

УДК 621.38:004.03

А.В. Харыбин

Полтавский военный институт связи, Украина

## МОДЕЛЬ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ВОЛОКОННО-ОПТИЧЕСКОЙ ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

*В статье предложена и рассмотрена модель воздействий на работоспособность волоконно-оптической линии передачи информации одного из определяющих свойство её живучести фактора - механических растягивающих нагрузок, приложенных к волоконно-оптическому кабелю из её состава, а также соответствующий метод оценивания живучести линии передачи.*

**волоконно-оптическая линия передачи информации, модель воздействий, механические растягивающие нагрузки, оптическое волокно, марковские процессы, живучесть**

### Введение

Современные распределенные информационные, информационно-коммуникационные и информационно-управляющие системы (РИС, РИКС и РИУС) представлены сложными гетерогенными компьютерными и телекоммуникационными сетями, в которых широко используются волоконно-оптические линии передачи информации (ВОЛПИ) [1 – 3]. Это объясняется стремительным ростом объемов передаваемых информационных потоков, увеличением количества пользователей и внедрением новых видов услуг (в т.ч. мультимедийных реального времени), которые предъявляют повышенные требования к качественным характеристикам подобных ВОЛПИ. К числу этих требований относятся и требования к надежности, а для систем высокой готовности - к живучести. В работах [3 – 6] обоснована необходимость получения точных оценок надежности и живучести на всех этапах жизненного цикла данного класса систем, что требует применения различных методов моделирования процесса их функционирования на основе статистики воздействий на работоспособность основных составляющих их элементов – волоконно-оптических кабелей и систем передачи (ВОК и ВОСП) различных факторов.

Для оценки и прогнозирования надежности ВОЛПИ используется множество соответствующих моделей и методов [4 – 9], подавляющее большинство которых учитывают негативное влияние на работоспособность лишь факторов, свойственных для нормальных условий эксплуатации (НУЭ). В то же время модели и методы оценки живучести в современной литературе практически не рассмотрены. Это связано с отсутствием стандартизованных определений, показателей и критериев оценки указанного свойства, что приводит к попыткам оценки живучести ВОЛПИ методами оценки их надежности.

Под *живучестью ВОЛПИ* в данной работе понимается её свойство выполнять функции по передаче информационных потоков с качественными

характеристиками не ниже минимально-допустимых в экстремальных условиях эксплуатации (ЭУЭ).

Результаты анализа статистической информации о причинах нарушения работоспособности современных магистральных / городских ВОЛПИ, приведенной в [10] показывают, что 70 % / 57 % отказов ВОЛПИ обусловлены обрывами оптических волокон (ОВ) на строительных длинах ВОК вследствие действия на них механических растягивающих нагрузок (МРН). При этом основными причинами их появления в 30% / 95% случаев являются техногенные факторы, которые на практике тяжело поддаются формализации и математическому моделированию ввиду их случайности (умышленное вредительство человека, неквалифицированное проведение строительных работ, нарушение правил работы в кабельной канализации и др.). Однако, существует и другая группа причин, относящихся к так называемым природным экстремальным факторам, которые, как правило, имеют циклический характер проявления, относительно небольшую длительность воздействий на работоспособность и плавный характер роста МРН на ВОК (повышенное обледенение и ураганные ветровые нагрузки - для подвесных ВОК; сезонные и сейсмические оползни, смещения, деформации и пучения грунтов – для ВОК уложенных в грунт и т.д.). Поэтому представляется целесообразным проведение оценки живучести ВОЛПИ на основе создания модели воздействий МРН на входящие в её состав ВОК.

В связи с этим актуальной является *задача* моделирования процессов разрушения ВОК при воздействии рассмотренного фактора, сложность решения которой заключается в отсутствии единого подхода к осуществлению перехода от моделей разрушения ОВ, в основе которых лежит экспериментально обоснованное предположение о Вейбулловском распределении механической прочности отдельных волокон [7 – 9, 11, 12], к модели нарушения работоспособности оптического модуля (ОМ), ВОК и ВОЛПИ в целом.

**Анализ литературных источников** [4 – 12], посвященных рассмотрению указанной проблемы позволяет сделать вывод о том, что несмотря на постоянное присутствие внимания к ней, реальных результатов в виде моделей воздействий и соответствующих им методов, позволяющих получить адекватные статистическим данным оценки показателей живучести ВОК и ВОЛПИ по-прежнему нет.

**Целью статьи** является представление модели воздействий МРН на ВОК, имеющий в своем составе кварцевые ОВ, и соответствующего ей подхода к оценке живучести ВОЛПИ в целом.

## 1. Модель воздействий механических растягивающих нагрузок на кварцевые оптические волокна

Широкий спектр областей применения, условий прокладки и эксплуатации ВОК, многообразие видов каналообразующего элемента, по типам используемого ОВ, рабочим длинам волн, количеству волокон и т. д., различия в технологической оснащенности кабельных предприятий, а также национальные особенности и традиции фирм производителей привели к возникновению многообразия конструкций ВОК. При этом наиболее распространённым конструктивным решением оптического кабеля является использование дополнительного покрытия ОВ из материала, обладающего высокой механической прочностью и температурным коэффициентом линейного расширения приближающимся к соответствующей характеристике кварца. Группу ОВ в дополнительном защитном покрытии принято называть оптическим модулем [13, 14].

С учетом отмеченных конструктивных особенностей реальных ВОК, рассмотрение начнем с рассмотрения модели воздействий МРН на отдельно взятое ОВ.

Из существующих типов наименьшее относительное удлинение при воздействии рассматриваемых нагрузок имеют кварцевые, а наибольшее - полимерные оптические волокна (ПОВ) (рис. 1).

Высокие оптические потери, низкая абразивная прочность, склонность к быстрому старению, малый коэффициент широкополосности сужают область применения ПОВ [12, 15]. В основном они используются в локальных и внутриобъектовых ВОЛПИ на участках длиной до 3 км.

Одной из главных причин невозможности применения волоконного световода (ВС) из кварцевого стекла в натуральном виде (в котором он получается после вытяжки), является его низкая механическая прочность. Теоретически механическая прочность бездефектного кварцевого ВС выше прочности стальной проволоки такого же диаметра. Однако, например, любое соприкосновение поверхности световода с твердым предметом или даже частицей пыли, находящейся в воздухе приводит к появлению

на поверхности стекла микротрещин, которые при приложении растягивающей нагрузки  $F$  начинают быстро расти. В результате разрывная прочность ВС оказывается намного ниже теоретического предела прочности кварцевого стекла.

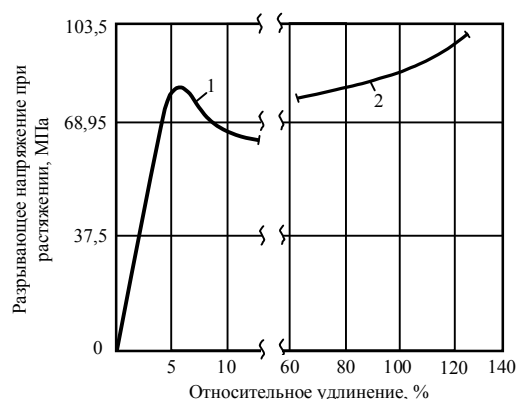


Рис. 1. Зависимость разрушающего напряжения в ОВ при растяжении от относительного удлинения для кварцевого (1) и полимерного с сердечником из полиметилметакрилата (2) волокна

Приближают реальную механическую прочность получаемого ОВ (5 – 7 ГПа) к теоретической (25 ГПа), рассчитанной на основании оценок величины межатомной связи атомов кремния и кислорода, а также защитить ВС от взаимодействия с окружающей средой возможно при помощи нанесения защитного покрытия. В работе [12] получена зависимость срока службы ОВ от его удлинения вследствие воздействия на него приложенной к нему растягивающей нагрузки. Срок службы в 25 лет, установленный потребителем ВОК, обеспечивается при значении удлинения менее 0,36 %, что определяет допустимую величину локальной механической растягивающей нагрузки в пределах 3 – 5 Н.

Рассмотрим модель разрушения ОВ, находящегося под воздействием МРН, полученную в работе [11], которая основана на результатах экспериментов по разрыву кварцевых ОВ ведущих производителей ВОК. Кварцевое стекло является «хрупким» материалом и под воздействием напряжения растяжения  $\sigma$  отмечается его упругая обратимая деформация  $\varepsilon$ , пропорциональная приложенному напряжению (закон Гука):

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости кварцевого стекла.

Для волокна с круглым сечением, испытываемого напряжение продольного растяжения, характерно внезапное разрушение в направлении, перпендикулярном действующему напряжению при критической величине ( $\sigma_{кр}$ ) последнего. При сравнении с теоретическими величинами сопротивления (предел прочности ~ 20-25 ГПа), обычные величины кратковременной механической прочности кварцевого стекла оказывается на два порядка ниже (~0,1 ГПа для объемного кремния), тогда как для волокон это значение составляет до 5 ГПа в зависимости от

скорости нагружения. Исследования излома показывают, что плоскость появления излома перпендикулярна напряжению и почти во всех случаях наблюдается по периферии окружности волокна. В случае оптических волокон, испытывающих продольные напряжения, только один тип излома (тип I – трещина нормального отрыва) способен вызвать образование трещины. Для данного типа излома интенсивность напряжений зависит только от параметра  $K_{И}$ , зависящего в свою очередь от приложенного напряжения, от формы трещины и ее глубины:

$$K_{И} = Y \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sigma \quad (2)$$

На изломе  $K_{И}$  имеет критическую величину  $K_{Икр}$ :

$$K_{Икр} = Y \cdot \sqrt{\alpha} \cdot \sigma_{кр} \quad (3)$$

Таким образом, будучи подвергнутым напряжению, ОВ разрушается, если концентрация напряжения в месте расположения доминирующего эффекта достигает критического разрушающего значения ( $K_{Икр}$ ).

На поверхности ОВ имеется некоторое количество дефектов или трещин. Под воздействием приложенного напряжения оно будет разрушено в наиболее слабом месте. Пусть  $P(\sigma, L)$  – вероятность излома под напряжением менее  $\sigma$  у волокна длиной  $L$ ,  $n(\sigma)$  – функция распределения дефектов,  $L \cdot n(\sigma) d\sigma$  – количество дефектов для волокна длиной  $L$ , способствующее разрушению при напряжениях  $\sigma$  и  $\sigma + d\sigma$ . Тогда вероятность разрушения в этом интервале напряжений для волокна длиной  $L$  равна вероятности обнаружения дефекта в этом интервале, умноженная на вероятность отсутствия излома данного ОВ при напряжении менее  $\sigma$ :

$$P(\sigma + d\sigma, L) - P(\sigma, L) = L \cdot n(\sigma) d\sigma [1 - P(\sigma, L)],$$

откуда получаем:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp[-L \cdot N(\sigma)], \quad (4)$$

$$\text{где } N(\sigma) = \int_0^{\sigma} n(\sigma) d\sigma.$$

Однако можно считать, что волокно состоит из последовательности звеньев, состоящих в свою очередь из множества компонент (рис. 2). При разрушении звена, разрушается волокно.

Использование закона Вейбулла предполагает распределение:

$$N(\sigma) = (\sigma/\sigma_0)^m, \quad (5)$$

где  $m$  и  $\sigma_0$  – экспериментально определяемые параметры.

На основании формулы (5), выражение (4) можно записать в виде:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp[-L \cdot (\sigma/\sigma_0)^m]. \quad (6)$$

Рассматриваемые реальные распределения часто являются бимодальными. Статистическая обработка осуществляется с записью совокупного количества дефектов:

$$N(\sigma) = (\sigma/\sigma_1)^{m_1} + (\sigma/\sigma_2)^{m_2}, \quad (7)$$

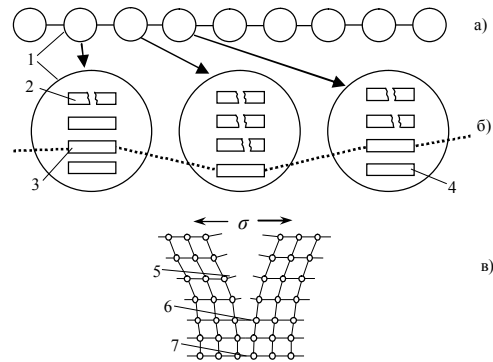


Рис. 2. Модель Вейбулла для исследования надежности ОВ: а – цепь дискретных компонент; б – компонента, состоящая из элементов; в – воспроизведение дефекта в сетке кварцевого стекла:

1 – компонента; 2 – разрушенный элемент; 3 – несущий элемент; 4 – резервный элемент; 5 – разрушенное соединение; 6 – вершина трещины; 7 – неповрежденное соединение

что ведет к возможности излома при напряжении меньше  $\sigma$ :

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp[-L(\sigma/\sigma_1)^{m_1} - L(\sigma/\sigma_2)^{m_2}]. \quad (8)$$

Некоторые авторы предлагают другие типы распределений, однако, распределение Вейбулла очень практично в случае исследования вероятности излома хрупких материалов [7 – 9].

Распределение Вейбулла при большой длине волокна обеспечивает экстраполяцию средней вероятности разрушения исследуемых образцов [11], в соответствии с законом, выведенным из уравнения (6):

$$\sigma_D/\sigma_K = (L_K/L_D)^{1/m}, \quad (9)$$

где  $\sigma_D$  – прочность длинного образца,  $\sigma_K$  – прочность короткого образца,  $L_K$  – длина короткого образца,  $L_D$  – длина длинного образца,  $m$  – показатель Вейбулла. Например, при  $m=4$  средняя механическая прочность волокна длиной 10 км в десять раз ниже механической прочности, определенной на образцах длиной 1 м.

Результаты испытаний, приведенные в [11], показали, что при фиксированной длине образца, увеличение скорости нагружения приводит к увеличению предела прочности, деформации при разрушении и модуля упругости. При увеличении длины образца при фиксированной скорости нагружения наблюдается снижение предела прочности, уменьшение деформации при разрушении, увеличение модуля упругости. С увеличением длины испытываемого волокна, это явление становится более заметным. Выражение (6) должно быть модифицировано с учетом нормирующего множителя номинальной длины испытанного образца:

$$P(\sigma, L) = 1 - \exp[-(-L/L_0)(\sigma/\sigma_0)^m], \quad (10)$$

где  $L$  – длина оптического волокна;  $\sigma$  – предел прочности волокна;  $L_0, \sigma_0, m$  – параметры распределения Вейбулла.

В работе [11] на основании анализа полученных экспериментальных данных по статической прочности волокна, а также в результате анализа экспериментальных данных, полученных в работах [7 – 9], было предложено закон распределения Вейбулла считать бимодальным, состоящим из двух независимых мод, каждая из которых описывается уравнением (8) со своими значениями параметров  $m_1$ ,  $m_2$  и  $\sigma_{01}$ ,  $\sigma_{02}$ . Значение вероятностей разрушения волокна  $P(\sigma, L) = 0,05$  в качестве границы двух мод было определено экспериментально. Таким образом, выражение (10) для случая кварцевых ОВ имеет вид:

$$P(\sigma, L) = \begin{cases} 1 - \exp\left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{01}}\right)^{m_1}\right], & \text{при } 0,05 \leq P(\sigma, L) \leq 1,00 \\ 1 - \exp\left[-\frac{L}{L_0} \left(\frac{\sigma}{\sigma_{02}}\right)^{m_2}\right], & \text{при } 0 < P(\sigma, L) < 0,05. \end{cases} \quad (11)$$

При этом в [11] были получены значения параметров бимодального распределения Вейбулла, представленные в табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров бимодального распределения Вейбулла для вероятности обрыва кварцевого ОВ при кратковременной МРН

$m_1$	$\sigma_{01}$	$m_2$	$\sigma_{02}$
28,604	5,587	5,187	5,222

При исследовании процессов обрыва ОВ при длительной приложенной МРН исследователям так и не удалось с высокой степенью достоверности получить выражения для определения вероятности обрыва ОВ в зависимости от приложенного напряжения, длины ОВ и времени приложения нагрузки. Поэтому, воспользовавшись выражением (11), можно получить значение вероятности обрыва ОВ при кратковременной нагрузке, значение которой равно или больше предела прочности ОВ.

## 2. Модель воздействий МРН на оптические модули из кварцевых ОВ

Рассмотрим оптические модули (ОМ) в трубчатом защитном покрытии, которые зачастую имеют небольшие размеры - наружный диаметр составляет 2-3 мм (внутренний диаметр 1-2 мм) и, следовательно, небольшое число ОВ (от 4 до 12). Как правило подобный ОМ располагается по оси кабеля, и на него наносят дополнительные защитные покрытия. Такая конструкция ВОК получила название оптического кабеля на основе центральной трубки. Наиболее распространены и наиболее просты конструкции кабелей, в которых на центральную трубку плотно накладывается какой-либо броневой покров. Это с одной стороны обеспечивает её механическую защиту, а с другой стороны расширяет диапазон допустимых температурных воздействий.

При приложении к оптическому модулю растягивающей нагрузки происходит сначала его рас-

прявление, затем растяжения до момента обнуления избыточной длины после чего сопротивление МРН оказывает оболочка ОМ вместе с ОВ вплоть до обрыва последних внутри модуля, а затем и оболочки ОМ (рис. 3).

При этом с учетом вполне обоснованного предположения о том, что разрыв группы ОВ в ОМ происходит во времени постепенно (по одному ОВ), а не одновременно, можно представить данный процесс графом переходов, отображающим марковскую цепь событий поочередного разрушения (деградации) всех ОВ в ОМ (в данном случае в рассматриваемом ОМ уложены 12 ОВ) с соответствующими интенсивностями переходов ОМ из одного состояния в другое –  $\lambda_i$  и интенсивностями восстановления ОМ (ВОК в целом) –  $\mu_B$  (рис. 4).

Как видно из рис. 4, восстановление ВОК (ОМ) начинается только после того, как произойдет обрыв не менее чем 2 ОВ в одном месте, о чем свидетельствует опыт эксплуатации ВОК, приведенный в публикации [10] и реально принятая система технического обслуживания ВОЛПИ.

Полученный таким образом граф можно описать системой линейных дифференциальных уравнений (ЛДУ) Колмогорова - выражение (12).

Данная система ЛДУ может быть решена при известных значениях интенсивностей обрывов ОВ и заданном на основании руководящих документов [16, 17] значении интенсивности восстановления ВОК.

Так, для случая постоянно приложенной к ОМ из 12 кварцевых ОВ МРН, величина которой на 5% меньше суммарного значения предела прочности пучка ОВ, рассчитанного в соответствии с выражением (11) для отдельного ОВ при вероятности его обрыва  $P(\sigma, L) = 0,9$ , экспериментальным путем были определены интервалы времени между поочередными обрывами всех ОВ.

При этом использовалась универсальная испытательная машина, а также прибор "ANDO", позволяющий определить приложенную к оптическому волокну нагрузку, по величине бреллиеновского рассеяния. Среднее время восстановления ОМ было принято 4 ч. 35 мин. согласно [16]. После этого экспоненциальным методом было найдено решение системы ЛДУ Колмогорова (12). Результаты решения графически представлены на рис. 5. Отметка по шкале времени 0 ч. соответствует моменту начала нагружения ОМ.

Анализируя полученные результаты можно сделать вывод о том, что при нормально функционирующей системе технической эксплуатации, которая выполняет требования по времени восстановления ВОК, вероятность  $P_{12}$  обрыва всех ОВ в ОМ рассматриваемого ВОК (состояние  $S_{12}$ ) является очень малой величиной (не более  $10^{-4}$ ), а потеря ОМ свойства надежности (в соответствии с [18] и принятой схемой резервирования ОВ в ОМ магистральных

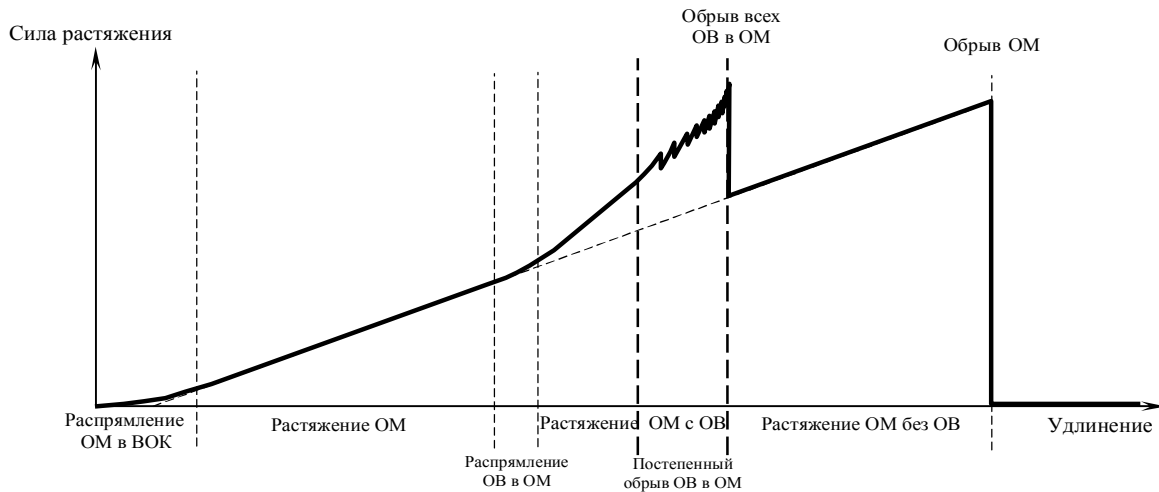


Рис. 3. Кривая растяжения оптического модуля в ВОК под воздействием МРН

ВОК «1+1» [17]) – переход в состояние  $S_7$ , может произойти с вероятностью  $P_7 \leq 10^{-6}$ :

$$\begin{cases}
 \frac{dP_0(t)}{dt} = \mu_B (P_2(t) + P_3(t) + P_4(t) + P_5(t) + P_6(t) + P_7(t) + \\
 \quad + P_8(t) + P_9(t) + P_{10}(t) + P_{11}(t) + P_{12}(t)) - \lambda_2 P_0(t); \\
 \frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - \lambda_2 P_1(t); \\
 \frac{dP_2(t)}{dt} = \lambda_2 P_1(t) - (\lambda_3 + \mu_B) P_2(t); \\
 \frac{dP_3(t)}{dt} = \lambda_3 P_2(t) - (\lambda_4 + \mu_B) P_3(t); \\
 \frac{dP_4(t)}{dt} = \lambda_4 P_3(t) - (\lambda_5 + \mu_B) P_4(t); \\
 \frac{dP_5(t)}{dt} = \lambda_5 P_4(t) - (\lambda_6 + \mu_B) P_5(t); \\
 \frac{dP_6(t)}{dt} = \lambda_6 P_5(t) - (\lambda_7 + \mu_B) P_6(t); \\
 \frac{dP_7(t)}{dt} = \lambda_7 P_6(t) - (\lambda_8 + \mu_B) P_7(t); \\
 \frac{dP_8(t)}{dt} = \lambda_8 P_7(t) - (\lambda_9 + \mu_B) P_8(t); \\
 \frac{dP_9(t)}{dt} = \lambda_9 P_8(t) - (\lambda_{10} + \mu_B) P_9(t); \\
 \frac{dP_{10}(t)}{dt} = \lambda_{10} P_9(t) - (\lambda_{11} + \mu_B) P_{10}(t); \\
 \frac{dP_{11}(t)}{dt} = \lambda_{11} P_{10}(t) - (\lambda_{12} + \mu_B) P_{11}(t); \\
 \frac{dP_{12}(t)}{dt} = \lambda_{12} P_{11}(t) - \mu_B P_{12}(t).
 \end{cases}
 \tag{12}$$

Данный подход может быть использован для оценки живучести ВОК в целом. При этом увеличится лишь размерность системы ЛДУ Колмогорова в соответствии с числом ОВ и ОМ в кабеле.

### Выводы

Предложен новый подход к моделированию и оценке живучести волоконно-оптических линий

передачи, узлы которых на практике представляют собой коммутационно-передающие центры, а линии связи между ними – участки волоконно-оптического кабеля большой протяженности, которые зачастую являются определяющими для живучести линий в экстремальных условиях эксплуатации.

Предложенная модель воздействий на ВОК механических растягивающих нагрузок позволяет учесть реальные процессы постепенной деградации оптического модуля кабеля в результате разрушения отдельных оптических волокон. Это позволяет производить оценивание живучести ВОК и волоконно-оптических линий передачи информации в целом, используя предложенный метод оценивания, соответствующий модели воздействий.

Данный подход может быть использован при создании инструментальных средств оценки живучести ВОК и волоконно-оптических линий передачи информации на этапе эксплуатации. Оценки показателей вероятности нахождения волоконно-оптических кабелей в различных состояниях позволяет производить анализ свойства живучести и обоснованно выдвигать требования к времени восстановления ВОК, эксплуатируемого в заданных условиях, обеспечивая тем самым живучесть волоконно-оптических линий передачи информации в целом.

### Список литературы

1. Семёнов А.Б. *Волоконная оптика в локальных и корпоративных сетях связи*. – М.: Компьютер пресс, 1998. – 234 с.
2. Фриман Р. *Волоконно-оптические системы связи*. – М.: Техносфера, 2003. – 440 с.
3. *Волоконно-оптическая техника: современное состояние и перспективы*. – 2-е изд., перераб. и доп. / Сб. статей под ред. С.А. Дмитриева и Н.Н. Слепова. – М.: ООО "Волоконно-оптическая техника", 2005. – 576 с.
4. Ксенофонтов С.Н. *Методика оценки надежности оптических кабелей различных конструкций // Электросвязь*. – 1995. – № 11. – С. 26-27.

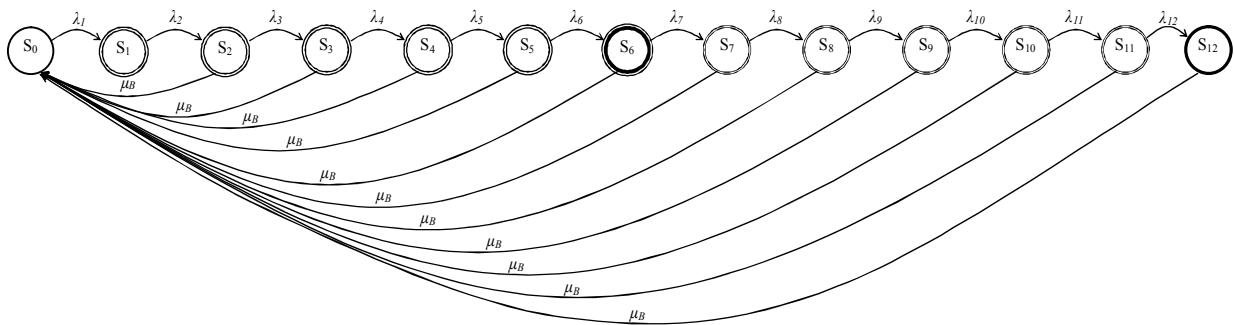


Рис. 4. Граф последовательной деградации ОМ из 12 ОВ под воздействием приложенной МРН

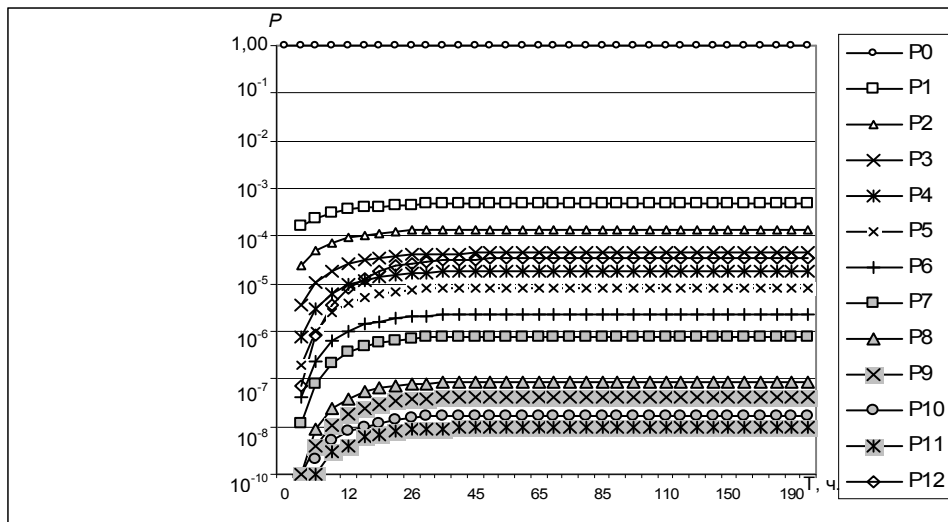


Рис. 5. Зависимость вероятностей обрыва ОВ от времени воздействия постоянной МРН на ОМ

5. Здоровцов И.А. Математические модели надежности волоконно-оптических линий передачи // Электросвязь. – 2004. – № 3. – С. 27-32.

6. Харыбин А.В., Одаруценко О.Н. Методика синтеза комплексного метода оценки надежности волоконно-оптических линий передачи // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2006. – № 7. – С. 99-106.

7. Шевандин В.С. Кварцевые волоконные световоды с особыми оптическими и механическими свойствами. – Дисс. на соиск. уч. степени д-ра техн. наук – СПб.: ФГУП НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», 2006. – 576 с.

8. Дукельский В.К. Разработка специальных типов оптических волокон для нетрадиционных областей использования. – Дисс. на соиск. уч. степени канд. техн. наук – СПб.: ФГУП НИТИОМ ВНИЦ «ГОИ им. С.И. Вавилова», 2003. – 193 с.

9. Семёнов С.Л. Физические процессы, определяющие прочность и долговечность волоконных световодов // Дисс. на соиск. уч. степени канд. физ.-мат. наук – М.: МТУСИ, 1997. – 214 с.

10. Кабыш С.В. Опыт эксплуатации ВОЛС на Киевской телефонной сети // Фотон-экспресс. – 2004. – № 5. – С. 39-42.

11. Мильков А.В., Романов К.И., Букетин Б.В. Экспериментальное исследование кратковременной и длительной прочности оптического волокна и расчет его надежности. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. – 45 с.

12. Авдеев Б.В., Барышников Е.Н., Длютров О.В., Стародубцев И.И. Об избыточной длине оптического волокна в оптическом кабеле. – [Электрон. ресурс]. – Ре-

жим доступа: <http://www.ruscable.ru/doc/analytic/statya-042.html>.

13. ТУ 3587-009-48973982-2000. Оптические кабели связи. Технические условия. [введены 2000-01-01] – М.: Минсвязи РФ, 1999. – 38 с.

14. ТУ 16.К12-16-97. Кабели оптические для местных и междугородных линий связи ВСС России. Технические условия. [введены 1997-06-01] – М.: Минсвязи РФ, 1997. – 46 с.

15. Ларин Ю.Т., Нестерко В.А., Полимерные оптические волокна // Радиоэлектроника и телекоммуникации. – 2002. – № 4 (22). – С.19-22.

16. РД 45.047-99. Линии передачи волоконно-оптические на магистральной и внутризоновых первичных сетях ВСС России. Техническая эксплуатация. Руководящий технический материал: [введен 1999-12-27] – М.: Минсвязи РФ, 1999. – 50 с. [Руководящий документ отрасли].

17. ОСТ 45.63-96. Обеспечение надежности средств электросвязи. Основные положения: [введен 1996-11-10] – М.: Минсвязи РФ, 1997. – 24 с. [Стандарт отрасли].

18. ДСТУ 2860-94. Надійність техніки. Терміни та визначення: [введений 1994-12-28] – К.: Держстандарт України, 1995. – 92 с. [Державний стандарт].

Поступила в редколлегию 13.03.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.С. Харченко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.