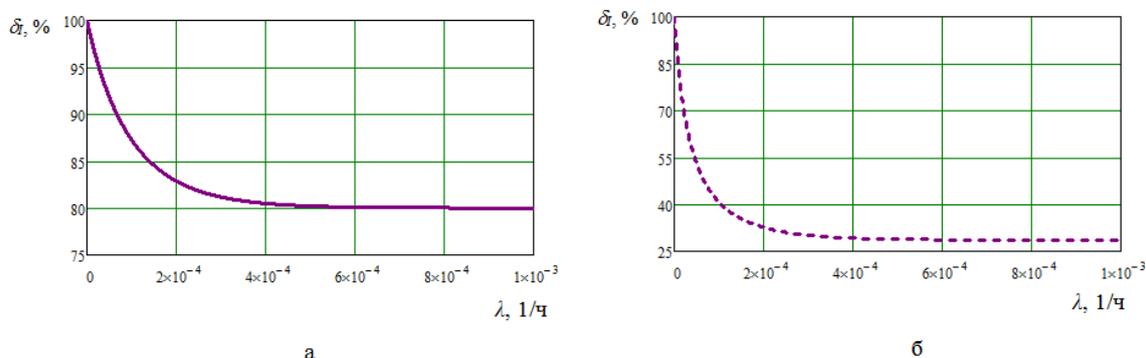


Рис. 5 Зависимость δ_i , выраженного в процентах, от интенсивности внезапных отказов λ : а – при $\eta = 0.25$; б – при $\eta = 2.5$

По графикам на рис. 5 можно сделать вывод о том, что при увеличении интенсивности внезапных отказов прогнозируемое уменьшение количества состояний деградации стремится к постоянному значению.

Средняя продолжительность цикла деградации (в годах), определяемая выражением (10), приведена в табл. 4 при различных значениях λ и η . В табл. 4 также указано значение прогнозируемого изменение продолжительности цикла деградации по отношению к плановой продолжительности из (12), выраженное в процентах.

Таблица 4. Средняя продолжительность цикла деградации $t_{ЦД}$ и её прогнозируемое изменение по отношению к плановому значению $\delta_{ЦД}$

Параметр	Значение					Значение				
	0.25					2.5				
λ , 1/ч	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}
$t_{ЦД}$, ГОД	29.98	29.8	28.1	17.44	2.75	29.92	29.23	23.75	8.13	0.98
$\delta_{ЦД}$, %	99.93	99.35	93.78	58.14	9.13	99.74	97.44	79.15	27.09	3.26

Продолжительность цикла деградации зависит того, насколько часто происходят отказы и каким образом производится ремонт участка ОК. Устранение отказа путем соединения оптических волокон ОК сокращает продолжительность цикла деградации быстрее, т.к. в этом случае эксплуатационный запас ОК будет исчерпан за меньший период времени.

5. Заключение

Приведенный в статье подход, основанный на формировании полумарковской модели деградации, позволяет разработать методику оценки цикла деградации оптического кабеля, учитывающую затухание сигнала как один из основных параметров, отражающих деградационный процесс оптоволоконного кабеля. Также методика учитывает наличие внезапных отказов, возникающих в процессе эксплуатации оптического кабеля. При этом можно оценить, в какой мере изменится продолжительность срока эксплуатации кабеля до его замены по сравнению с плановым сроком. Это дает возможность спрогнозировать время

замены оптического кабеля на новый при известных условиях его эксплуатации и принятом способе технического обслуживания и ремонта.

Работа выполнена в рамках государственного задания 071-03-2024-008 от 19.01.2024.

Литература

1. *Кемельбеков Б. Ж., Мышкин В. Ф., Хан В. А.* Оптические кабели связи. Томск: НТЛ, 2001. 352 с.
2. К расчету надежности оптического волокна при различных условиях эксплуатации / В. П. Шувалов, С. В. Тимченко, В. М. Деревяшкин, И. Г. Квиткова // Наука и бизнес: пути развития. 2020. № 9 (111). С. 46-48.
3. *Шувалов В. П., Зеленцов Б. П., Квиткова И. Г.* Модель надёжности волоконно-оптической линии связи при недостоверном прогнозирующем контроле // Вестник СибГУТИ. 2020. №4. С.66-76.
4. *Шувалов В. П., Тимченко С. В., Квиткова И. Г.* Методы технического обслуживания и ремонта оптоволоконных линий // Наука и бизнес: пути развития. 2023. №5 (143). С.75-79.
5. *Шувалов В. П., Квиткова И. Г.* Техничко-экономический анализ пассивных оптических сетей доступа большого радиуса действия // Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции «Информационные технологии и когнитивная электросвязь. Екатеринбург, 2020. С. 45-49.
6. *Гулина О. М., Жиганин А. А., Чепурко В. А.* Разработка критерия оптимизации срока службы энергоблока // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2001. №2. С.10-14.
7. *Гулина О. М., Меркун А. В., Семишкин В. П.* Риск-ориентированный подход в методологии управления ресурсом // Вопросы атомной науки и техники. Серия: физика ядерных реакторов. 2021. №2. С. 92-98.
8. Анализ опыта технической эксплуатации линейно-кабельных сооружений транспортной многоканальной коммуникации / В. А. Андреев, В. А. Бурдин, М. В. Дашков, В. Б. Попов // Электросвязь. 2021. № 1. С. 64-66.
9. *Цым А.Ю.* Сроки службы оптических кабелей. Анализы. Риски. // Кабели и провода. 2020. № 2 (382). С. 20-26.
10. *Андреев В. А., Бурдин В. А., Нижгородов А. О.* Сценарии прогноза срока службы оптического волокна в КЛС // Первая миля. 2020. № 4 (89). С. 34-43.
11. *Shuvalov V. P., Zelentsov B. P., Kvitkova I. G.* On the effect of sudden failures and control errors of the first kind on the degradation cycle of an optical cable // 2023 IEEE 16th international conference of actual problems of electronic instrument engineering (APEIE). Novosibirsk, 10-12 November, 2023. P. 550-555.
12. Прогноз срока службы оптического кабеля. Два подхода к оцениванию актуальной прочности оптических волокон кабельной линии / В. А. Андреев, В. А. Бурдин, М. В. Дашков, А. О. Нижгородов // Фотон-экспресс. 2021. № 6 (174). С. 220-221.
13. Контроль прочности оптических волокон в задачах прогноза ресурса оптических кабелей на ВОЛС / В. А. Бурдин, А. В. Бурдин, М. В. Дашков, А. О. Нижгородов // Материалы VIII Молодежной международной научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов студентов «Прикладная электродинамика, фотоника и живые системы -2021». Казань, 2021. С. 11-15.
14. *Андреев В. А., Бурдин В. А., Бурдин В. А., Дашков М. В.,* Метод неразрушающего контроля прочности кварцевого оптического волокна // Компьютерная оптика. 2022. Т. 46, № 2. С. 224-231.
15. *Shuvalov V., Ionikova E., Karpov K.* Method for determining the number of states of the Markov model of damage accumulation in predicting the technical condition of a fiber-optic

- cable. // Proceedings of international Conference on Applied Innovation in IT. 2021. V. 9, № 1. P. 13-19.
16. Шувалов В. П., Зеленцов Б. П., Квиткова И. Г. Модель надёжности оптоволокну в условиях деградации. // Вестник СибГУТИ. 2022. №3 (59). С.56-61.
 17. Monitoring in the Physical Channels of Optical Access Networks / I. Bogachkov, N. Gorlov, T. Monastyrskaya, N. Medvedeva // Proceedings of International Conference on Applied Innovation in IT (ICAИТ-2023). 2023. V. 11, № 1. P. 49–53.
 18. Горлов Н. И. Последние исследования и разработки в области мониторинга оптического волокна в системах связи // Инфокоммуникационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики. Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2023. С. 35-39.
 19. Gorlov N. I. Optical reflectometry based on the principle of separation of the difference frequency of the Brillouin scattering spectrum. // Proceedings of International Scientific-Practical Conference «Information Innovative Technologies». Prague, April 25-29, 2022. P. 280-286.
 20. Горлов Н. И. Мониторинг физической среды оптической сети доступа // Актуальные проблемы инфотелекоммуникаций в науке и образовании (АПИНО 2023). Сборник научных статей. XII Международная научно-техническая и научно-методическая конференция. Санкт-Петербург, 2023. С. 360-364
 21. Горлов Н. И. Мониторинг подводных волоконно-оптических линий связи // Информационные технологии и когнитивная электросвязь. Сборник научных трудов IX Всероссийской научно-практической конференции. Екатеринбург, 2023. С. 54-57.
 22. Горлов Н. И. Методы мониторинга физической среды пассивных оптических сетей // Инфокоммуникационные технологии: актуальные вопросы цифровой экономики. Сборник научных трудов III Международной научно-практической конференции. Екатеринбург, 2023. С. 46-49.
 23. Шувалов В. П., Карнов К. А., Ионикова Е. П. Методика определения вероятности отказа оптического волокна от текущего времени эксплуатации // Вестник СибГУТИ. 2021. №2. С. 60-68
 24. Ефанов В. И. Проектирование, строительство и эксплуатация ВОЛС. Томск: Томск. гос. ун-т систем упр. и радиоэлектроники, 2012. 102 с.

Шувалов Вячеслав Петрович

д.т.н., профессор кафедры инфокоммуникационных систем и сетей, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), тел. +7 383 269 82 43, e-mail: shvp04@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1670-4753.

Зеленцов Борис Павлович

д.т.н., профессор, e-mail: zelentsov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5532-0963.

Квиткова Ирина Геннадьевна

старший преподаватель кафедры инфокоммуникационных систем и сетей, Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ, 630102, Новосибирск, ул. Кирова, д. 86), тел. +7 383 26982 44, e-mail: irin.creme@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1745-9582.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

On the Effect on the Optical Cable Degradation Cycle of the Method of Restoring Communication by Connecting the Cable at the Breakage Point

Vyacheslav P. Shuvalov¹, Boris P. Zelentsov, Irina G. Kvitkova¹

¹Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

Abstract: During operation, various factors affect the fiber optic cable, which lead to failures. It is generally assumed that the weakest link in an optical cable is fiber, and therefore it is fiber failures that are considered in the article. The warranty period of the fiber, which is set by the manufacturer, is 25 years. Currently, on many sections of the routes where the optical cable is laid, its service life already exceeds the warranty period, and the question arises of replacing it with a new one. As a rule, the service life of an optical cable exceeds the warranty period, because the cable is subject to maintenance and repair during operation. This article proposes a method for calculating the degradation cycle of a fiber-optic cable, which determines the time of its replacement with a new one, taking into account the effect of gradual and sudden failures. The reason for the gradual failures is the aging of the optical cable and the increase in signal attenuation, resulting in a degradation failure (a decrease in the level of the received signal below the critical one), which leads to the replacement of the optical cable. The appearance of a sudden failure caused by outside interference is accompanied by repair work on connecting the cable at the breakage point. The appearance of each new connection leads to an additional attenuation of the signal and a reduction in the degradation cycle time. To detect sudden failures, periodic monitoring of the fiber technical condition is carried out. Within the framework of the proposed methodology, it is assumed that the degradation cycle of an optical cable is divided into degradation states of a certain duration, which, in turn, consist of intervals for checking the condition of the optical fiber in the cable. At the same time, mathematical models using semi-Markov processes are considered, reflecting the state of an optical cable during one testing period, in one degradation state, and on a degradation cycle. Expressions and dependencies have also been obtained showing how sudden and gradual failures affect the reduction of the duration of the optical cable degradation cycle.

Keywords: fiber optic cable, degradation failure, sudden failure, reliability measures, periodic monitoring, testing period, degradation cycle, service life, signal attenuation, connection at the cable breakage point, semi-Markov process.

For citation: Shuvalov V. P., Zelentsov B. P., Kvitkova I. G. On the Effect on the Optical Cable Degradation Cycle of the Method of Restoring Communication by Connecting the Cable at the Breakage Point (in Russian) Vestnik SibGUTI, 2024, vol. 18, no. 4, pp. 87-100. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2024-18-4-87-100>.



Content is available under the © Shuvalov V.P., Zelentsov B.P., Kvitkova I.G.,
license Creative Commons Attribution 4.0 License 2024

The article was submitted: 20.06.2024;
revised version: 02.07.2024;
accepted for publication 11.07.2024.

References

1. *Kemel'bekov B. Zh., Myshkin V. F., Han V. A.* Optical communication cables [Opticheskie kabeli svjazi]. Tomsk, NTL, 2001. 352 p.
2. *Shuvalov V. P., Timchenko S. V., Derevyashkin V. M., Kvitkova I. G.* K raschetu nadezhnosti opticheskogo volokna pri razlichnyh usloviyah jekspluatacii [To calculate the reliability of optical fiber under various operating conditions]. *Nauka i biznes: puti razvitija*, 2020, no. 9 (111), pp. 46-48.
3. *Shuvalov V. P., Zelencov B. P., Kvitkova I. G.* Model' nadjozhnosti volokonno-opticheskoy linii svjazi pri nedostovernom prognoziruujushhem kontrole [A reliability model of a fiber-optic communication line with unreliable predictive monitoring]. *Vestnik SibGUTI*, 2020, № 4, pp. 66-76.

4. *Shuvalov V. P., Timchenko S. V., Kvitkova I. G.* Metody tehničeskogo obsluživanja i remonta optovolokonnyh linij [Methods of maintenance and repair of fiber optic lines]. *Nauka i biznes: puti razvitija*, 2023, no. 5 (143), pp. 75-79.
5. *Shuvalov V. P., Kvitkova I. G.* Tehniko-jekonomičeskij analiz passivnyh optičeskikh setej dostupa bol'shogo radiusa dejstvija [Technical and economic analysis of long-reach passive optical access networks]. *Sbornik materialov VI Vserossijskoj nauchno-praktičeskoj konferencii «Informacionnye tehnologii i kognitivnaja jelektrosvjaz'»*, Ekaterinburg, 2020, pp. 45-49.
6. *Gulina O. M., Zhiganshin A. A., Chepurko V. A.* Razrabotka kriterija optimizacii sroka sluzhby jenerglobloka [Development of criteria for optimizing the service life of a power unit]. *Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika*, 2001, no. 2, pp.10-14.
7. *Gulina O. M., Merkun A. V., Semishkin V. P.* Risk-orientirovannyj podhod v metodologii upravlenija resursom [Risk-based approach in resource management methodology]. *Voprosy atomnoj nauki i tehniki. Serija: fizika jadernyh reaktorov*, 2021, no. 2, pp. 92-98.
8. *Andreev V. A., Burdin V. A., Dashkov M. V., Popov V. B.* Analiz opyta tehničeskoj jekspluatacii linejno-kabel'nyh sooruzhenij transportnoj mnogokanal'noj kommunikacii [Analysis of the experience of technical operation of linear cable structures of multichannel transport communication]. *Electrosvyaz*, 2021, no. 1, pp. 64-66.
9. *A. Yu. Cym*, Sroki sluzhby optičeskikh kabelej. Analizy. Riski. [The service life of optical cables. Analyzes. Risks]. *Cables and Wires*, 2020, no. 2 (382), pp. 20-26.
10. *Andreev V. A., Burdin V. A., Nizhgorodov A. O.* Scenarii prognoza sroka sluzhby optičeskogo volokna v kabel'nyh linijah svjazi [Scenarios for predicting the service life of optical fiber in cable communication lines]. *Pervaja milja*, 2020, no. 4 (89), pp. 34-43.
11. *Shuvalov V. P., Zelentsov B. P., Kvitkova I. G.* On the Effect of Sudden Failures and Control Errors of the First Kind on the Degradation Cycle of an Optical Cable. *Proc. of IEEE 16th International Conference of Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2023)*, Novosibirsk, 10-12 Nov 2023, pp. 550-555.
12. *Andreev V. A., Burdin V. A., Dashkov M. V., Nizhgorodov A. O.* Prognoz sroka sluzhby optičeskogo kabelja. Dva podhoda k ocenivaniju aktual'noj prochnosti optičeskikh volokon kabel'noj linii [The forecast of the service life of the optical cable. Two approaches to assessing the actual strength of cable line optical fibers]. *Foton-express*, 2021, no. 6 (174), pp. 220-221.
13. *Burdin A. V., Burdin V. A., Dashkov M. V., Nizhgorodov A. O.* Kontrol' prochnosti optičeskikh volokon v zadachah prognoza resursa optičeskikh kabelej na VOLS [Control of the strength of optical fibers in the tasks of forecasting the resource of optical cables on FOCL]. *Materialy VIII Molodezhnoj mezhdunarodnoj nauchno-tehničeskoj konferencii molodyh učennyh, aspirantov studentov «Prikladnaja jelektrodinamika, fotonika i zhivye sistemy -2021»*, Kazan, 2021, pp. 11-15.
14. *Andreev V. A., Burdin A. V., Burdin V. A., Dashkov M. V.* Metod nerazrushajushhego kontrolja prochnosti kvarcevog optičeskogo volokna [The method of non-destructive testing of the strength of quartz optical fiber]. *Komp'juternaja optika*, 2022, vol. 46, no. 2, pp. 224-231.
15. *Shuvalov V., Ionikova E., Karpov K.* Method for Determining the Number of States of the Markov Model of Damage Accumulation in Predicting the Technical Condition of a Fiber-Optic Cable. *Proc. of international Conference on Applied Innovation in IT*, Koethen, Germany, 7 March 2021, vol. 9, iss. 1, pp. 13-19.
16. *Shuvalov V. P., Zelencov B. P., Kvitkova I. G.* Model' nadjozhnosti optovolokna v uslovijah degradacii [A model of optical fiber reliability under degradation conditions]. *Vestnik SibGUTI*, 2022, no. 3 (59), pp. 56-61.
17. *Bogachkov I., Gorlov N., Monastyrskaya T., Medvedeva N.* Monitoring in the Physical Channels of Optical Access Networks. *Proc. of International Conference on Applied Innovation in IT (ICAIIIT-2023)*, Koethen, Germany, 9 March 2023, vol. 11, iss. 1, pp. 49–53.
18. *Gorlov N. I.* Poslednie issledovanija i razrabotki v oblasti monitoringa optičeskogo volokna v sistemah svjazi [Recent research and development in the field of optical fiber monitoring in communication systems]. *Infokommunikacionnye tehnologii: aktual'nye voprosy cifrovoj jekonomiki. Sbornik nauchnyh trudov III Mezhdunarodnoj nauchno-praktičeskoj konferencii*, Ekaterinburg, 2023, pp. 35-39.
19. *Gorlov N. I.* Optical reflectometry based on the principle of separation of the difference frequency of the brillouin scattering spectrum. *Proc. of International Scientific-Practical Conference on Information Innovative Technologies*, Prague, 25-29 April 2022, pp. 280-286.

20. *Gorlov N. I.* Monitoring fizicheskoj sredy opticheskoj seti dostupa [Monitoring of the physical environment of the optical access network]. Aktual'nye problemy infotelekkommunikacij v nauke i obrazovanii (APINO 2023). Sbornik nauchnyh statej. XII Mezhdunarodnaja nauchno-tehnicheskaja i nauchno-metodicheskaja konferencija, Saint-Petersburg, 2023, pp. 360-364.
21. *Gorlov N. I.* Monitoring podvodnyh volokonno-opticheskijh linij svjazi [Monitoring of underwater fiber-optic communication lines]. Informacionnye tehnologii i kognitivnaja jelektrosvjaz'. Sbornik nauchnyh trudov IX Vserossijskoj nauchno-prakticheskijh konferencii, Ekaterinburg, 2023, pp. 54-57.
22. *Gorlov N. I.* Metody monitoringa fizicheskoj sredy passivnyh opticheskijh setej [Methods of monitoring the physical environment of passive optical networks]. Infokommunikacionnye tehnologii: aktual'nye voprosy cifrovoj jekonomiki. Sbornik nauchnyh trudov III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskijh konferencii, Ekaterinburg, 2023, pp. 46-49.
23. *Shuvalov V. P., Karpov K. A., Ionikova E. P.* Metodika opredelenija verojatnosti otkaza opticheskogo volokna ot tekushhego vremeni jekspluatacii [A method for determining the probability of failure of an optical fiber on the current operating time] Vestnik SibGUTI, 2021, no. 2, pp. 60-68.
24. *Efanov V. I.* Design, construction and operation of FOCL [Proektirovanie, stroitel'stvo i jekspluatacija VOLS]. Tomsk, TUSUR. 2012. 102 p.

Vyacheslav P. Shuvalov

Dr. of Sci. (Engineering), Professor; Professor of the Department of Infocommunication Networks and Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone: +7 383 26982 43, e-mail: shvp04@mail.ru, ORCID: 0000-0002-1670-4753.

Boris P. Zelentsov

Dr. of Sci. (Engineering), Professor, e-mail: zelentsov@mail.ru, ORCID: 0000-0002-5532-0963.

Irina G. Kvitkova

Senior Lecturer of the Department of Infocommunication Networks and Systems, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Russia, 630102, Novosibirsk, Kirov St. 86), phone: +7 383 26982 44, e-mail: irin.creme@yandex.ru, ORCID: 0000-0003-1745-9582.