

# Модель надёжности волоконно-оптической линии связи при недостоверном прогнозирующем контроле

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

Для расчёта надёжности волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) предложена марковская модель, отличающаяся учётом различного влияния на надёжность внезапных и постепенных отказов, а также ошибок контроля второго рода. Получены формулы для расчёта коэффициентов неготовности при прогнозирующем контроле с учётом постепенных и внезапных отказов при ошибках контроля второго рода. Оценивается влияние, выбор критерия перехода ВОЛС в предотказовое состояние на надёжность ВОЛС.

*Ключевые слова:* объект технической эксплуатации, прогнозирующая стратегия эксплуатации ВОЛС, предотказовое состояние, система мониторинга, ошибка контроля второго рода, внезапные и постепенные отказы.

## 1. Введение

Эффективность системы технической эксплуатации (ТЭ) оценивается надёжностью, которую она обеспечивает. Существуют различные системы ТЭ, классификация которых приведена в [1]. Здесь же в общем виде рассмотрена стратегия восстановления волоконно-оптической линии связи (ВОЛС), которая названа оптимальной. Показано, что использование предлагаемой стратегии позволяет увеличить коэффициент готовности. Суть этой стратегии заключается в контроле состояния ВОЛС с целью выявления некоего аномального состояния, которое названо в [1] предотказовым. В ГОСТ 27.002-2015 предотказовое состояние определяется как «состояние объекта, характеризующееся повышенным риском его отказа». К предотказовому состоянию приводит постепенное изменение состояния оптического волокна, которое в конечном счёте может привести к отказу. В предотказовом состоянии ВОЛС ещё работоспособна. Однако наличие предотказового состояния является поводом для проведения ремонтно-восстановительных работ (РВР), к которым приступают, не дожидаясь отказа. Заметим, что в англоязычной литературе состояние, похожее на предотказ, рассматривается как повреждение (англ. degraded state).

Упрощённые схемы функционирования для «оптимальной» стратегии и стратегии, когда к РВР приступают только после отказа ВОЛС, представлены на рис. 1а и 1б соответственно.

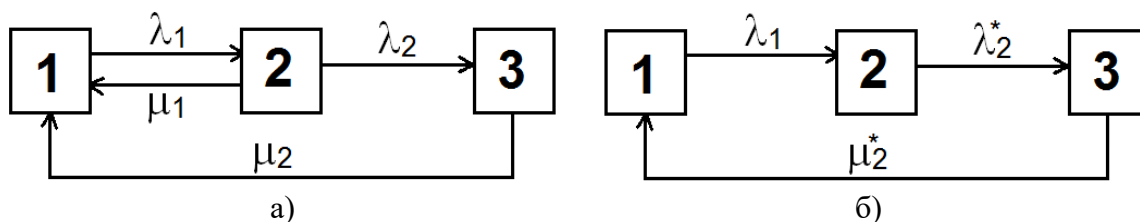


Рис.1. Схемы функционирования ВОЛС

На рис. 1 состояние 1 – предотказовое состояние не выявлено; состояние 2 – выявлено предотказовое состояние; состояние 3 – произошел отказ.

Определим, что такое предотказовое состояние. Формально любое состояние ВОЛС является предотказовым, т.к. рано или поздно возникнет отказ. Стратегия «оптимального» восстановления предполагает оценку состояния ВОЛС с точки зрения вероятности возникновения отказа. Если вероятность перехода из предотказового состояния в состояние отказа велика или, точнее, превышает некоторое заранее заданное пороговое значение, то такое состояние ВОЛС следует считать « предотказовым ». Контроль с целью определения предотказового состояния в литературе обычно называется прогнозирующим.

Для определения предотказового состояния ОТЭ можно использовать различные методы мониторинга. Один из таких методов представлен в [2] применительно к компьютерным сетям, он основан на использовании « исторических » данных. Множество работ посвящено мониторингу пассивных оптических сетей доступа. В работе [3] рассмотрены вопросы мониторинга сетей доступа большого радиуса действия. В [4] предлагается быстрый способ определения повреждений в пассивных оптических сетях (PON) с волновым мультиплексированием. Эффективный метод мониторинга оптической линии с оптическими муфтами рассмотрен в [5]. Метод основан на использовании OTDR (Optical Time Domain Reflectometry). Вопросы обнаружения повреждений в пассивных оптических сетях доступа нашли отражение в [6], [7]. Достаточно полный обзор методов мониторинга физического уровня PON представлен в [8].

Известен ряд работ, посвящённых оценке эффективности прогнозирующих стратегий. В [9] приведена методика оценки применения прогнозирующих стратегий технического обслуживания оптического кабеля. В [10] рассмотрен прогностический контроль ВОЛС. В [11] в качестве показателя эффективности использования прогнозирующей стратегии эксплуатации ВОЛС, реализованной в соответствии с принципом, представленным на рис. 1а, выбрана чистая приведённая стоимость (NPV, Net Present Value), найденная для вариантов с применением прогнозирующей стратегии и без неё. Для определения вероятностей нахождения системы в состояниях 1, 2 и 3 ( $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ ) использован марковский подход. При этом был сделан ряд допущений, которые существенно влияют на результаты оценок вероятностей  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$ . Следует также отметить, что в [11] не учтено влияние ошибок контроля и что отказам разной природы соответствуют разные интенсивности восстановления.

## 2. Предлагаемая модель для расчёта параметров прогнозирующего контроля

Система мониторинга обнаруживает предотказы и отказы в непрерывном времени, то есть система мониторинга реагирует на предотказы и отказы только в момент их возникновения. После обнаружения предотказа или отказа производится восстановление.

Отказ может возникнуть до или после предотказа. Однако предотказ после отказа возникнуть не может, так как после отказа производится восстановление, при котором устраняются и предотказы, и отказы.

Очевидно, что не все предотказы и отказы могут быть обнаружены системой мониторинга. Причиной этого может быть не только разнообразие предотказов и отказов, но и разное качество функционирования системы мониторинга, что непосредственно связано с её стоимостью.

Для возможности сравнения системы ТО с выявлением предотказов с системой, в которой осуществляется ремонт только после появления отказа, целесообразно в качестве критерия эффективности системы контроля использовать ошибки 2-го рода.

## 2.1. Особенности модели

1. Предотказы или отказы происходят в случайные моменты времени с постоянными интенсивностями.

2. Предотказы или отказы могут происходить, если ВОЛС находится в работоспособном состоянии.

3. Отказ ВОЛС может произойти из предотказового состояния, однако предотказ после отказа произойти не может, так как после отказа производится восстановление.

4. Составной частью модели является восстановление как фаза эксплуатации, в которой производится устранение предотказов и отказов.

5. Завершение восстановления после предотказов и отказов производится с постоянной интенсивностью.

6. В модель входит состояние системы мониторинга, в котором фиксируются возникшие предотказы.

7. При контроле ВОЛС следует различать внезапные и постепенные отказы. Внезапные отказы происходят, если ВОЛС находится в работоспособном состоянии, а постепенные – если ВОЛС находится в предотказовом состоянии.

8. Восстановление ВОЛС после внезапного отказа и отказа, произошедшего из-за необнаруженного предотказа, производится с одинаковой интенсивностью.

Целью работы является составление такой модели, которая позволит провести исследование уровня надёжности ВОЛС в зависимости от различных исходных параметров, в том числе от достоверности функционирования системы мониторинга.

Диаграмма состояний приведена на рис. 2.

На диаграмме обозначены состояния: 1Р – работоспособное состояние, 2М – состояние системы мониторинга при возникновении предотказа, 3ВП – восстановление после предотказа, 4П – предотказовое состояние, 5ВО – восстановление после постепенного отказа, 6ВО – восстановление после внезапного отказа.

На диаграмме приведены следующие параметры:  $\lambda_1$  – интенсивность предотказа,  $\lambda_2$  – интенсивность внезапного отказа,  $\lambda_3$  – интенсивность отказа ВОЛС после предотказа,  $\lambda_4$  – интенсивность отказа при восстановлении ВОЛС из предотказа,  $\mu_1$  – интенсивность восстановления после предотказа,  $\mu_2$  – интенсивность восстановления после постепенного отказа,  $\mu_3$  – интенсивность восстановления после внезапного отказа,  $\beta$  – вероятность ошибки контроля 2-го рода. Следует считать, что  $\lambda_3 = \lambda_4$ , т.к. в обоих случаях речь идет о переходе в состояние «отказ» из предотказного состояния.

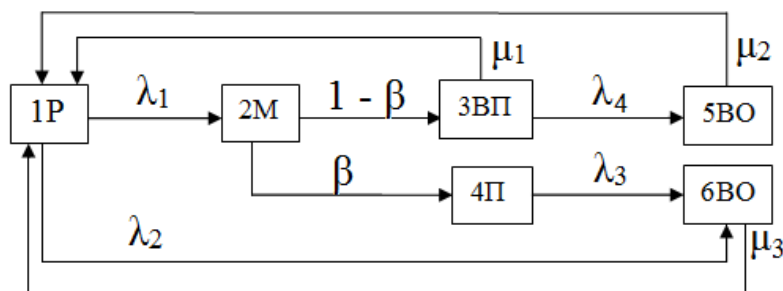


Рис. 2. Диаграмма состояний ВОЛС

Итак,  $\beta$  – это вероятность ошибки системы мониторинга, или вероятность того, что возникший предотказ не будет обнаружен системой мониторинга.

Следует отметить, что отказы, приводящие к переходам 1→6 и 4→6 (3→5), имеют разную природу и, соответственно, разные интенсивности.

## 2.2. Методика оценки параметров модели

В данной модели процессы протекают в непрерывном времени. Однако классическая модель на основе марковского процесса в непрерывном времени не может быть применена, так как в модели имеется состояние, интенсивность выхода из которого является бесконечно большой величиной. В состоянии 2 система мониторинга фиксирует предотказ, после чего производится либо восстановление (состояние 3), либо ВОЛС переходит в предотказовое состояние (состояние 4). Эта операция выполняется практически мгновенно, что означает: после попадания в состояние 2 производится отражение от него с вероятностью  $\beta$  в состояние 4 и с вероятностью  $1-\beta$  в состояние 3.

Будем использовать метод относительных частот [12], при котором используются вероятности переходов между состояниями в момент изменения состояния, а характеристиками каждого состояния является частота попадания в это состояние и время нахождения в нём после попадания в него. Метод позволяет вычислять временные характеристики подмножеств состояний и на этой основе вычислять показатели надёжности.

К исходным характеристикам модели относятся вероятности проходов между состояниями:

$$p_{12} = \lambda_1 / (\lambda_1 + \lambda_2); p_{16} = \lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2); p_{23} = 1 - \beta; p_{24} = \beta;$$

$$p_{31} = \mu_1 / (\mu_1 + \lambda_4); p_{35} = \lambda_4 / (\mu_1 + \lambda_4); p_{46} = p_{51} = p_{61} = 1. \quad (1)$$

Средние времена нахождения в состояниях после попадания в них:

$$\theta_1 = 1 / (\lambda_1 + \lambda_2); \theta_2 = 0; \theta_3 = 1 / (\mu_1 + \lambda_4); \theta_4 = 1 / \lambda_3; \theta_5 = 1 / \mu_2; \theta_6 = 1 / \mu_3. \quad (2)$$

Разобьём множество состояний на два подмножества:  $U = \{1, 2, 3, 4\}$ ,  $V = \{5, 6\}$ . В результате такого разбиения эксплуатацию ВОЛС во времени можно представить в переходах между этими подмножествами:  $U \rightarrow V \rightarrow U \rightarrow V \dots$  Будем называть циклом нахождение ВОЛС в состояниях подмножества  $U$  и следующее за ним нахождение в состояниях подмножества  $V$ . Из диаграммы на рис. 1 следует, что подмножество  $U$  всегда начинается с состояния 1.

Матрица вероятностей проходов на всём множестве состояний обозначена через  $P$ , а на подмножестве  $U$  – через  $P_{UU}$ :

$$P = \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & 0 & 0 & 0 & p_{16} \\ 0 & 0 & 1-\beta & \beta & 0 & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & 0 & p_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}; P_{UU} = \begin{pmatrix} 0 & p_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1-\beta & \beta \\ p_{31} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Матрица вероятностей проходов  $P_{UU}$  получена путём удаления из матрицы  $P$  строки и столбца, относящихся к состоянию подмножества  $V$ .

По матрице  $P_{UU}$  в (3) находится матрица относительных частот  $N_U$  на множестве  $U$ :

$$N_U = \|n_U(i, j)\| = (E - P_{UU})^{-1}, \quad (4)$$

где  $n_U(i, j)$  – среднее число вхождений (попаданий) в  $j$ -е состояние до выхода из множества  $U$  при условии, что  $i$ -е состояние является начальным при вхождении в множество  $U$ .

Элементы матрицы относительных частот названы относительными частотами состояний. Если известно начальное распределение вероятностей состояний  $p(0)$ , то относительные частоты состояний можно представить в виде строки

$$n_U = \|n_U(j)\| = p(0) \cdot N_U.$$

Поскольку состояние 1 всегда является начальным при переходе  $V \rightarrow U$ , то информация о средних относительных частотах всех состояний множества  $U$  содержится в первой строке матрицы  $N_U$ , определяемой в (4). Элементы первой строки матрицы  $N_U$  на основании (1):

$$\begin{aligned} n_U(1,1) &= \frac{1}{A} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2) \cdot (\lambda_4 + \mu_1)}{B}; & n_U(1,2) &= \frac{p_{12}}{A} = \frac{\lambda_1 \cdot (\lambda_4 + \mu_1)}{B}; \\ n_U(1,3) &= \frac{(1-\beta) \cdot p_{12}}{A} = \frac{(1-\beta) \cdot \lambda_1 \cdot (\lambda_4 + \mu_1)}{B}; & n_U(1,4) &= \frac{\beta \cdot p_{12}}{A} = \frac{\beta \cdot \lambda_1 \cdot (\lambda_4 + \mu_1)}{B}, \end{aligned} \quad (5)$$

где  $A = 1 - (1-\beta) \cdot p_{12} \cdot p_{31}$ ;  $B = (\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_2) \cdot \mu_1 + (\lambda_1 + \lambda_2) \cdot \lambda_4$ .

Для лучшего понимания полученного результата отметим некоторые соотношения и частные случаи.

1. Среднее число вхождений в состояние 1 больше одного при  $\beta < 1$ .
2. При  $\beta = 0$  ошибки контроля отсутствуют, мониторинг является достоверным.
3. При  $\beta = 1$  повреждения не обнаруживаются, что эквивалентно отсутствию системы мониторинга.
4. При  $0 < \beta < 1$  контроль является недостоверным.
5. Из полученных соотношений видно, что сумма относительных частот состояний 3 и 4 равна относительной частоте состояния 2:  $n_U(1,3) + n_U(1,4) = n_U(1,2)$ .

Переходы между подмножествами  $U \rightarrow V$  описываются матрицей вероятностей  $P_{UV}$ , полученной из матрицы  $P$  в (3) [12]:

$$P_{UV} = \begin{pmatrix} 0 & p_{16} \\ 0 & 0 \\ p_{35} & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Поскольку состояние 1 всегда является начальным состоянием подмножества  $U$ , то вероятности попадания в состояния 5 и 6 вычисляются по формуле [12]:

$$\|b_{15} \ b_{16}\| = \|n_U(1,1) \ n_U(1,2) \ n_U(1,3) \ n_U(1,4)\| \cdot P_{UV}. \quad (7)$$

Из выражения (7) получим

$$b_{15} = \frac{(1-\beta) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_4}{B}; \quad b_{16} = \frac{(\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (\lambda_4 + \mu_1)}{B}. \quad (8)$$

Среднее время нахождения в каждом состоянии подмножества  $U$  после вхождения в это подмножество на основании выражений (2) и (5):

$$t_1 = n_U(1,1) \cdot \theta_1 = \frac{\lambda_4 + \mu_1}{B}; \quad t_2 = 0;$$

$$t_3 = n_U(1,3) \cdot \theta_3 = \frac{(1-\beta) \cdot \lambda_1}{B}; t_4 = n_U(1,4) \cdot \theta_4 = \frac{\beta \cdot \lambda_1 \cdot (\lambda_4 + \mu_1)}{\lambda_3 \cdot B}. \quad (9)$$

Среднее время нахождения в каждом из состояний подмножества  $V$  на основании выражений (2) и (8):

$$t_5 = b_{15} \cdot \theta_5 = \frac{(1-\beta) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_4}{\mu_2 \cdot B}; t_6 = b_{16} \cdot \theta_6 = \frac{(\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (\lambda_4 + \mu_1)}{\mu_3 \cdot B}. \quad (10)$$

Среднее время нахождения в подмножествах  $U$  и  $V$  после вхождения в них исходя из выражений (9), (10):

$$t_U = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 = \frac{(1-\beta) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_3 + (\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_3) \cdot (\lambda_4 + \mu_1)}{\lambda_3 \cdot B};$$

$$t_V = t_5 + t_6 = \frac{(1-\beta) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_4 \cdot \mu_3 + (\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (\lambda_4 + \mu_1) \cdot \mu_2}{\mu_2 \cdot \mu_3 \cdot B}.$$

Средняя продолжительность цикла составляет  $t_{\text{ц}} = t_U + t_V$ .

Перейдём к вычислению временных и вероятностных показателей надёжности ВОЛС:

– средняя продолжительность работоспособного состояния на одном цикле:

$$t_p = t_1 + t_4 = \frac{(\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_3) \cdot (\lambda_4 + \mu_1)}{\lambda_3 \cdot B}; \quad (11)$$

– средняя продолжительность неработоспособного состояния:

$$t_{\text{н}} = t_3 + t_5 + t_6 = \frac{(\lambda_4 + \mu_2)(1-\beta) \cdot \lambda_1 \cdot \mu_3 + (\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (\lambda_4 + \mu_1) \cdot \mu_2}{\mu_2 \cdot \mu_3 \cdot B}; \quad (12)$$

– коэффициент готовности:

$$K_{\Gamma} = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}}; \quad (13)$$

– коэффициент неготовности:

$$K_{\text{н}} = \frac{t_{\text{н}}}{t_{\text{ц}}}. \quad (14)$$

Проверка показывает, что  $t_p + t_{\text{н}} = t_{\text{ц}}$  и  $K_{\Gamma} + K_{\text{н}} = 1$ .

### 2.3. Исследование модели с постепенными отказами без ошибок контроля

При отсутствии внезапных отказов отказ ВОЛС может произойти только при наличии состояния предотказа. При этом возможны следующие ситуации.

1. Предотказ заканчивается ремонтом (рис. 3а).

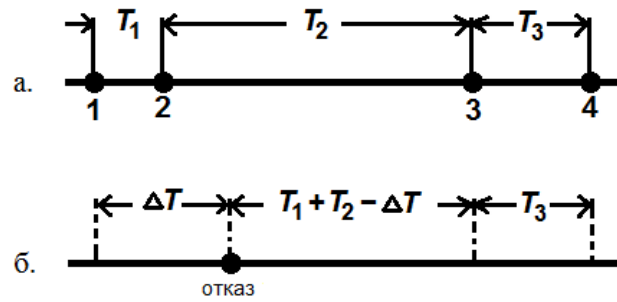


Рис. 3. Схема функционирования ОТЭ:

а – для случая восстановления предотказа; б – для случая перехода предотказа в отказ

На рис. 3а моменты времени 1, 2, 3 и 4 определяют следующие этапы: 1 – появление предотказа; 2 – обнаружение предотказа; 3 – РВБ приступила к устранению предотказа; 4 – ремонт завершён. Интервалы времени:  $T_1$  – среднее время обнаружения предотказа (локализации повреждения);  $T_2$  – среднее время подъезда РВБ;  $T_3$  – среднее время ремонта.

Из рис. 3а видно, что если за время нахождения ВОЛС в состоянии предотказа нет переходов в отказ, то время простоя определяется временем ремонта  $T_3$ .

2. Предотказ переходит в отказ (рис. 3б).

Если за время предотказа произошел отказ через интервал времени  $\Delta T$ , то среднее время простоя из-за отказов, вызванных предотказом, будет равно  $[(T_1 + T_2 - \Delta T) + T_3]$ . Вероятность появления внезапного отказа во время предотказа считаем пренебрежимо малой.

При внезапных отказах среднее время простоя ВОЛС равно  $T_1 + T_2 + T_3$ . Таким образом, отказы постепенные и внезапные следует рассматривать отдельно.

Рассмотрим случай, когда отсутствуют ошибки контроля и внезапные отказы.

Тогда с учётом выражений (9) – (12) получим

$$t_p = t_1 = \frac{\lambda_4 + \mu_1}{\lambda_1 \cdot \lambda_4}, \quad t_n = t_3 + t_5 = \frac{1}{\lambda_4} + \frac{1}{\mu_2}. \quad (15)$$

Коэффициент неготовности исходя из (13) и (15):

$$K_{\text{нп}} = \frac{\lambda_1 \cdot (\lambda_4 + \mu_2)}{\lambda_1 \cdot (\lambda_4 + \mu_2) + (\lambda_4 + \mu_1) \cdot \mu_2}. \quad (16)$$

Если восстановление происходит из предотказа, то интенсивность восстановления  $\mu_1 = 1/T_3$ . В этом случае РВБ подъехала к месту неисправности в момент, когда ВОЛС ещё не перешла из предотказа в отказ.

Отказ ВОЛС из предотказа может произойти в течение времени  $T_1 + T_2$ . Если к моменту подъезда РВБ уже произошел отказ, то восстановление будет осуществляться из состояния отказа, а интенсивность восстановления при этом будет равна  $\mu_2 = 1/([T_1 + T_2] - \Delta T + T_3)$ , где  $\Delta T$  – интервал времени, в течение которого ВОЛС находилась в состоянии предотказа до момента отказа, пока РВБ ехала к месту неисправности.  $\Delta T$  может принимать значения в интервале  $[0; T_1 + T_2]$ . Если  $\Delta T = 0$ , то отказ ВОЛС произошёл сразу после обнаружения предотказа, а если  $\Delta T = T_1 + T_2$ , то имеем ситуацию восстановления из предотказа.

Вероятность отказа определяется выражением  $p_o(t) = 1 - \exp(-\lambda_4 \cdot t)$ , где  $\lambda_4 = 1/T_{\text{н4}}$ , а  $T_{\text{н4}}$  – время наработки на отказ из состояния предотказа. Рассчитаем  $p_o(t)$  для  $T_{\text{н4}} = 2T_2, 5T_2, 10T_2$ .

На рис. 4 изображены графики зависимости  $p_o(t)$  при постоянных значениях  $T_1 = 0.5$  ч и  $T_2 = 3$  ч на интервале времени  $\Delta T = [0; T_1 + T_2]$ . Из рис. 4 видно, что вероятность отказа снижается при увеличении времени наработки на отказ из состояния предотказа.

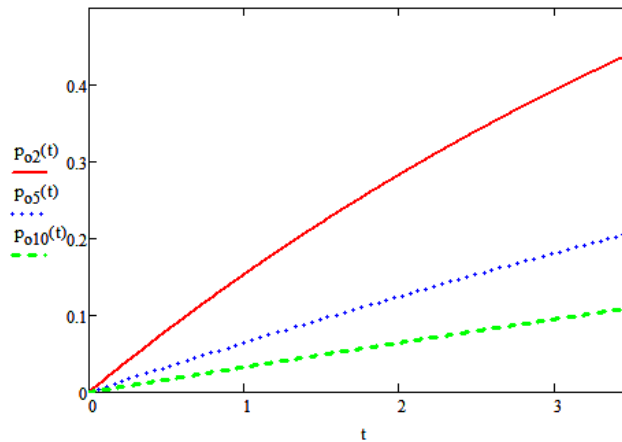


Рис. 4. Зависимость  $p_o(t)$  при  $T_{H4} = 2T_2, 5T_2, 10T_2$

Пусть  $\lambda_0 = 10^{-5}$  (1/ч) – интенсивность постепенных отказов. Из выражения  $\frac{1}{\lambda_0} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_4}$

[1] получим  $\lambda_1 = \frac{\lambda_0 \cdot \lambda_4}{\lambda_4 - \lambda_0}$  или  $\lambda_1(T_{H4}) = \frac{\lambda_0}{1 - T_{H4} \cdot \lambda_0}$ .

Запишем коэффициент неготовности (16) в виде:

$$K_{\text{нп}} = \frac{\lambda_1(T_{H4}) \cdot (1/T_{H4} + \mu_2)}{\lambda_1(T_{H4}) \cdot (1/T_{H4} + \mu_2) + (1/T_{H4} + \mu_1) \cdot \mu_2}. \quad (17)$$

Возьмём [1]:  $T_1 = 0.5$  ч,  $T_2 = 3$  ч и  $T_3 = 2$  ч, тогда  $\mu_1 = 1/2$  (1/ч), а  $\mu_2$  определяется исходя из значения  $\Delta T$ , находящегося в промежутке  $[0; T_1 + T_2]$ . Примем  $\Delta T = 0, 0.5, 1.5, 3.5$  ч. Соответственно  $\mu_2 = 1/(T_1 + T_2 - \Delta T + T_3) = 1/5.5, 1/5, 1/4, 1/2$  (1/ч).

На рис. 6 представлены графики зависимости  $K_{\text{нп}}$  от  $T_{H4}$  при заданных  $\mu_1$  и  $\mu_2$ .

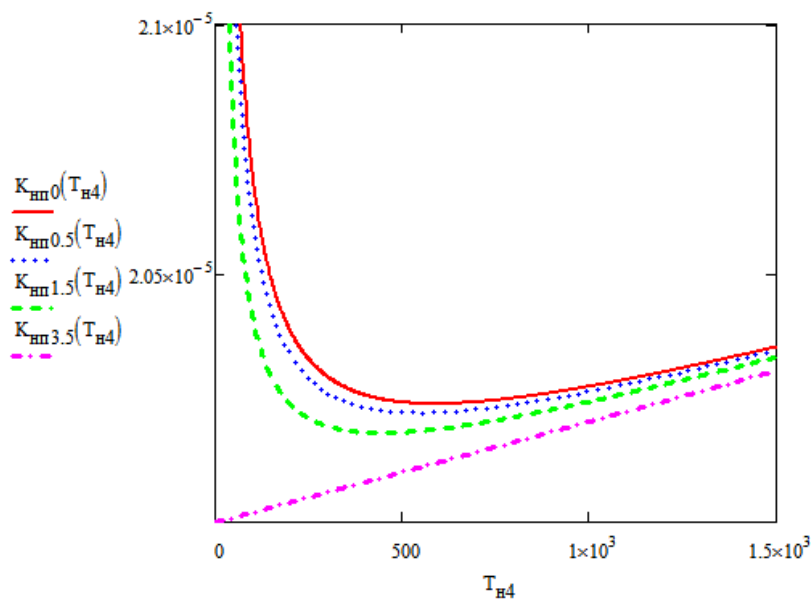


Рис. 5. Зависимость коэффициента неготовности  $K_{\text{нп}}$  от времени наработки на отказ из предотказа при различных значениях  $\Delta T$



Из рис. 5 видно, что график  $K_{\text{нп}}$  имеет точку минимума при  $\Delta T < T_1 + T_2$ . При этом отказ происходит до того, как РВБ приступила к восстановлению.

При  $\Delta T = T_1 + T_2$  поведение  $K_{\text{нп}}$  схоже с поведением коэффициента неготовности при отсутствии мониторинга состояния предотказа.

Если предотказ не фиксируется, то в этом случае восстановление происходит только после отказа ВОЛС, а время простоя определяется как  $T_1 + T_2 + T_3$ , где  $T_1$  – среднее время обнаружения отказа. При этом интенсивность восстановления будет равна  $\mu_2 = 1/(T_1 + T_2 + T_3)$ .

Коэффициент неготовности можно получить, используя формулы, приведённые в [12]:

$$K_{\text{но}} = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_4}{\lambda_1 \cdot (\lambda_4 + \mu_2) + \lambda_4 \cdot \mu_2}. \quad (18)$$

Поскольку состояние предотказа не обнаруживается, то можно принять  $\lambda_4 = 1/T_{\text{Н4}} = \infty$  или  $T_{\text{Н4}} = 0$ , а  $\lambda_1 \approx \lambda_0$ . Тогда  $\lim_{\lambda_4 \rightarrow \infty} K_{\text{но}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \mu_2}$ .

В табл. 1 приведены значения коэффициента неготовности при различных значениях  $T_{\text{Н4}}$  для двух стратегий восстановления ВОЛС при  $\lambda_0 = 10^{-5}$  (1/ч):  $K_{\text{нп}}$  – при фиксации предотказа и восстановлении ВОЛС из предотказа;  $K_{\text{но}}$  – без фиксации предотказа и восстановлении ВОЛС из состояния отказа.

Таблица 1. Значения коэффициента неготовности для двух стратегий восстановления ВОЛС

Параметр	Значения параметра		
	6	15	30
$T_{\text{Н4}}, \text{ч}$			
$K_{\text{нп}}$	$2.00008 \cdot 10^{-5}$	$2.00026 \cdot 10^{-5}$	$2.00056 \cdot 10^{-5}$
$K_{\text{но}}$	$5.49937 \cdot 10^{-5}$	$5.49887 \cdot 10^{-5}$	$5.4981 \cdot 10^{-5}$

Очевидно, что применение стратегии с обнаружением предотказа предпочтительней.

В табл. 2 приведены значения коэффициента неготовности и вероятности отказа при различных значениях  $T_{\text{Н4}}$  в фиксированных интервалах  $\Delta T$ .

Таблица 2. Значения  $K_{\text{нп}}$  при различных значениях вероятности отказа

Параметр	Значение						
	$2T_2 (T_2 = 3 \text{ ч})$						
$T_{\text{Н4}}, \text{ч}$							
$\Delta T, \text{ч}$	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5
$p_0$	0.080	0.153	0.221	0.283	0.341	0.393	0.442
$K_{\text{нп}}$	$2.750 \cdot 10^{-5}$	$2.625 \cdot 10^{-5}$	$2.500 \cdot 10^{-5}$	$2.375 \cdot 10^{-5}$	$2.250 \cdot 10^{-5}$	$2.125 \cdot 10^{-5}$	$2.00008 \cdot 10^{-5}$
$T_{\text{Н4}}, \text{ч}$							
$p_0$	0.033	0.064	0.095	0.125	0.153	0.181	0.208
$K_{\text{нп}}$	$2.353 \cdot 10^{-5}$	$2.294 \cdot 10^{-5}$	$2.236 \cdot 10^{-5}$	$2.177 \cdot 10^{-5}$	$2.118 \cdot 10^{-5}$	$2.059 \cdot 10^{-5}$	$2.00026 \cdot 10^{-5}$
$T_{\text{Н4}}, \text{ч}$							
$p_0$	0.016	0.033	0.049	0.065	0.080	0.095	0.110
$K_{\text{нп}}$	$2.188 \cdot 10^{-5}$	$2.157 \cdot 10^{-5}$	$2.126 \cdot 10^{-5}$	$2.094 \cdot 10^{-5}$	$2.063 \cdot 10^{-5}$	$2.032 \cdot 10^{-5}$	$2.00056 \cdot 10^{-5}$

Из табл. 2 видно, что при контроле с обнаружением предотказа с уменьшением времени восстановления уменьшается значение коэффициента неготовности. Чем больше время нахождения ВОЛС в состоянии предотказа, тем больше вероятность того, что отказ не произойдёт до подъезда РВБ.

### 2.4. Исследование модели с учётом внезапных отказов и ошибок контроля

Рассмотрим параметры модели, представленной на рис. 2. В данной модели учитывается наличие внезапных отказов и ошибки системы мониторинга второго рода.

Коэффициент неготовности с учётом выражений (9) – (12) будет иметь вид:

$$K_{\text{нп}}^* = \frac{\lambda_3[(1-\beta) \cdot (\lambda_4 + \mu_2) \cdot \lambda_1 \cdot \mu_3 + (\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (\lambda_4 + \mu_1) \cdot \mu_2]}{(1-\beta) \cdot (\lambda_4 + \mu_2) \cdot \lambda_1 \cdot \lambda_3 \cdot \mu_3 + (\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_2) \cdot (\lambda_4 + \mu_1) \lambda_3 \cdot \mu_2 + (\beta \cdot \lambda_1 + \lambda_3) \cdot (\lambda_4 + \mu_1) \cdot \mu_2 \cdot \mu_3} \quad (19)$$

Если система мониторинга пропустила предотказ, то ВОЛС переходит в состояние 4 с вероятностью ошибки  $\beta$ , а затем в состояние 6 – состояние отказа (см. рис. 2). Неисправность ВОЛС будет обнаружена только после отказа. В этом случае восстановление участка ВОЛС происходит с той же интенсивностью, что и восстановление после внезапного отказа, т.е. с интенсивностью  $\mu_3 = 1/(T_1+T_2+T_3)$ .

Переходы 3→5 и 4→6 на рис. 2 имеют одинаковую природу, поэтому  $\lambda_3 = \lambda_4 = 1/T_{\text{н4}}$ .

Пусть  $T_1 = 0.5$  ч,  $T_2 = 3$  ч и  $T_3 = 2$  ч [1], тогда  $\mu_1 = 1/2$  (1/ч), а  $\mu_2 = 1/(T_1 + T_2 - \Delta T + T_3) = 1/5.5, 1/5, 1/4, 1/2$  (1/ч). Интенсивность восстановления  $\mu_3 = 1/(T_1 + T_2 + T_3) = 1/5.5$  (1/ч).

При  $\beta = 10^{-3}$  и  $\lambda_2 = 10^{-6}$  (1/ч) на рис. 6 представлены графики зависимости  $K_{\text{нп}}^*$  от  $T_{\text{н4}}$ .

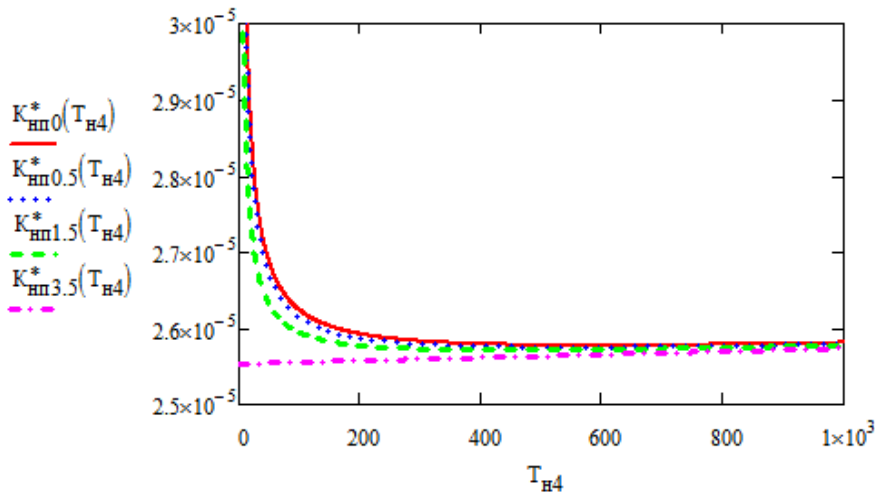


Рис. 6. Зависимость коэффициента неготовности  $K_{\text{нп}}^*$  от времени наработки на отказ из предотказа при различных значениях  $\Delta T$  с учётом внезапных отказов и ошибок 2-го рода

Наличие внезапных отказов и ошибок мониторинга второго рода приводит к ощутимому увеличению коэффициента неготовности даже в условиях, когда интенсивность внезапных отказов на порядок меньше интенсивности постепенных отказов. В случае, если интенсивность внезапных отказов становится равной интенсивности постепенных отказов, то  $K_{\text{нп}}^* = 2.94 \cdot K_{\text{нп}}$  для  $T_{\text{н4}} = 200$  ч и  $\Delta T = 3.5$  ч.

### 3. Заключение

В работе предложена марковская модель функционирования ВОЛС, учитывающая влияние на надёжность постепенных и внезапных отказов, а также ошибок контроля второго рода. Получены выражения для расчета коэффициента неготовности.

По результатам моделирования можно сделать следующие выводы.

1. Эффективность применения прогнозирующей стратегии контроля функционирования ВОЛС зависит от выбора критерия, в соответствии с которым состояние ВОЛС следует считать предотказовым.

2. Состояния «постепенный отказ» и «внезапный отказ» в случае прогнозирующего контроля следует рассматривать как разные состояния, отличающиеся значениями средних времён восстановления.

3. Наличие внезапных отказов увеличивает при прогнозирующем контроле коэффициент неготовности, что в конечном счёте может свести на нет выигрыш от использования прогнозирующего контроля.

4. С ростом вероятности появления ошибок контроля второго рода растёт значение коэффициента неготовности, что приводит к снижению выигрыша от использования прогнозирующего контроля.

## Литература

1. *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.
2. *Шелухин О. Н., Осин А. В., Костин Д. В.* Мониторинг и диагностика аномальных состояний компьютерной сети на основе изучения «исторических данных» // Т-сomm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Т. 14, № 4. С. 23–30.
3. DISCUS Deliverable D4.4: Optical layer supervision tools and processes for long reach optical access. April, 2014.
4. *Chen J., Urban P., Wolsinska L.* Fast fault monitoring technique for reliable WDM PON: Achieving significant operational saving // Optical Fiber Communication Conference and Exposition and the National Fiber Optic Engineers Conference (OFC/NFOEC), 17-21 March, 2013
5. *Jung So-Ki.* Optical line monitoring system using optical fiber closure // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE). July, 2019. V. 8, № 2S4. P. 942–948.
6. *Urban P. et all.* Detection of fiber faults in passive optical networks // IEEE/OSA Journal of Optical Communication and Networking. Nov. 2018. V. 5, № 11. P. 1111–1121.
7. *Rad Mohammad M. et all.* Passive optical monitoring challenges and requirements // IEEE Communication Magazine. Feb. 2011. P. 545–551.
8. *Esmail M., Fathallah H.* Physical layer monitoring techniques for TDM-passive optical networks // IEEE Communications Surveys & Tutorials. January. 2013. V. 15, № 2. P. 943–958.
9. *Бурдин В. А., Воронков А. А., Шафигуллин Л. Н.* Эффективность применения прогнозирующих стратегий технического обслуживания ОК // Вестник связи. 2012. № 7. С. 5–8.
10. *Иванов А. Б., Котляр С. С., Ташоян А. Ф.* Прогностический контроль ВОЛС // Электросвязь. 2010. № 8. С. 47–53.
11. *Зубилевич А. Л., Сиднев С. А., Царенко В. А.* Определение эффективности применения прогнозирующей стратегии технического обслуживания ВОЛС // XIII Международная отраслевая научно-техническая конференция «Технологии информационного общества». Сборник трудов. Том 1. М.: ИД Медиа Паблишер, 2019. С. 31–33.
12. *Зеленцов Б. П.* Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017. 133 с.

Статья поступила в редакцию 11.08.2020;  
переработанный вариант – 15.09.2020.

**Шувалов Вячеслав Петрович**

д.т.н., профессор кафедры ПДСиМ 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 ПДСиМ СибГУТИ, тел. (383) 269-82-44, e-mail: irin.creme@yandex.ru.

**Reliability model of a fiber-optic communication line with unreliable predictive control**

**V. P. Shuvalov, B. P. Zelentsov, I. G. Kvitkova**

To calculate the reliability of a fiber-optic communication line (FOL), a Markov model is proposed taking into account various effects on the reliability of sudden and gradual failures as well as control type 2 errors. Formulas are obtained for calculating the coefficients of unavailability in predictive control regarding gradual and sudden failures in the case of control type 2 errors. The influence and the choice of the criterion for the transition of FOL to the pre-fault state on the reliability of FOL is evaluated.

*Keywords:* the object of technical operation, predictive strategy for the operation of FOL, pre-fault state, monitoring system, second-type control error, sudden and gradual failures.