

Модели элементов оптической сети доступа в условиях резервирования и учета недостоверного контроля их технического состояния

Б. П. Зеленцов, Е. П. Ионикова, В. П. Шувалов

В статье приведены модели функционирования в непрерывном времени оптических элементов пассивной оптической сети доступа. Рассматривается несколько вариантов: без резервирования, с резервированием 1:1 и с резервированием 1+1. В качестве причины нарушения работоспособности элементов рассматриваются скрытые отказы. В моделях учтены проверки технического состояния основного и резервного элемента и восстановление работоспособности после обнаружения отказа. На основе предельных вероятностей состояний произведён расчёт стационарного коэффициента готовности и коэффициента технического использования с учётом ошибок контроля I и II рода.

Ключевые слова: пассивная оптическая сеть, оптический линейный терминал, магистральный кабель, сплиттер, стационарный коэффициент готовности, скрытые отказы, ошибки контроля I и II рода, нелинейность шкалы рефлектометра.

1. Введение

Классическая пассивная оптическая сеть доступа состоит из следующих элементов: центрального станционного устройства, на котором размещено оптическое линейное устройство, фидерного волокна, распределительной оптической сети, оконечных абонентских устройств. К такой сети предъявляются довольно жесткие требования по надежности, методы обеспечения которых прописаны в рекомендациях G.983 МСЭ-Т. Выход из строя различных элементов сети доступа по-разному сказывается на имидже оператора. Так, выход из строя OLT или фидерного волокна приводит к потере связи со всеми оптическими сетевыми устройствами, подключенными к OLT по фидерному волокну, и снижению доверия со стороны потребителей со всеми вытекающими отсюда последствиями. Именно поэтому особое внимание следует уделять надежности OLT и фидерного волокна, а также ее повышению за счет резервирования.

С целью выполнения соглашения об уровне обслуживания (SLA) и, соответственно, уменьшения эксплуатационных затрат оператор стремится уменьшить время, требуемое на восстановление после отказов. В свою очередь, время восстановления напрямую зависит от времени обнаружения и локализации отказа. Одним из основных эксплуатационных факторов, позволяющих прогнозировать ухудшение характеристик оптических волокон, доступность оптических компонентов и обеспечивать требуемый уровень надежности, является непрерывный мониторинг системы.

Сбои в работе PON могут возникнуть как на физическом уровне (неисправность элемента, физического интерфейса), так и на прикладном уровне (нарушение работы логического интерфейса). Большинство традиционных подходов к управлению отказами в оптических сетях построено на диагностике в более высоких слоях на основе отчетов о состоянии сигналов, собранных с различных контрольных точек. Такая система мониторинга производит пе-

риодическое сканирование доступности устройств для системы управления по протоколу SNMP. Однако использование такого метода может привести к большим расходам на сетевое управление. Более того, протокол верхнего уровня часто требует более длительного времени обнаружения отказа, чем техника физического уровня [1]. Мониторинг работы компонентов PON физического уровня основан на принципах оптической рефлектометрии, оптического кодирования, спектрального анализа. Подобные методы мониторинга рассмотрены в [1–8].

В настоящей работе рассматриваются вопросы оценки надежности в условиях недостоверного контроля при резервировании одного из элементов системы доступа по схемам 1:1 и 1+1. Это потребовало разработки соответствующих математических моделей с использованием матричных методов математического моделирования, предложенных в работах [9, 10].

Методика математического моделирования, предложенная в [9, 10], ранее применялась в работах [11, 12]. Так, в [11] рассмотрена модель функционирования линии связи в условиях недостоверного контроля ее технического состояния при отсутствии резервирования. В [12] выполнена оценка влияния ошибок контроля на показатели надежности системы с многопутевой маршрутизацией.

В соответствии с документом [13] контроль работоспособности сети доступа должен осуществляться в трех точках. Точка 1 является ближайшей к OLT. Она находится на коммутационной панели, т.е. при этом оценивается работоспособность OLT, магистрального кабеля (МК) и сплиттера. Именно выход из строя этих элементов приводит к отказу в обслуживании большого числа абонентских устройств. Из перечисленных выше устройств наименее надежным является магистральный кабель. Для диагностического контроля магистрального кабеля используются рефлектометры. При этом ошибки контроля I и II рода возникают из-за нелинейности вертикальной шкалы рефлектометра и переотражения импульсов света в волокне [14].

Абсолютная достоверность результатов контроля определяется выражением

$$D = 1 - P_{ош} = 1 - (\alpha + \beta),$$

где α – вероятность ошибки контроля I рода (работоспособная система признается неработоспособной);

β – вероятность ошибки контроля II рода (неработоспособную систему признают работоспособной).

Будем рассматривать систему, в которой резервирование 1+1 или 1:1 применяется только для магистрального кабеля, который характеризуется наименьшим значением коэффициента готовности.

Для элементов сети доступа – OLT и сплиттера – определим коэффициенты готовности. Коэффициент готовности цепочки OLT – сплиттер равен произведению коэффициентов готовности. Будем полагать, что α и β для элементов этой цепочки равны нулю.

В качестве характеристики процесса восстановления выступает такой параметр, как интенсивность восстановления $\mu_в$.

Значения λ и $\mu_в$ OLT, магистрального кабеля и сплиттера в соответствии с [15] приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристики элементов сети

Параметры элемента	Значение параметра для элементов		
	OLT	магистрального кабеля (50 км)	сплиттера
λ , 1/час	$3.5 \cdot 10^{-5}$	$1.4 \cdot 10^{-4}$	$2.4 \cdot 10^{-6}$
$\mu_в$, 1/час	0.2	0.07	0.083

Диапазоны α и β для магистрального кабеля рассчитываются с использованием [16]. Результирующее значение коэффициента неготовности ($K_{H.Г}$) при контроле в точке 1 определим, учитывая независимость отказов элементов цепочки OLT – МК – сплиттер после определения коэффициентов неготовности МК:

$$K_{H.Г} = \sum_{i=1}^2 K_{H.Г}^{(i)},$$

где $K_{H.Г}^{(1)}$ – коэффициент неготовности цепочки OLT – сплиттер, $K_{H.Г}^{(2)}$ – коэффициенты неготовности для МК, определяемые при отсутствии резервирования и резервировании вида 1:1 и 1+1.

2. Функционирование системы

Анализируемая система без резервирования представляет собой совокупность OLT, оптического магистрального кабеля, сплиттера, системы контроля, периодически проверяющей работоспособность функционирующего элемента, и системы восстановления (рис. 1). В качестве системы мониторинга используется оптический импульсный рефлектометр FTV-7400E. Система является работоспособной до того момента, пока элемент не откажет. При обнаружении отказа он поступает на восстановление, после которого вновь становится работоспособным.

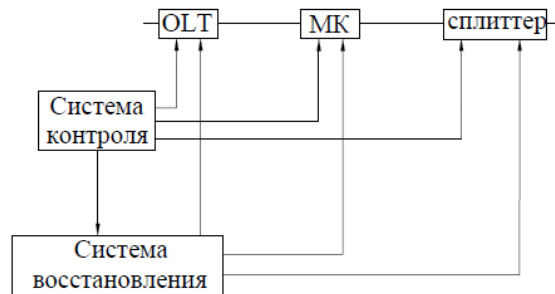


Рис. 1. Исследуемая система без резервирования

Система с резервированием магистрального кабеля представляет собой совокупность OLT, основного и резервного оптического кабеля (далее – элементов), сплиттера. Помимо этих элементов система включает систему контроля, периодически проверяющую работоспособность функционирующего элемента, и систему восстановления (рис. 2). Различают резервирование двух видов: 1:1 и 1+1 [17].

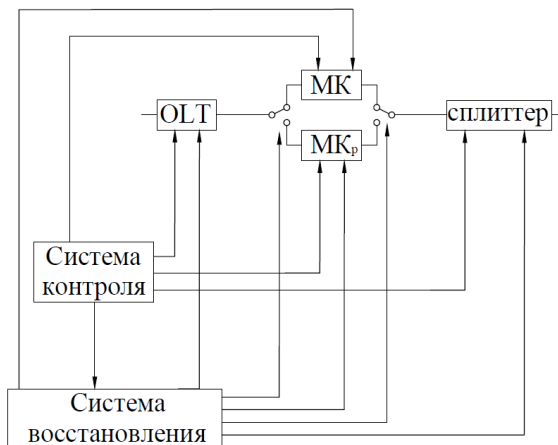


Рис. 2. Исследуемая система с резервированием

Функционирование системы по схеме резервирования кабеля 1:1 происходит следующим образом. При отказе элемента система переключается на резервный элемент, находящийся до этого времени в ненагруженном резерве, и весь трафик передается через него. Отказавший элемент поступает на восстановление, после которого вновь становится работоспособным и способным передавать данные. Система считается работоспособной, если работоспособен хотя бы один элемент (основной или резервный), и отказывает, если оба неработоспособны.

Отличие системы со схемой резервирования 1+1 заключается в том, что резервный элемент находится в нагруженном резерве. При отказе одного из функционирующих элементов система функционирует с использованием другого элемента, а отказавший поступает на восстановление.

Полагаем, что в рассмотренных системах основной и резервный элементы имеют одинаковую интенсивность отказов, обозначенную через λ , все события происходят в случайные моменты времени, время нахождения процесса в любом состоянии является случайным и распределено по показательному закону.

В исследовании учитываются только скрытые отказы, то есть те, которые могут быть обнаружены системой контроля благодаря периодическим проверкам. Проверка всех элементов проводится в случайные моменты времени (зачастую в моменты наименьшей загрузки сети). Таким образом, система контроля во всех случаях характеризуется интенсивностью начала периодической проверки γ и интенсивностью завершения периодической проверки μ_n . Числовые значения этих параметров взяты в соответствии с [18].

В системе без резервирования восстановление элемента требует ремонта или его замены. В системе с резервированием 1:1 при восстановлении отказавшего основного элемента происходит переключение трафика на резервный элемент. Во всех трех системах восстановление OLT и сплиттера требует ремонта или замены.

Предполагается, что брак восстановления отсутствует.

Введем следующие условия:

1. Отказы элементов независимы и случайны.
2. В каждый момент времени может произойти только один отказ.
3. Работоспособный элемент функционирует, пока по результатам проверки не будет признан неработоспособным.
4. Только функционирующий элемент подвергается проверке.
5. В один момент времени может восстановиться только один элемент.
6. Элемент отправляется на восстановление только по результатам периодической проверки.

Рассматриваемые системы относятся к системам длительного использования и поэтому их характеристики могут быть получены в стационарном режиме.

3. Графы состояний дублированной системы и системы без резервирования

Состояния элементов систем обозначаются одной буквой для системы без резервирования и двумя буквами для дублированной системы. Первая буква в обозначении состояния дублированной системы обозначает состояние основного элемента, вторая – резервного.

Р – элемент работоспособен и функционирует;

Х – элемент работоспособен и не функционирует (находится в ненагруженном (холодном) резерве);

Г – элемент работоспособен и функционирует (находится в нагруженном (горячем) резерве);

Н – элемент неработоспособен и функционирует;

В – элемент восстанавливается;

Б – элемент заблокирован.

В соответствии с [19, 20] состояния системы можно разбить на три подмножества:

1) подмножество работоспособных состояний U ;

2) подмножество неработоспособных состояний V ;

3) подмножество состояний, в которых применение рассматриваемой системы по назначению не предусмотрено ввиду технического обслуживания и ремонта S .

Граф состояний, характерный для OLT и сплиттера во всех трех системах и для магистрального кабеля в системе без резервирования, представлен на рис. 3.

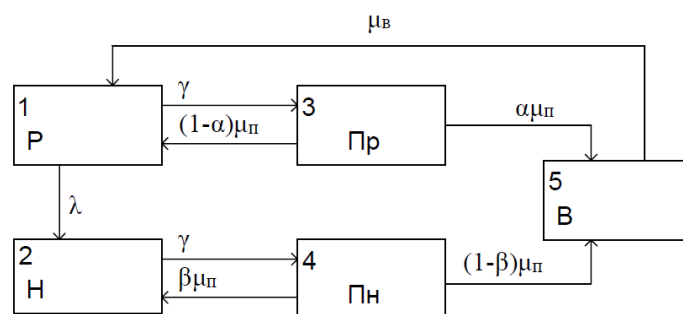


Рис. 3. Граф состояний системы без резервирования

На графе (рис. 3) используются следующие обозначения:

1. Р – элемент работоспособен и функционирует.
2. Н – элемент неработоспособен и функционирует.
3. Пр – периодический опрос работоспособного элемента.
4. Пн – периодический опрос неработоспособного элемента.
5. В – элемент восстанавливается.

Соответственно, три подмножества для системы без резервирования: $U = \{1\}$, $V = \{2; 5\}$, $S = \{3; 4\}$.

Граф состояний, характерный для дублированной системы кабелей 1:1, представлен на рис. 4.

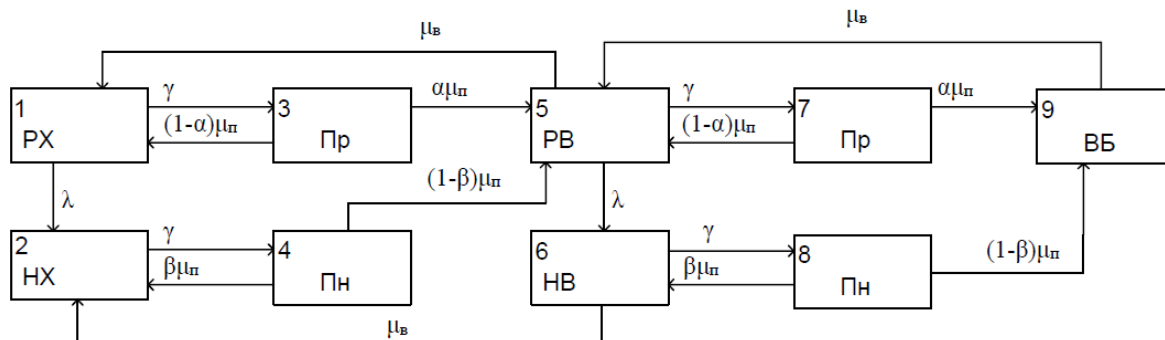


Рис. 4. Граф состояний дублированной системы 1:1

На графе (рис. 4) используются следующие обозначения:

1. РХ – основной элемент работоспособен и функционирует, резервный работоспособен и находится в ненагруженном резерве.
2. НХ – основной элемент неработоспособен и функционирует, резервный работоспособен и находится в ненагруженном резерве.
3. Пр – периодический опрос работоспособного основного элемента в том случае, когда резервный элемент находится в ненагруженном резерве.
4. Пн – периодический опрос неработоспособного основного элемента в том случае, когда резервный элемент находится в ненагруженном резерве.

5. РВ – один элемент работоспособен и функционирует, а другой восстанавливается.
6. НВ – один элемент неработоспособен и функционирует, а другой восстанавливается.
7. Пр – периодический опрос работоспособного элемента в том случае, когда второй элемент находится на восстановлении.
8. Пн – периодический опрос неработоспособного элемента в том случае, когда второй элемент находится на восстановлении.
9. ВБ – один элемент неработоспособен и заблокирован, а другой восстанавливается.

Соответственно, три подмножества для системы с резервированием 1:1: $U = \{1; 5\}$, $V = \{2; 6; 9\}$, $S = \{3; 4; 7; 8\}$.

Граф состояний, характерный для дублированной системы кабелей 1+1, представлен на рис. 5.

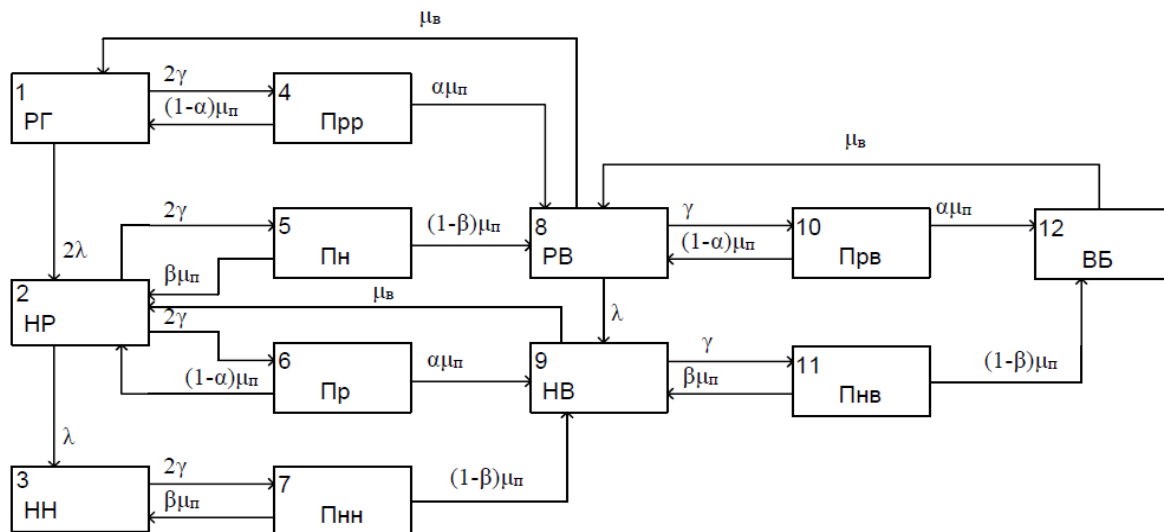


Рис. 5. Граф состояний дублированной системы 1+1

На графе (рис. 5) используются следующие обозначения:

1. РГ – основной элемент работоспособен и функционирует, резервный работоспособен и находится в нагруженном резерве.
2. НР – основной элемент неработоспособен и функционирует, резервный работоспособен и находится в нагруженном резерве.
3. НН – оба элемента функционируют и неработоспособны.
4. Прр – периодический опрос работоспособного элемента в том случае, когда оба работоспособны.
5. Пн – периодический опрос неработоспособного элемента в том случае, когда второй элемент работоспособен.
6. Пр – периодический опрос работоспособного элемента в том случае, когда второй элемент неработоспособен.
7. Пнн – периодический опрос неработоспособного элемента в том случае, когда оба неработоспособны.
8. РВ – один элемент работоспособен и функционирует, а другой восстанавливается.
9. НВ – один элемент неработоспособен и функционирует, а другой восстанавливается.
10. Прв – периодический опрос работоспособного элемента в том случае, когда второй элемент находится на восстановлении.
11. Пнв – периодический опрос неработоспособного элемента в том случае, когда второй элемент находится на восстановлении.
12. ВБ – один элемент неработоспособен и заблокирован, а другой восстанавливается.

Соответственно, три подмножества для системы с резервированием 1:1: $U = \{1; 2; 8\}$, $V = \{3; 9; 12\}$, $S = \{4; 5; 6; 7; 10; 11\}$.

4. Математическая модель

Математические модели основаны на теории однородных марковских процессов в непрерывном времени. Переходы между состояниями описываются постоянными интенсивностями. Математическое описание рассматриваемых систем производится матричными методами [9, 10]. Матричные методы привлекательны ввиду их компактности, простоты матричных преобразований и возможности расчетов с помощью современных средств.

Исходные характеристики представлены в виде квазистохастической матрицы, которую мы будем называть матрицей интенсивностей $\Lambda = \|\lambda_{ij}\|$, где λ_{ij} ($i \neq j$) – интенсивность непосредственного перехода из i -го состояния в j -е в непрерывном времени; $\lambda_{ii} = -\sum_{j, j \neq i} \lambda_{ij}$.

Матрицы интенсивностей для систем без резервирования и дублированных систем 1:1 и 1+1 имеют вид:

$$\Lambda = \begin{pmatrix} -(\lambda + \gamma) & \lambda & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 0 & \gamma & 0 \\ (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & \alpha\mu_{\Pi} \\ 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & (1-\beta)\mu_{\Pi} \\ \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\text{B}} \end{pmatrix},$$

$$\Lambda_{(1:1)} = \begin{pmatrix} -(\lambda + \gamma) & \lambda & \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\gamma & 0 & \gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & \alpha\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & (1-\beta)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & -(\lambda + \gamma + \mu_{\text{B}}) & \lambda & \gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & -(\gamma + \mu_{\text{B}}) & 0 & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & \alpha\mu_{\Pi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & (1-\beta)\mu_{\Pi} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\text{B}} \end{pmatrix},$$

$$\Lambda_{(1+1)} = \begin{pmatrix} -2(\lambda + \gamma) & 2\lambda & 0 & 2\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(\lambda + 4\gamma) & \lambda & 0 & 2\gamma & 2\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -2\lambda & 0 & 0 & 0 & 2\gamma & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & \alpha\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & 0 & (1-\beta)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & 0 & \alpha\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & (1-\beta)\mu_{\Pi} & 0 & 0 & 0 \\ \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\lambda + \gamma + \mu_{\text{B}}) & \lambda & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\mu_{\text{B}} + \gamma) & 0 & \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & (1-\alpha)\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & 0 & \alpha\mu_{\Pi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \beta\mu_{\Pi} & 0 & -\mu_{\Pi} & (1-\beta)\mu_{\Pi} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_{\text{B}} & 0 & 0 & 0 & -\mu_{\text{B}} \end{pmatrix}.$$

Процесс переходов от состояния к состоянию является эргодическим, поэтому предельные вероятности состояний существуют. Матрицы интенсивностей Λ , $\Lambda_{(1:1)}$ и $\Lambda_{(1+1)}$ являются достаточными для нахождения предельных вероятностей состояний.

Предельные вероятности состояний могут быть вычислены по формулам двух типов [9, 10]:

1) на основе определителей:

$$\pi_i = \frac{|\Lambda_i|}{\Delta};$$

2) на основе обращения матриц:

$$\pi_i = \frac{1}{1 - \bar{\lambda}_i \cdot (\Lambda_i)^{-1} \cdot \dot{e}},$$

где π_i – предельная вероятность i -го состояния;

Λ_i – матрица, полученная из исходной матрицы Λ удалением i -й строки и i -го столбца;

$|\Lambda_i|$ – определитель матрицы Λ_i ;

$\Delta = \sum_{i=1}^n |\Lambda_i|$ – сумма определителей по всем состояниям;

$\bar{\lambda}_i$ – i -я строка матрицы Λ без элемента λ_{ii} ;

n – число состояний системы;

$\dot{e}$ – столбец, все элементы которого равны 1.

Математические модели реализованы в числовом виде, что позволяет использовать полученные результаты непосредственно в процессе моделирования.

В соответствии с [19] при определении стационарных коэффициентов готовности и неготовности могут быть исключены планируемые периоды, в течение которых применение объекта по назначению не предусматривается. Поэтому эти показатели вычисляются через предельные вероятности подмножеств U и V , то есть предельная вероятность подмножества S исключается. Аналогично в коэффициенте технического использования учитывается время пребывания объекта в работоспособном состоянии и время простоев, обусловленных техническим обслуживанием и ремонтом. В соответствии с этим показатели надёжности системы вычисляются следующим образом:

1) стационарный коэффициент готовности: $K_G = \frac{\pi_U}{\pi_U + \pi_V}$;

2) стационарный коэффициент неготовности: $K_H = \frac{\pi_V}{\pi_U + \pi_V}$;

3) коэффициент технического использования: $K_{TH} = \frac{\pi_U}{\pi_U + \pi_S}$,

где π_U , π_V , π_S – предельные вероятности подмножеств U , V , S :

$$\pi_U = \sum_{i \in U} \pi_i; \pi_V = \sum_{i \in V} \pi_i; \pi_S = \sum_{i \in S} \pi_i.$$

5. Проверочные процедуры

Следует отметить, что вычисление промежуточных и выходных характеристик системы целесообразно сопровождать проверочными процедурами для проверки правильности проведенных вычислений. Проверочные процедуры могут быть необходимыми или достаточными и применяться на разных этапах алгоритма. Одни и те же промежуточные характеристики целесообразно производить разными методами. Вычисление предельных вероятностей по разным алгоритмам можно считать достаточной процедурой оценки правильности их вычисления. Кроме того, в число проверочных процедур целесообразно включить условие нормировки:

$$\sum_{i=1}^n \pi_i = 1.$$

Можно отметить необходимые процедуры проверки правильности сформированной матрицы интенсивностей эргодического множества состояний, что особенно актуально при большом числе состояний [9]:

$$\text{а) } |\Lambda| = 0; \text{ б) } \Lambda \cdot \dot{e} = \dot{o},$$

где $\dot{e}$ – столбец, все элементы которого равны 1;

$\dot{o}$ – столбец, все элементы которого равны 0.

6. Результаты исследования

В результате моделирования функционирования систем без резервирования, с резервированием 1:1 и 1+1 в непрерывном времени получены значения, показывающие зависимость коэффициента неготовности (K_H) от вероятностей ошибок контроля I (α) и II рода (β) (табл. 2–4).

Таблица 2. Влияние вероятностей ошибок I и II рода на коэффициент неготовности системы без резервирования

Вероятность ошибки II рода	При вероятности ошибки I рода				
	$\alpha = 0$	$\alpha = 0.00001$	$\alpha = 0.0001$	$\alpha = 0.001$	$\alpha = 0.0057$
$\beta = 0$	$2.24 \cdot 10^{-3}$	$3.08 \cdot 10^{-3}$	0.01	0.08	0.33
$\beta = 0.00001$	$2.24 \cdot 10^{-3}$	$3.08 \cdot 10^{-3}$	0.01	0.08	0.33
$\beta = 0.0001$	$2.24 \cdot 10^{-3}$	$3.08 \cdot 10^{-3}$	0.01	0.08	0.33
$\beta = 0.001$	$2.24 \cdot 10^{-3}$	$3.08 \cdot 10^{-3}$	0.01	0.08	0.33
$\beta = 0.0053$	$2.24 \cdot 10^{-3}$	$3.08 \cdot 10^{-3}$	0.01	0.08	0.33

Таблица 3. Влияние вероятностей ошибок I и II рода на коэффициент неготовности системы с резервированием 1:1

Вероятность ошибки II рода	При вероятности ошибки I рода				
	$\alpha = 0$	$\alpha = 0.00001$	$\alpha = 0.0001$	$\alpha = 0.001$	$\alpha = 0.0057$
$\beta = 0$	$2.43 \cdot 10^{-4}$	$2.47 \cdot 10^{-4}$	$3.50 \cdot 10^{-4}$	$7.27 \cdot 10^{-3}$	0.14
$\beta = 0.00001$	$2.43 \cdot 10^{-4}$	$2.47 \cdot 10^{-4}$	$3.50 \cdot 10^{-4}$	$7.27 \cdot 10^{-3}$	0.14
$\beta = 0.0001$	$2.43 \cdot 10^{-4}$	$2.47 \cdot 10^{-4}$	$3.50 \cdot 10^{-4}$	$7.27 \cdot 10^{-3}$	0.14
$\beta = 0.001$	$2.43 \cdot 10^{-4}$	$2.47 \cdot 10^{-4}$	$3.50 \cdot 10^{-4}$	$7.27 \cdot 10^{-3}$	0.14
$\beta = 0.0053$	$2.43 \cdot 10^{-4}$	$2.47 \cdot 10^{-4}$	$3.50 \cdot 10^{-4}$	$7.27 \cdot 10^{-3}$	0.14

Таблица 4. Влияние вероятностей ошибок I и II рода на коэффициент неготовности системы с резервированием 1+1

Вероятность ошибки II рода	При вероятности ошибки I рода				
	$\alpha = 0$	$\alpha = 0.00001$	$\alpha = 0.0001$	$\alpha = 0.001$	$\alpha = 0.0057$
$\beta = 0$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.19 \cdot 10^{-4}$	$2.28 \cdot 10^{-4}$
$\beta = 0.00001$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.19 \cdot 10^{-4}$	$2.28 \cdot 10^{-4}$
$\beta = 0.0001$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.19 \cdot 10^{-4}$	$2.28 \cdot 10^{-4}$
$\beta = 0.001$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.19 \cdot 10^{-4}$	$2.28 \cdot 10^{-4}$
$\beta = 0.0053$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.16 \cdot 10^{-4}$	$2.20 \cdot 10^{-4}$	$2.28 \cdot 10^{-4}$

Графики зависимости коэффициента неготовности от вероятностей ошибок контроля I и II рода для различных схем резервирования представлены на рис. 6–8.

Когда вероятность ошибки контроля I рода изменяется от 0 до 0.0057, коэффициент неготовности изменяется на несколько порядков. При использовании систем без защиты или с защитой 1:1 увеличение ошибки I рода критично, в то время как при использовании системы с защитой 1+1 коэффициент неготовности хоть и растет, но даже при больших значениях α остается малым, что позволяет сохранить работоспособность системы при любых значениях α .

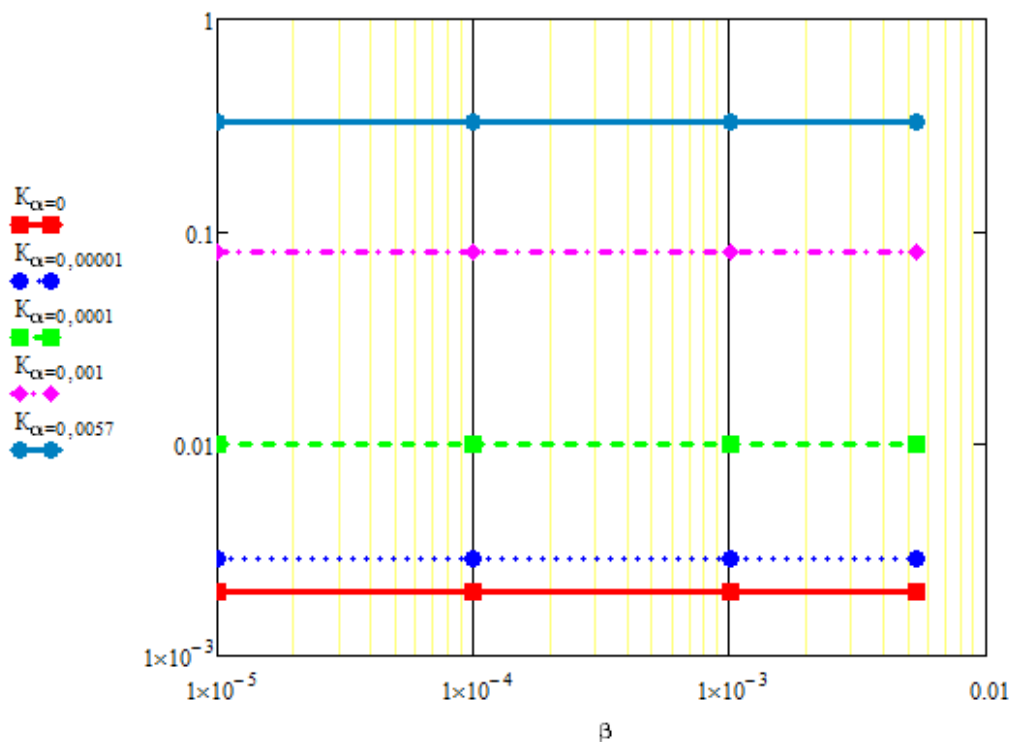


Рис. 6. Графики зависимости коэффициента неготовности от вероятности ошибки контроля II рода при фиксированных значениях вероятности ошибки контроля I рода для системы без резервирования

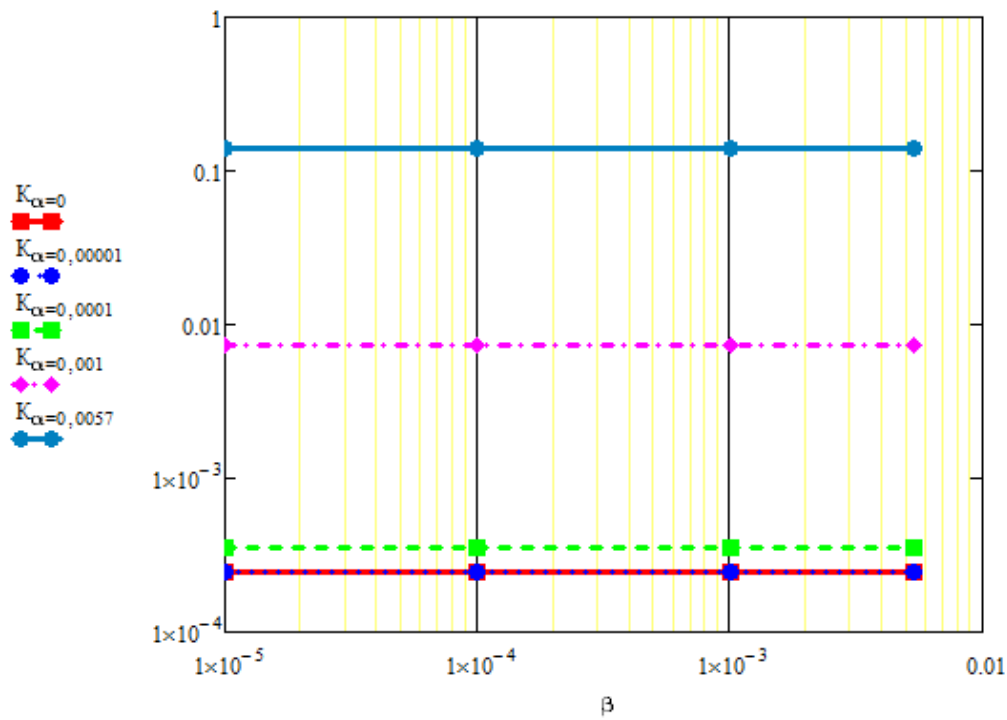


Рис. 7. Графики зависимости коэффициента неготовности от вероятности ошибки контроля II рода при фиксированных значениях вероятности ошибки контроля I рода для системы с резервированием 1:1

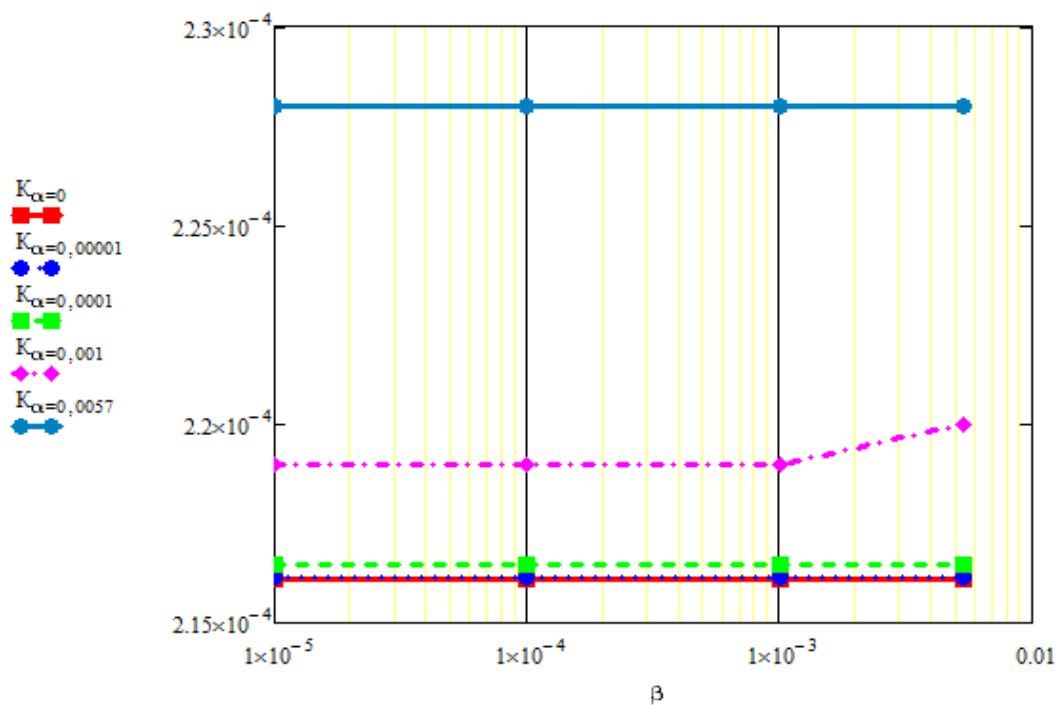


Рис. 8. Графики зависимости коэффициента неготовности от вероятности ошибки контроля II рода при фиксированных значениях вероятности ошибки контроля I рода для системы с резервированием 1+1

Коэффициент неготовности с увеличением вероятности ошибки контроля II рода от 0 до 0.0053 для всех исследуемых систем практически не изменяется. Слабая зависимость коэффициента неготовности от β в сравнении с зависимостью от α связана с тем, что ошибки элементов являются редкими событиями и, соответственно, ошибки контроля отказавших элементов появляются реже, чем события ошибок контроля работоспособных элементов.

Так как вероятность ошибки I рода оказывает значительное влияние на параметры, необходимо предъявить определенные требования к системе контроля, а именно, к такой характеристике системы, как нелинейность вертикальной шкалы рефлектометра. При невозможности обеспечить требуемую надежность только уменьшением коэффициента нелинейности необходимо предусматривать систему с резервированием с учетом компромисса между высокими показателями коэффициента готовности сети и капитальными и эксплуатационными расходами.

7. Заключение

Разработанные модели позволили рассчитать и спрогнозировать такие показатели, как коэффициенты готовности и неготовности и коэффициент технического использования. Модели позволили учесть в системах скрытые отказы, вероятности ошибок проверки I и II рода, а также исследовать зависимость показателей надёжности от различных влияющих факторов.

Приведённый подход позволяет совершенствовать систему сбора и обработки информации об эксплуатации линий связи, ведь в зависимости от условий, в которых функционирует сеть, а также от задаваемых параметров надежности ошибки контроля могут быть достаточно критичными в тех или иных случаях. Предложенные модели могут быть дополнены и усовершенствованы при учёте других факторов и за счёт усложнения условий.

Достоинством представленных моделей является возможность их реализации средствами компьютерного моделирования на основе таких систем, как Mathcad и MATLAB.

Литература

1. *Esmail M. A., Fathallah H.* Optical Coding for Next-Generation Survivable Long-Reach Passive Optical Networks // *J. Opt. Commun. Netw.* 2012. V. 4, № 12. P. 1062–1074.
2. *Sivakami S., Ramprabu G., Hemamalini V., Veronica K., Thirupoorani C.* Fiber Fault Localization in FTTH Using Online Monitoring // *International Journal of Innovative Research in Computer and Communication Engineering*. 2015. V. 3, Is. 3. P. 1763–1768.
3. *Wong E., Mas Machuca C., Wosinska L.* Survivable Hybrid Passive Optical Converged Network (HPCAN) Architectures Based on Reflective Monitoring // *Journal of Lightwave Technology*. 2016. 34 (18):1–1.
4. *Premadi A., Effendi A., Antonov B.* Optical Managing Project – Effectively Survivability and Monitoring System // *Int. J. of Future Computer and Commun.* 2016. V. 5, № 1. P. 66–69.
5. *Rad M. M., Fouli K., Fathallah H. A., Rusch L. A., Maier M.* Passive Optical Network Monitoring: Challenges and Requirements // *IEEE Communications Magazine*. 2011. P. 45–52.
6. *Premadi As., Syuhaimi Ab. Rahman M., Najib Moh. Saupe M., Jumari K.* Access Control System: Monitoring Tool for Fiber to the Home Passive Optical Network // *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2009. V. 3, № 2. P. 142–147.
7. *Rad M. M., Fathallah H., Rusch L. A.* Fiber Fault Monitoring for Passive Optical Networks Using Hybrid 1-D/2-D Coding // *IEEE Photonics Tech. Let.* 2008. V. 20, № 24. P. 2054–2056.
8. *Esmail M. A., Fathallah H.* Physical Layer Monitoring Techniques for TDM-Passive Optical Networks: A Survey // *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2013.
9. *Зеленцов Б. П.* Матричные методы моделирования однородных марковских процессов. Palmarium Academic Publishing, 2017.
10. *Зеленцов Б. П.* Матричные модели функционирования оборудования систем связи // *Вестник СибГУТИ*. 2015. № 4. С. 62–73.
11. *Зеленцов Б. П., Максимов В. П., Шувалов В. П.* Модель функционирования линии связи в условиях недостоверного контроля технического состояния // *Вестник СибГУТИ*. 2015. № 3. С. 35–43.

12. *Shuvalov V. P., Varaksina I. Yu.* Estimation of Control Errors Influence on Availability of Multipath Routing System // Proc. 12th International Conference on Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE), 2014. P. 420–425.
13. FTTH handbook. Edition 8 D&O committee. Revision date: 13.02.2018.
14. *Листвин А. В., Листвин В. Н.* Рефлектометрия оптических волокон. М.: ЛЕСАПарт, 2005. 208 с.
15. Recommendations ITU-T G-series – Supplement 51 (2012). Passive optical network protection considerations.
16. Р 50-609-40-01. Рекомендации. Технологическое проектирование технического контроля.
17. Recommendations ITU-T G.983.5 (2012). A broadband optical access system with enhanced survivability.
18. OTDR. Оптический импульсный рефлектометр. Руководство пользователя. [Электронный ресурс]. URL: https://fibertop.ru/files/category_14538/instr_c14538_2.pdf.
19. ГОСТ 27.002-15. Надёжность в технике. Термины и определения.
20. ГОСТ Р 53480-2009. Надёжность в технике. Термины и определения.

*Статья поступила в редакцию 25.05.2018;
переработанный вариант – 28.11.2018.*

Зеленцов Борис Павлович

д.т.н., профессор кафедры высшей математики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: zelentsovb@mail.ru.

Ионикова Елена Петровна

аспирант, кафедра передачи дискретных сообщений и метрологии СибГУТИ, e-mail: ionikova.lena@mail.ru.

Шувалов Вячеслав Петрович

д.т.н., профессор, заведующий кафедрой передачи дискретных сообщений и метрологии СибГУТИ, e-mail: shvp04@mail.ru.

Models of optical access network elements in the conditions of redundancy and accounting of unreliable control of their technical condition

B. P. Zelentsov, E. P. Ionikov, V. P. Shuvalov

The paper presents functioning models in continuous time of optical elements of a passive optical access network. Several options are being considered: without reservation, with reservation 1:1 and with reservation 1+1. Covert failures are considered to be the reason for the malfunction of the elements. The models take into account technical condition checks of the main and backup elements and the recovery of working capacity after a failure detection. Based on the limiting probabilities of the states, the stationary availability factor and the technical utilization factor were calculated taking into account control errors of I and II type.

Keywords: passive optical network, optical linear terminal, trunk cable, splitter, steady state availability, latent fault, check-out errors of the first and second kind, non-linearity of the reflectometer scale.