

Модель надёжности оптоволоконна в условиях деградации

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

Для расчёта надёжности оптического волокна в условиях деградации предложена марковская модель, позволяющая учитывать ухудшение характеристик оптического кабеля в процессе его эксплуатации. Приведена методика расчета коэффициента неготовности при различном времени эксплуатации, а также пример расчета коэффициента неготовности.

Ключевые слова: пассивная оптическая сеть доступа, деградация оптоволоконна, деградационный отказ, показатели надёжности, время эксплуатации оптического кабеля.

1. Введение

В 2019 году Международным союзом электросвязи (МСЭ-Т) была предложена концепция «Сеть – 2030» (Network 2030), представленная в документах [1, 2, 3].

Согласно этой концепции сеть доступа должна поддерживать «услуги с максимально доступным качеством (best effort), а также высоконадёжные (коэффициент готовности 0.9999999 и выше) и высокоскоростные услуги» [4]. В рамках концепции «Сеть – 2030» также ставится задача по преобразованию сетей доступа в многофункциональную платформу по предоставлению услуг и доступа с предоставлением услуг с коэффициентом готовности более семи девяток. Реализация таких сетей должна осуществляться на основе использования оптического кабеля. Известно, что в среднем на один километр число внезапных отказов оптического кабеля (ОК) на интервале 10^9 часов ровно 570 FIT (Failure in Time) [5], где один FIT – это один отказ за 10^9 часов. При увеличении длины ОК до 100 км число отказов за 10^9 часов возрастает до 57000. Такая длина ОК характерна для сетей доступа большого радиуса действия [6]. При этом для обеспечения значения коэффициента готовности 0.9999999 время восстановления должно быть не более 0.1 минуты, что невозможно обеспечить без резервирования.

В составе пассивной оптической сети доступа, кроме ОК, имеются: оптический линейный терминал (Optical Line Terminal, OLT), оптический сетевой терминал (Optical Network Terminal, ONT), сплиттеры, оптические мультиплексоры/демультиплексоры. Однако значение коэффициента готовности цепочки OLT–ONT будет в основном определяться интенсивностью отказов ОК.

Помимо внезапных отказов на определённом этапе жизни оптоволоконна приходится считаться с постепенными или деградационными отказами. В ГОСТ 27.102-2021 [7] под деградационным отказом понимается «отказ, обусловленный естественными процессами старения, износа, коррозии и усталости при соблюдении правил и (или) норм проектирования, изготовления и эксплуатации». Именно деградационные отказы определяют срок службы ОК. Иногда к необходимости замены ОК приводит так называемый моральный износ - несоответствие параметров ОК современным условиям эксплуатации.

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания № 122032300218-6.

В процессе деградации ОК может находиться в состояниях, которые можно охарактеризовать:

1. Значением вероятности отказа ОК на данном временном интервале.
2. Значением времени жизни ОК, т.е. временем до достижения им предельного состояния (ГОСТ 27.102–2021).
3. Значением ослабления сигнала [8] в цепочке OLT–ONT. При определённом значении ослабления обмен информацией в цепочке OLT–ONT станет невозможным.
4. Стоимостью выполнения ремонтных работ. Она растёт с годами, что рано или поздно приводит к необходимости замены ОК.

Выберем далее в качестве характеристики состояния деградации интенсивность отказов. Как отмечается в [9], именно возрастание интенсивности отказов $\lambda(t)$ с физической точки зрения является наиболее естественной характеристикой деградации. Перечисленные выше варианты фиксации состояний деградации можно в той или иной мере увязать с $\lambda(t)$.

В [10] рассмотрены два подхода к оценке срока жизни ОК: на основе анализа старения оболочки кабеля и старения оптоволокна (ОВ). В данной работе используется второй подход, основанный на прогнозе срока службы ОВ.

Разобьём время эксплуатации оптоволоконной линии на временные интервалы длительностью T . Каждый такой интервал назовем периодом эксплуатации. Будем полагать, что значения интенсивности отказов на каждом из временных интервалов известны [11]. Найдём выражение для расчёта коэффициента неготовности за i периодов эксплуатации.

2. Модель для расчета параметров надежности оптоволокна в условиях деградации

При формировании модели приняты следующие условия.

1. При эксплуатации ОВ имеют место отказы, обнаруживаемые в момент их возникновения (явные отказы). После обнаружения отказа происходит восстановление линейного участка, на котором произошел отказ, путем его замены.
2. Время эксплуатации ОВ разбивается на периоды с одинаковой продолжительностью T .
3. Каждый период характеризуется определенным состоянием деградации, который описывается соответствующей интенсивностью отказов.
4. С увеличением номера периода эксплуатации растёт число повреждений и, соответственно, возрастает интенсивность отказов.
5. Время восстановления (устранения отказа) на каждом периоде эксплуатации является случайным, интенсивность восстановления является постоянной и одной и той же на каждом периоде эксплуатации.

2.1. Диаграмма состояний модели

Для моделирования процессов деградации используются различные подходы и, в частности, моделирование на основе марковских или полумарковских процессов [12, 13]. Так как интенсивность отказов, обусловленных деградацией, может только увеличиться, то процесс деградации часто описывают процессом «чистой гибели».

Диаграмма состояний ОВ приведена на рис. 1. На диаграмме обозначено: D_i – состояние деградации на i -м периоде эксплуатации ($i = 1, 2, 3, \dots$), λ_i – интенсивность отказов на i -м периоде эксплуатации, R – восстановление работоспособного состояния отказавшего участка ОК, μ – интенсивность восстановления (определяется временем подъезда ремонтной бригады к месту неисправности и временем ремонта), iT – момент перехода из i -го в $(i+1)$ -й период эксплуатации, отсчитываемый от начала эксплуатации ОК.

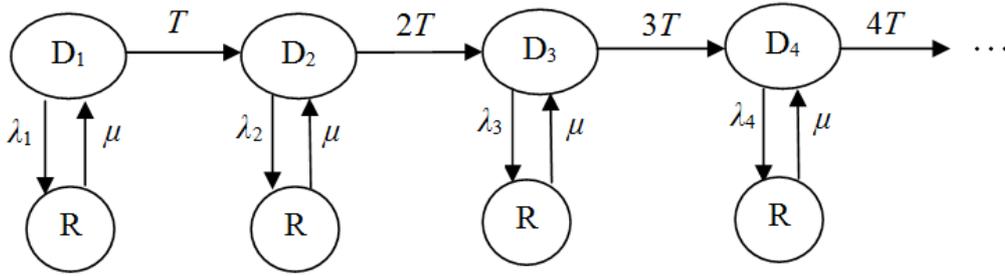


Рис. 1. Диаграмма состояний-переходов ОБ в процессе деградации

2.2. Определение параметров надежности модели

Будем считать, что на каждом периоде эксплуатации имеет место стационарный (установившийся) процесс отказов и восстановлений. В этом случае среднее число отказов в единицу времени на i -ом периоде с учётом восстановлений вычисляется по формуле [14]:

$$\omega_i = \lambda_i \cdot \mu / (\lambda_i + \mu). \quad (1)$$

Тогда среднее число отказов на i -м периоде эксплуатации равно:

$$n_i = \omega_i \cdot T. \quad (2)$$

Коэффициент готовности и коэффициент неготовности на i -м периоде эксплуатации:

$$k_{ги} = \frac{\mu}{\lambda_i + \mu}; \quad k_{ни} = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu}. \quad (3)$$

Для случая, когда время восстановления пренебрежительно мало (условие $\lambda_i \ll \mu$), выражения (1) и (2) имеют вид:

$$\omega'_i \approx \lambda_i, \quad n'_i \approx \lambda_i \cdot T.$$

Среднее число отказов за i периодов:

$$N_i = \sum_{j=1}^i n_j = \mu \cdot T \cdot \sum_{j=1}^i \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu}. \quad (4)$$

За i периодов эксплуатации суммарное среднее время восстановления составит:

$$T_{би} = N_i / \mu = T \cdot \sum_{j=1}^i \frac{\lambda_j}{\lambda_j + \mu} \quad (5)$$

Коэффициент неготовности за i периодов эксплуатации составит:

$$K_{ни} = T_{би} / (i \cdot T) = \left[\sum_{j=1}^i k_{ни} \right] / i, \quad (6)$$

где $k_{ни}$ определяется из выражения (3).

На рис. 2 изображен график зависимости $K_{ни}(i)$ при постоянных значениях λ_i и $\mu = 1/3$ (1/ч) [15]. Из рис. 2 видно, что коэффициент неготовности возрастает с увеличением времени эксплуатации ОК.

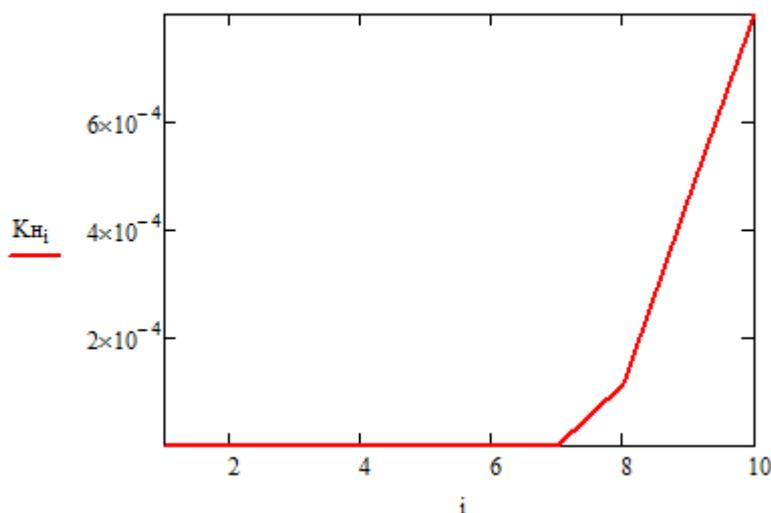


Рис. 2. Зависимость K_{ni} от времени эксплуатации ОК

В табл. 1 представлены значения коэффициента неготовности для интенсивности отказов в зависимости от времени эксплуатации ОК для нагрузки 2.02 ГПа, приведенных в [11]. При этом время эксплуатации разбито на 10 интервалов времени T , равных 3.25 лет. [11]

Таблица 1. Значения коэффициента неготовности оптоволокна в зависимости от интенсивности отказов

Параметр	Значение									
$\mu, 1/\text{ч}$	1/3									
i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\lambda_i \cdot 10^{-8}, 1/\text{ч}$	2.217	2.389	4.938	5.871	6.716	8.279	10.23	$0.3805 \cdot 10^4$	$1.52 \cdot 10^4$	$2.66 \cdot 10^4$
$K_{ni} \cdot 10^{-8}$	6.651	7.167	14.87	17.61	20.15	24.84	30.69	$1.141 \cdot 10^4$	$4.558 \cdot 10^4$	$7.974 \cdot 10^4$

Из рис. 2 и табл. 1 виден характер зависимости коэффициента неготовности от времени эксплуатации ОК.

3. Заключение

В работе предложена марковская модель для расчета параметров надежности ОК в условиях деградации. Приведена методика определения коэффициента готовности и коэффициента неготовности ОК на различных периодах эксплуатации. Используя данную методику, можно определить момент, когда состояние ОК потребует его замены вследствие превышения коэффициентом неготовности критического значения. Определение критического значения коэффициента неготовности является отдельной технико-экономической задачей.

Литература

1. Network 2030 – A Blueprint of Technology, Applications, and Market Drivers towards the Year 2030 and Beyond // FG-NET-2030. May, 2019.
2. ITU-T FG-NET-2030 Deliverable: New services and capabilities for Network 2030: description, technical gap and performance target analysis, 2019.
3. ITU-T FG-NET-2030 Technical Specification: Network 2030. Architecture Framework, 2020.

4. *Пшеничников А. П., Росляков А. В.* Будущие сети: учебник для вузов. М.: Горячая линия – Телеком, 2021. 300 с.
5. *Saxena J, Goel A.* Reliability and Maintainability of Passive optical component // International Journal of Computer Trends and Technology. 2011. V. 21, № 1. P. 20–23.
6. *Шувалов В. П., Фокин В. Г.* Оптические сети доступа большого радиуса действия. М.: Горячая линия – Телеком, 2018. 187 с.
7. ГОСТ Р 27.102-2021. Надежность в технике: надежность объекта. Термины и определения. М.: Российский институт стандартизации, 2021. 36 с.
8. *Maslo A., Hodzic M., Skaljo E., Mujcic A.* Aging and degradation of optical fiber parameters in a 16-year-long period of usage // Fiber and Integrated Optics. Feb., 2020. V. 39, № 1. P. 39–52.
9. *Ушаков И. А.* Курс теории надежности систем: учебное пособие для вузов. М.: Дрофа, 2008. 239 с.
10. *Цым А. Ю.* Сроки службы оптических кабелей. Анализ. Риски. // Наука и техника. 2020, № 2 (382). С. 20–26.
11. *Ionikova E., Karpov K., Shuvalov V.* Reliability of optical cable under gradual failures taking into account the degree of fiber degradation // Proc. of the XV International scientific and technical conference “Actual problems of electronic instrument engineering” (APEIE-2021), Novosibirsk, 19–21 November, 2021. P. 327–332.
12. *El-Damcese V. A., Temraz N. S.* Availability and reliability measures for multistate system by using Markov reward model // Reliability: Theory and Applications, 2011. V. 6, № 3. P. 68–85.
13. *Kharoufeh J. P., Solo C. J., Ulukus M. Y.* Semi-Markov models for degradation-based reliability // Journal of IEEE Transactions. May, 2010. V. 42, № 8. P. 599–612.
14. *Зеленцов Б. П.* Частотный метод моделирования вероятностных систем длительного использования // Вестник СибГУТИ. 2016. № 4. С. 25–38.
15. *Алексеев Е. Б., Гордиенко В. Н., Крухмалев В. В. и др.* Проектирование и техническая эксплуатация цифровых телекоммуникационных сетей. М.: Горячая линия – Телеком, 2008. 392 с.

*Статья поступила в редакцию 08.07.2022;
переработанный вариант – 26.07.2022.*

Шувалов Вячеслав Петрович

д.т.н., профессор; профессор кафедры ИКСС СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), тел. (383) 269-82-43, e-mail: shvp04@mail.ru.

Зеленцов Борис Павлович

д.т.н., профессор кафедры высшей математики СибГУТИ, e-mail: zelentsov@mail.ru.

Квиткова Ирина Геннадьевна

старший преподаватель кафедры ИКСС СибГУТИ, тел. (383) 269-82-44, e-mail: irin.creme@yandex.ru.

Optical fiber reliability model under degradation conditions

Vyacheslav P. Shuvalov

Doctor of technical sciences, Professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), shvp04@mail.ru.

Boris P. Zelencov

Doctor of technical sciences, Professor, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), zelentsov@mail.ru.

Irina G. Kvitkova

Senior lecturer, Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS, Novosibirsk, Russia), irin.creme@yandex.ru.

To calculate the reliability of an optical fiber under degradation conditions, the Markov model taking into account the worsening of fiber characteristics during its operation is proposed. The methodology for calculating the unavailability factor at different operating times is given as well as an example of estimating the unavailability factor.

Keywords: passive optical access network, degradation of fiber, degradation failure, reliability indicators, operating time of fiber.

References

1. Network 2030 – A Blueprint of Technology, Applications, and Market Drivers towards the Year 2030 and Beyond. *FG-NET-2030*, May, 2019.
2. ITU-T *FG-NET-2030 Deliverable: New services and capabilities for Network 2030: description, technical gap and performance target analysis*, 2019.
3. ITU-T *FG-NET-2030 Technical Specification: Network 2030. Architecture Framework*, 2020.
4. Pshenichnikov A.P., Roslyakov A.V. *Budushchie seti* [Future networks]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2021, 300 p.
5. Saxena J, Goel A. Reliability and Maintainability of Passive optical component. *International Journal of Computer Trends and Technology*, 2011, vol. 21, iss. 1, pp. 20-23.
6. SHuvalov V.P., Fokin V.G. *Opticheskie seti dostupa bol'shogo radiusa dejstviya* [Long-reach optical access networks]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2018, 187 p.
7. GOST R 27.102-2021. *Nadezhnost' v tekhnike: nadezhnost' ob"ekta. Terminy i opredeleniya* [Reliability in technology: the reliability of the object. Terms and definitions]. Moscow, Rossijskij institut standartizacii, 2021, 36 p.
8. Maslo A., Hodzic M., Skaljo E. and Mujcic A. Aging and degradation of optical fiber parameters in a 16-year-long period of usage. *Fiber and Integrated Optics*, 2020, vol. 39, iss. 1, pp. 39-52.
9. Ushakov I.A. *Kurs teorii nadezhnosti sistem* [The course of the theory of systems reliability]. Moscow, Drofa, 2008, 239 p.
10. Cym A. YU. Sroki sluzhby opticheskikh kabelej. Analizy. Riski [Lifetime of optical cables Analyses. Risks.]. *Nauka i tekhnika*, 2020, no. 2 (382), pp. 20-26.
11. Ionikova E., Karpov K., Shuvalov V. Reliability of optical cable under gradual failures taking into account the degree of fiber degradation. *Proceedings of the XV international scientific and technical conference «Actual problems of electronic instrument engineering» (APEIE-2021)*, Novosibirsk. 19-21 November, 2021, pp. 327-332.
12. El-Damcese V.A., Temraz N.S. Availability and reliability measures for multistate system by using Markov reward model. *Reliability: Theory and Applications*, 2011, vol. 6, iss. 3 (22), pp. 68-85.
13. Kharoufeh J.P., Solo C.J., Ulukus M.Y. Semi-Markov models for degradation-based reliability. *Journal of IIE Transactions*, 2010, vol. 42, iss. 8, pp. 599-612.
14. Zelencov B.P. *CHastotnyj metod modelirovaniya veroyatnostnyh sistem dlitel'nogo ispol'zovaniya* [Frequency method for modeling probabilistic systems of long-term use] . *Vestnik SibGUTI*, 2016, no. 4, pp. 25-38.
15. Alekseev E.B., Gordienko V.N., Kruhmalev V.V. et al. *Proektirovanie i tekhnicheskaya ekspluatatsiya cifrovyyh telekommunikacionnyh setej* [Design and technical operation of digital telecommunication networks]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2008, 392 p.