

# РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ВОЛОКОН в кабелях, проложенных в труднодоступных местах

А.Зубилевич, к.т.н., профессор МТУСИ,  
С.Сиднев, к.т.н., доцент МТУСИ,  
В.Царенко, аспирант МТУСИ / vtsarenko@mail.ru

УДК: 330.332.5, 519.873, 621.315.235, 621.36, 65.011.46; DOI: 10.22184/2070-8963.2018.74.5.16.19

Яркий пример прокладки ВОЛС в труднодоступных местах – кабельные подводные линии связи, общая протяженность которых превышает в настоящее время 300 тыс. км. Их надежная работа является главной задачей при проектировании оптических линий связи. В статье рассматриваются вопросы резервирования в подводных оптических кабелях.

## ВВЕДЕНИЕ

Трудно, а порой невозможно отремонтировать оптические кабели (ОК), проложенные по дну рек, морей и океанов. Основные факторы, воздействующие на подводные ОК и приводящие к их повреждениям, – это растягивающие и раздавливающие нагрузки, прямое длительное воздействие воды, циклическая смена температур и т.д. [1-12].

Для того чтобы подводный кабель прослужил необходимое количество лет с минимальными затратами на ремонтные работы, полностью выполняя свои функции, вероятность случайного отказа должна быть максимально снижена [2-4, 6, 8, 11, 12]. Чтобы гарантировать работу кабеля в течение заданного промежутка времени, применяется резервирование, то есть целенаправленное введение в систему определенной избыточности. В нашем случае используются дополнительные оптические волокна (ОВ).

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ ОВ

При использовании дополнительных оптических волокон управление ресурсами при отказах ОВ осуществляется следующим образом: из общего числа ОВ действующие волокна образуют рабочую подсистему, оставшиеся избыточные оптические волокна образуют подсистему резерва. Начиная с момента

ввода объекта в эксплуатацию, система работает, полностью выполняя свои функции, до отказа одного из активных ОВ.

После отказа одного из активных волокон работоспособность системы поддерживается за счет замены поврежденного ОВ одним из резервных ОВ. В случае очередных отказов процесс повторяется до момента, когда в подсистеме резерва будут исчерпаны все ОВ.

Смена состояний системы представлена на графе состояний (рис.1), где:  $n$  – общее число оптических волокон в ОК, из которых  $m$  – резервные ОВ; каждое состояние на графе характеризуется своей вероятностью  $P_i(t)$ , где  $t$  – время; предельное состояние (на графе состояние  $m+1$ ) характеризует наступление неблагоприятного случая, когда система не может выполнять свои функции в полном объеме. Определяется вероятностью наступления неблагоприятного случая  $P_H$ .

В работе [3] получено выражение для расчета  $P_{m+1}(t)$  для случая, когда вышедшее из строя активное ОВ можно заменить любым волокном из подсистемы резерва, где  $P_H$  определяется по выражению:

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

Во многих случаях ОВ (как основные, так и резервные) в ОК работают в двух направлениях (половина волокон на прием, другая половина на передачу). Обмен информации может производиться по одному ОВ в двух направлениях в случае применения направленного оптического ответвления. Однако такое решение не находит применения на практике из-за существенных потерь энергии в таких элементах и связанного с этим значительного сокращения дальности связи. Использование на линиях связи промежуточного усиления приводит к тому, что при выходе из строя активного ОВ поврежденное волокно требуется заменять резервным того же направления. Следовательно, состояние  $m+1$  может наступить как при выходе ОВ одного направления, так и при выходе ОВ другого направления. В такой ситуации вероятность наступления  $P_H$  требуется определять как для одного, так и для другого направления. Расчет в этом случае будет проводиться по формуле сложения вероятностей совместимых событий для определения вероятности выхода ОВ из строя хотя бы одного из направлений [13]:

$$P_{H_{\text{общ}}} = P_{H_{(a)}} + P_{H_{(b)}} - P_{H_{(a)}} \times P_{H_{(b)}}, \quad (2)$$

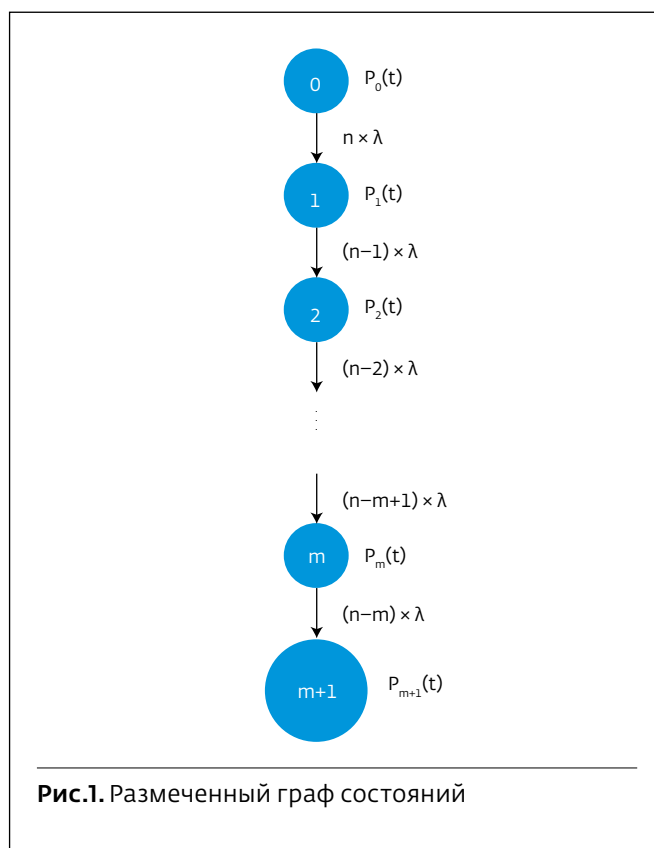
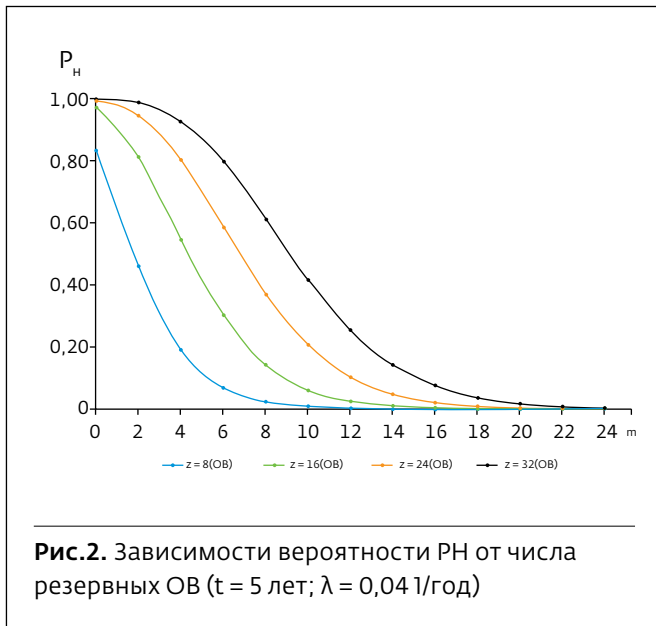
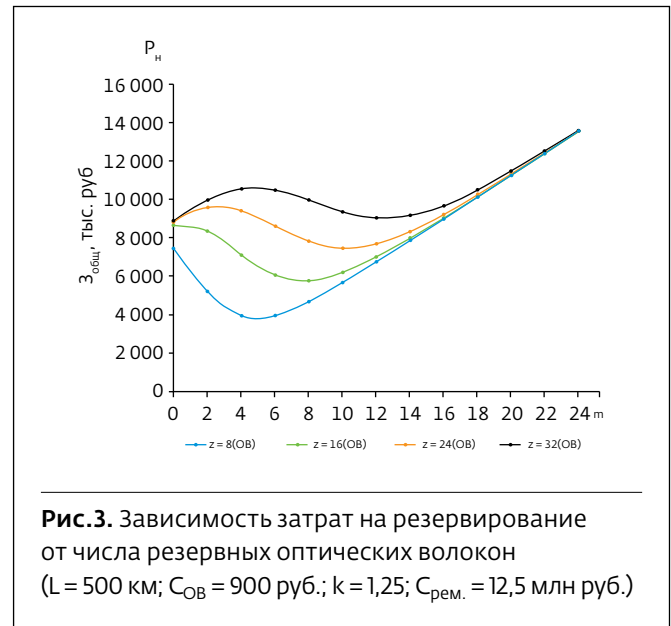


Рис.1. Размеченный граф состояний



**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 ( $L = 500$  км;  $C_{ОВ} = 900$  руб.;  $k = 1,25$ ;  $C_{рем.} = 12,5$  млн руб.)

где  $P_{H(a)}$ ,  $P_{H(b)}$  – вероятность наступления неблагоприятного случая при выходе из строя ОВ, работающих на прием и передачу соответственно.

Поскольку  $P_{H(a)} = P_{H(b)}$ , то

$$P_{H_{общ}} = 2P_H - P_H^2. \quad (3)$$

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

Выбор числа резервных ОВ следует проводить, учитывая как капитальные затраты, необходимые на резервные волокна, так и дальнейшие возможные расходы (затраты на ремонтные работы, потери из-за простоя линии связи). Общие затраты на резервирование можно представить в виде [2-4, 10-12]:

$$Z_{общ} = (m_a + m_b) \times C_{ОВ} \times k \times L + \frac{P_H \times C_{рем}(L, m) \times (1 + d_{инф})^t}{(1 + d)^t}, \quad (4)$$

где:  $C_{рем}$  – потери, включающие затраты на внеплановые ремонтные работы и потери из-за простоя линии связи, рассчитанные исходя из цен и тарифов на начало эксплуатации линий связи;  $m_a$ ,  $m_b$  – число резервных ОВ, работающих на прием и на передачу соответственно;  $C_{ОВ}$  – 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;  $d$  – ставка дисконтирования,  $d = d_0 + d_{инф}$ ;  $d_0$  – ставка

дисконтирования без учета инфляции;  $d_{инф}$  – ожидаемая ставка инфляции;  $t$  – временной интервал от начала эксплуатации линий связи до плановых ремонтных работ (между плановыми ремонтными работами).

При  $d_{инф} < 1$  получаем

$$Z_{общ} = (m_a + m_b) \times C_{ОВ} \times k \times L + \frac{P_H \times C_{рем}(L, m)}{(1 + d_0)^t}. \quad (5)$$

Предполагаем, что величина потерь  $C_{рем}$  увеличивается во времени пропорционально инфляции. Допускаем, что увеличение числа резервных волокон в рассматриваемом примере не сказывается на размерах оптического кабеля.

Стоимость ремонтных работ будет зависеть от количества резервных ОВ (количества точек повреждения равняется  $m+1$ ) и протяженности поврежденного участка (полагаем, что повреждения распределены равномерно по всей длине подводного кабеля).

Результаты расчета по формуле (4) представлены на рис.3, где по минимуму величины  $Z_{общ}$  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 применим для кабелей, проложенных в труднодоступных местах, ремонт которых затруднен или невозможен в течение длительного времени.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Зубилевич А.Л., Колесников В.А.** К вопросу о выборе оптических волокон // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2010. Т. 4. № 8. С. 7–9.
2. **Зубилевич А.Л., Колесников О.В., Сиднев С.А., Царенко В.А.** Выбор способа прокладки оптического кабеля с учетом грозоповреждаемости // Кабели и провода. 2015. № 6 (355). С. 14–15.
3. **Зубилевич А.Л., Сиднев С.А., Царенко В.А.** Выбор количества резервных оптических волокон в кабелях связи // Кабели и провода. 2018. № 3 (371). С. 14–15.
4. **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.
5. **Лукин И.** и др. Состояние и проблемы подводной связи в мире и в России. Часть 1 // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2016. № 4 (57). С. 76–81.
6. **Мамлин С.А., Портнов Э.Л.** Расчет 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.
7. **Андреев В.А., Кочановский Л.Н., Портнов Э.Л.** Направляющие системы электросвязи: Учебник для вузов. Т. 1. Теория передачи и влияния; под ред. Андреева В.А.; 7-е изд. – М.: Горячая линия – Телеком, 2009. 424 с.
8. **Портнов Э.** Уязвимость транспортных маршрутов ВОЛС // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2018. № 3 (72). С. 32–36.
9. Руководящие указания по проектированию подводных волоконно-оптических кабельных систем. Рекомендации МСЭ-Т серии G – Дополнение 41 (05/2005).
10. **Сиднев С.А., Зубилевич А.Л.** Применение оптических кабелей с комбинированным набором волокон // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2013. Т. 7. № 8. С. 120–121.
11. **Сиднев С.А., Зубилевич А.Л., Колесников О.В., Царенко В.А.** Влияние основных факторов неопределенности и их учет при выборе грозостойкого кабеля // Век качества. 2014. № 4. С. 76–79.
12. **Сиднев С.А., Царенко В.А.** Транспортные ВОЛС: выбор типа оптического волокна в условиях неопределенности // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2015. № 5 (50). С. 32–35.
13. Учебно-методическое пособие по курсу Теория вероятностей и математическая статистика. Часть I / Сост.: Лохвицкий М.С., Синева И.С. – М: МТУСИ, 2016. 32 с.