

А.Л. Зубилевич, канд. техн. наук,
 профессор кафедры «Направляющие телекоммуникационные среды»;
С.А. Сиднев, канд. техн. наук, доцент кафедры «Менеджмента»;
В.А. Царенко, аспирант кафедры «Менеджмента»;
 Московский технический университет связи и информатики (МТУСИ)

К вопросу о резервировании оптических волокон в кабелях связи

Аннотация. Способность сети выполнять заданные функции при определённых условиях в течение заданного времени, является одной из главных задач при проектировании, строительстве и эксплуатации линий связи. В статье оптические линии связи разделяются на, условно говоря, традиционные и проложенные в труднодоступной местности. К последнему случаю следует отнести подводные оптические кабели, подвесные и подземные ОК, проложенные в местах, доступ к которым для обслуживающего персонала затруднен или невозможен. В работе рассматриваются вопросы резервирования оптических волокон для кабелей связи, проложенных в труднодоступной местности.

Ключевые слова: оптоволоконные кабели (ОК); оптические волокна (ОВ); резервирование; надёжность; ожидаемые затраты на резервирование.

Abstract. The ability of the network to perform the specified functions under certain conditions for a given time is one of the main tasks in the design, construction and operation of communication lines. In the article, optical communication lines are divided into, conventionally speaking, traditional ones and laid in hard-to-reach terrain. To the last case it is necessary to attribute underwater optical cables, suspended and underground OK, laid in places, access to which is difficult or impossible for the maintenance personnel. The paper deals with the redundancy of optical fibers for communication cables laid in hard-to-reach terrain.

Key words: optic fiber cables (OFC); optical fibers (OF); redundancy; reliability; expected costs of redundancy.

Материал поступил в редакцию 09.04.2018
 E-mail: mtuci@mtuci.ru
 Царенко В.А. E-mail: vtsarenko@mail.ru

Оптический кабель (ОК) – это сложная техническая система, в которой наиболее уязвимыми элементами являются оптические волокна (ОВ) [1, 5–7]. Существует множество факторов, которые, воздействуя на ОК, приводят к повреждениям ОВ. К основным можно отнести механические факторы (растяжение, сдавливание, изгибы, скручивание, вибрации, высокое избыточное гидростатическое давление (характерно для подводных кабелей), климатические факторы (циклическая смена температур, атмосферные явления, прямое длительное воздействие воды) и электромагнитные факторы (импульсный ток молнии и индуктивные напряжения от источников высокого напряжения (характерны для подземных и подвесных кабелей) [1–7].

Для того, чтобы кабель прослужил необходимое количество лет с минимальными затратами на ремонтные работы, полностью выполняя свои функции, вероятность случайного отказа должна быть максимально снижена [2–4, 7]. Традиционно для этого применяется резервирование, то есть целенаправленное введение в систему определенной избыточности, например, используются дополнительные ОВ.

В настоящий момент нет четких рекомендаций относительно выбора количества резервных волокон. Операторы связи в большей степени полагаются на собственный опыт и предпочтения. Например, существует несколько негласных правил, определяющих процентное соотношение резервных ОВ по отношению к основным волокнам для разных участков сети [8]:

- магистральный участок: 50–100 %;
- распределительный участок: 20–50 %;
- абонентский участок: 0–20 %.

Задача ставится следующим образом: сколько нужно резервных ОВ, чтобы гарантировать с достаточной вероятностью работу кабеля в течение заданного времени?

В общем случае количество ОВ в кабеле можно считать равным n ,

где $n = z + m$;

z – количество активных (действующих) ОВ;

m – количество резервных ОВ.

Будем считать, что управление ресурсами при отказах ОВ осуществляется следующим образом: при нормальном режиме действующие ОВ образуют рабочую подсистему. Оставшиеся избыточные ОВ образуют подсистему резерва. В случае отказа одного из активных ОВ система поддерживается работоспособной за счёт замены повреждённого ОВ одним из резервных ОВ до полного исчерпания подсистемой резерва. Неблагоприятный случай (система не может выполнять свои функции в полном объёме) наступает, когда из общего числа ОВ отказывает одно из активных волокон и в подсистеме резерва исчерпаны все ОВ.

Составим размеченный граф состояний системы (рис. 1), где имеются n оптических волокон, из которых m – резервные. Каждое состояние характеризуется своей вероятностью $P_i(t)$, где t – время. Вероятность неблагоприятного случая обозначим P_H . При m резервных ОВ случай P_H возникает, когда наступает состояние $m + 1$.

По правилу Колмогорова

$$P_i'(t) = \lambda_{i-1}P_{i-1}(t) - \lambda_i P_i(t), \quad (1)$$

при $i = 0$, $P_0'(t) = -n\lambda P_0(t)$,

где λ – интенсивность отказа ОВ;

t – временной интервал между ремонтными работами ОК.

Решая систему уравнений (1), воспользовавшись правилами операционного исчисления, получаем:

$$sP_i(s) = \lambda_{i-1}P_{i-1}(s) - \lambda_i P_i(s), \quad (2)$$

при $i = 0$, с учётом начального условия $P_0(0) = 1$, $sP_0(s) - 1 = -n\lambda P_0(s)$.

Решая систему (2), находим $P_{m+1}(s)$.

С помощью обратного преобразования Лапласа определяем вероятность наступления неблагоприятного случая

$$P_H = P_{m+1}(t) = 1 - \frac{(z+m)!}{(z-1)!} \sum_{i=0}^m \frac{(-1)^i e^{-(z+i)\lambda t}}{i!(m-i)!(z+i)}. \quad (3)$$

Результаты расчёта по выражению (3) представлены на рис. 2.

Исходя из первоначальных капитальных затрат, необходимых на резервные волокна, и дальнейших возможных расходов, которые включают в себя затраты на ремонтные работы и потери в случае простоя линии связи, можно представить общие затраты на резервирование [2, 3, 7]:

$$Z_{\text{общ}} = P_H \cdot C_{\text{рем}} + m \cdot C_{\text{ОВ}} \cdot k \cdot L, \quad (4)$$

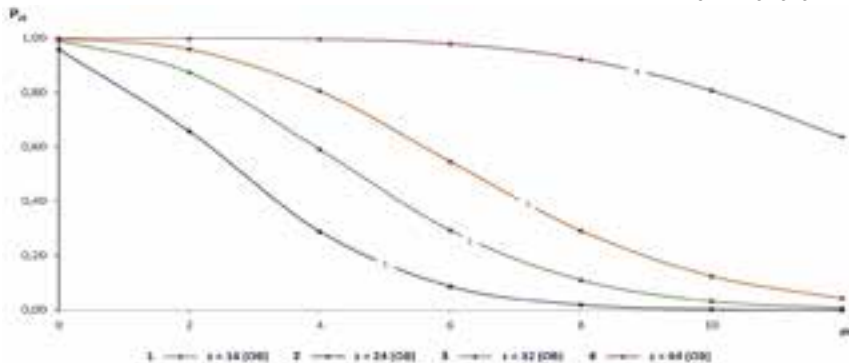


Рис. 2. Зависимости вероятности P_H от числа резервных ОВ ($t = 5$ лет; $\lambda = 0,04$ 1/год)

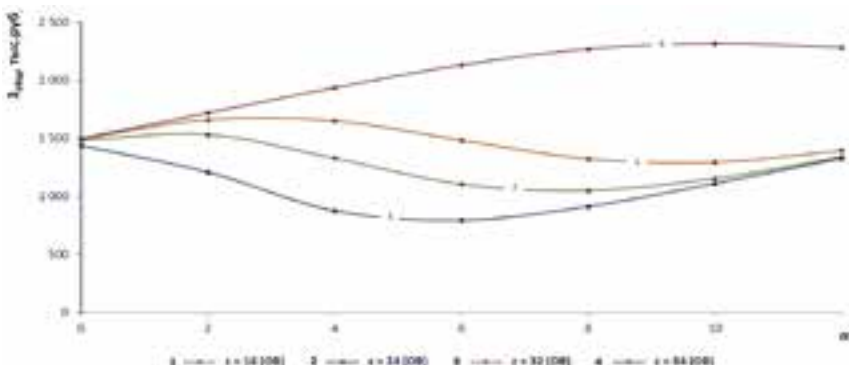


Рис. 3. Зависимость затрат на резервирование от числа резервных оптических волокон ($L = 100$ км; $C_{\text{ОВ}} = 900$ руб.; $k = 1,25$; $C_{\text{рем}} = 1500$ тыс. руб.)

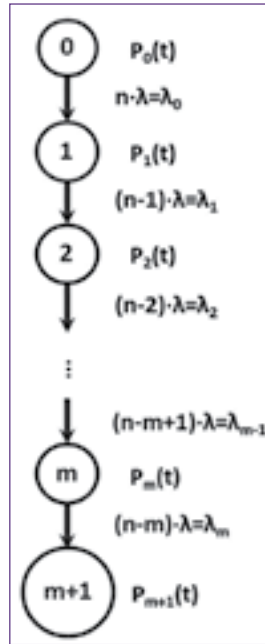


Рис. 1. Размеченный граф состояний

где $C_{\text{рем}}$ – потери, включающие затраты на внеплановые ремонтные работы и потери из-за простоя линии связи;

$C_{\text{ОВ}}$ – стоимость одного километра ОВ;

k – коэффициент учитывающий стоимость работ по укладке резервных оптических волокон в кабель, стоимость монтажно-измерительных работ и прочее;

L – длина кабеля.

Допускаем, что увеличение числа резервных волокон не сказывается на размерах оптического кабеля.

Результаты расчёта по формуле (4) представлены на рис. 3, где по минимуму величины $Z_{\text{общ}}$ можно определить число требуемых резервных оптических волокон.

Вывод

Получены аналитические выражения, позволяющие оценивать и находить минимальные затраты оператора на резервирование оптических волокон в оптических кабелях связи. Подход к решению задачи одинаков для разных линий связи (подводных, подвесных, подземных). Различия будут в интенсивности отказов ОВ и стоимости ремонтных работ. Применение предлагаемого подхода целесообразно для кабелей, проложенных в труднодоступных местах, ремонт которых затруднён или невозможен в течение длительного времени.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зубилевич А.Л., Колесников В.А. К вопросу о выборе оптических волокон // Т-Сотт: Телекоммуникации и транспорт. – 2010. – № 8, Т.4. – С. 7–9.
2. Зубилевич А.Л., Колесников О.В., Сиднев С.А., Царенко В.А. Выбор способа прокладки оптического кабеля с учетом грозоповерхности // Кабели и провода. – 2015. – № 6 (355). – С. 14–15.
3. Зубилевич А.Л., Сиднев С.А., Царенко В.А. К вопросу о выборе способа прокладки подземного оптического кабеля // Кабели и провода. – 2016. – № 6 (361). – С. 19–22.
4. Мамлин С.А., Портнов Э.Л. Расчёт надежности подводной волоконно-оптической линии связи вдоль побережья Краснодарского края от порта «Кавказ» до села Веселое // Труды Северо-Кавказского филиала Московского технического университета связи и информатики. – 2015. – № 1. – С. 184–187.
5. Направляющие системы электросвязи: учеб. для вузов. В 2-х томах. Том 1. Теория передачи и влияния / В.А. Андреев, Л.Н. Кочановский, Э.Л. Портнов. Под ред. Андреева В.А. – 7-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. – 424 с.
6. Руководящие указания по проектированию подводных волоконно-оптических кабельных систем. Рекомендации МСЭ-Т серии G – Добавление 41 (05/2005)
7. Сиднев С.А., Царенко В.А. Транспортные ВОЛС: выбор типа оптического волокна в условиях неопределенности // Первая миля. – 2015. – № 5 (50). – С. 32–35.
8. Проектирование PON [Электронный ресурс] URL: <http://ic-line.ru/proekty/gu-pop/> (дата обращения 07.04.2018).