

УДК 519.718:004.722
<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-39-47>



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Анализ структурной надежности сетей связи с механизмами защитного переключения для одного защищаемого и одного резервного участков

К.А. Батенков ^{1, @},
А.Б. Фокин ²

¹ МИРЭА – Российский технологический университет, Москва, 119454 Россия

² Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, Орёл, 302015 Россия

@ Автор для переписки, e-mail: pustur@yandex.ru

Резюме

Цели. Известно, что соглашение об уровне обслуживания является важным инструментом выстраивания разумных отношений между абонентами и операторами телекоммуникационных сетей, в т.ч. в части качества предоставляемых услуг, одной из составляющих которого является надежность, оцениваемая коэффициентом готовности. Наиболее подходящей моделью для оценки надежности предоставляемой услуги оказывается случайная графовая модель, строящаяся на основе контура обслуживания – совокупности технических средств, участвующих в оказании данной услуги. В данной постановке оценка надежности услуги отталкивается от надежности составляющих телекоммуникационную сеть (граф) элементов – узлов (вершин) и линий связи (ребер). При этом коэффициенты готовности узлов и линий определяются конструктивными особенностями среды распространения и организующих их технических средств. Целью работы является разработка подхода к анализу надежности телекоммуникационных сетей, поддерживающих механизмы защитного переключения для одного защищаемого и одного резервного участков, позволяющего на основе компьютерного моделирования проводить сравнение подобных механизмов.

Методы. Используются методы теории случайных графов, матриц, вероятностей и компьютерного моделирования.

Результаты. Предложено разбивать на три группы элементы маршрута (как основные, так и резервирующие): первая группа указывает на постоянные неизменяемые части путей, вторая – идентифицирует резервируемые участки, а третья группа указывает на резервирующие участки. При этом каждый из резервируемых и резервирующих участков формируется на основе заданных предпочтений и обычно направлен на увеличение результирующей надежности, хотя возможно использование и других правил. Для схем защитного переключения для одного защищаемого и одного резервного участков показан вариант формирования маршрутов, используемых для дальнейших расчетов показателя надежности путем компьютерного моделирования.

Выводы. На примере магистральной сети путем компьютерного моделирования показано, что использование механизмов защитного переключения для случая одного требуемого маршрута передачи демонстрирует существенный рост надежности, за исключением применения защитного переключения на участках, что связано, прежде всего, с особенностями топологии рассматриваемой сети.

Ключевые слова: сеть связи, граф, вероятность связности, защитное переключение, надежность, услуга, коэффициент готовности

• Поступила: 03.07.2023 • Доработана: 20.09.2023 • Принята к опубликованию: 09.02.2024

Для цитирования: Батенков К.А., Фокин А.Б. Анализ структурной надежности сетей связи с механизмами защитного переключения для одного защищаемого и одного резервного участков. *Russ. Technol. J.* 2024;12(2):39–47. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-39-47>

Прозрачность финансовой деятельности: Авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Analysis of the structural reliability of communication networks supporting protective switching mechanisms for one protected section and one backup section

Kirill A. Batenkov ^{1, @},
Aleksandr B. Fokin ²

¹ MIREA – Russian Technological University, Moscow, 119454 Russia

² Academy of Federal Guard Service of Russian Federation, Orel, 302015 Russia

@ Corresponding author, e-mail: pustur@yandex.ru

Abstract

Objectives. The service level agreement is an important tool used in building reasonable relations between subscribers and operators of telecommunication networks. This includes the quality of services provided. One key component is reliability as assessed by the availability factor. The most suitable model for assessing the reliability of the service provided is a random graph model based on the service contour. This is the set of technical resources involved in the provision of this service. In this formulation, the assessment of the reliability of the service is based on the reliability of elements which constitute the telecommunications network (graph), nodes (vertices) and communication lines (edges). At the same time, the availability factors of nodes and lines are determined by the design features of the distribution environment, as well as the technical means used to organize them. The purpose of this work is to develop an approach to analyzing the reliability of telecommunication networks which support protective switching mechanisms for one protected and one backup sections.

Methods. The following methods are used: theory of random graphs, matrices, probabilities and computer modeling.

Results. The elements of the route, both basic and reserving, are divided into three groups. The first indicates permanent unchangeable parts of the paths, the second group identifies the reserved sections, and the third group indicates the reserving sections. At the same time, each of the reserved and reserving sections is formed on the basis of specified preferences. They are usually aimed at increasing the resulting reliability, although other rules may be used. In the case of protective switching schemes for one protected section and one backup sections, a variant of forming routes used for further calculations of the reliability indicator is shown.

Conclusions. Using the example of a backbone network, the study shows that the use of protective switching mechanisms for the case of one required transmission route demonstrates a significant increase in reliability, with the exception of the use of protective switching in sections. This is primarily due to the topology features of the network under consideration.

Keywords: communication network, graph, connectivity probability, protective switching, reliability, service, availability factor

• Submitted: 03.07.2023 • Revised: 20.09.2023 • Accepted: 09.02.2024

For citation: Batenkov K.A., Fokin A.B. Analysis of the structural reliability of communication networks supporting protective switching mechanisms for one protected section and one backup section. *Russ. Technol. J.* 2024; 12(2):39–47. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2024-12-2-39-47>

Financial disclosure: The authors have no a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

ВВЕДЕНИЕ

Хорошо известно, что соглашение об уровне обслуживания (SLA – service level agreement) является важным инструментом выстраивания разумных отношений между абонентами и операторами телекоммуникационных сетей [1]. При этом и международные рекомендации, и российские стандарты предполагают его использование в отраслях информационных и телекоммуникационных технологий. В соответствии с данным соглашением обе стороны достигают определенного понимания о предоставляемой услуге, ее качестве, ответственности, приоритетности и других факторах.

В базовую структуру соглашения об уровне обслуживания для любой услуги связи входят девять разделов. В разделе, содержащем информацию об уровне обслуживания, обязательно приводится информация о показателях качества услуги и значениях этих показателей, гарантируемых абоненту оператором (ГОСТ Р 55389-2012¹). При этом наиболее значимыми оказываются показатели, характеризующие готовность услуги. Допускается включение как прямых показателей, например, времени простоя или наработки на отказ, так и косвенных – коэффициента готовности, являющегося наиболее часто используемым показателем надежности. Иногда применяются и более простые детерминированные показатели, характеризующие связность эквивалентного графа, моделирующего исходную телекоммуникационную сеть или даже услугу [2].

Выбор данного показателя в качестве ключевого вызван тем, что он просто и ясно устраняет недопонимание между пользователями и операторами, поскольку задается в форме доли (процента) времени работоспособности услуги на соответствующей точке доступа к ней.

Гарантируемые оператором значения коэффициента готовности, как, впрочем, и других показателей, устанавливаются на основе действующих

федеральных и отраслевых документов. Например, существуют нормы на услугу местной телефонной связи (ГОСТ Р 53727-2009²), каналов тональной частоты³, сетевых и линейных трактов^{4, 5}. Однако ситуация с динамично развивающимися современными телекоммуникационными услугами оказывается не такой радужной, и обычно приходится довольствоваться нормативными значениями российских или зарубежных операторов связи, формализуемыми на основе опыта эксплуатации их телекоммуникационных сетей (Rec. E. 860⁶). Примером может являться набор рекомендаций Международного союза электросвязи для оптических транспортных сетей (Rec. G. 8201⁷) или услуг мультимедиа (Rec. G. 1010⁸).

² ГОСТ Р 53727-2009. Национальный стандарт Российской Федерации. *Качество услуги «местная телефонная связь». Показатели качества*. М.: Стандартинформ; 2011. 11 с. [GOST R 53727-2009. National Standard of the Russian Federation. *Quality of service "Local telephone communication." Quality indices*. Moscow: Standartinform; 2011. 11 p. (in Russ.).]

³ Нормы на электрические параметры каналов тональной частоты магистральной и внутризоновых первичных сетей. Утв. Министерством связи РФ 15.04.96. М.: МК-Полиграф; 1996. 96 с. [Regulations for electrical parameters of tone frequency channels of main and intra-area primary networks. Approved by the Ministry of Communications of the Russian Federation 15.04.96. Moscow: MK-Polygraph; 1996. 96 p. (in Russ.).]

⁴ Нормы на электрические параметры сетевых трактов магистральной и внутризоновых первичных сетей. I часть. Утв. Министерством связи РФ 08.01.1997. М.: МК-Полиграф; 1996. 134 с. [Regulations for electrical parameters of network paths of main and intra-area primary networks. Part I. Approved by the Ministry of Communications of the Russian Federation 08.01.1997. Moscow: MK-Polygraph; 1996. 134 p. (in Russ.).]

⁵ Нормы на электрические параметры линейных трактов магистральной и внутризоновых первичных сетей. II часть. Утв. Министерством связи РФ 08.01.1997. М.: МК-Полиграф; 1996. 168 с. [Regulations for electrical parameters of network paths of main and intra-area primary networks. Part II. Approved by the Ministry of Communications of the Russian Federation 08.01.1997. Moscow: MK-Polygraph; 1996. 168 p. (in Russ.).]

⁶ Rec. E. 860. *Framework of a service level agreement*. Geneva: ITU-T; 2003. 30 p. <https://www.itu.int/rec/T-REC-E.860-200206-I/en>. Дата обращения 26.02.2024. / Accessed February 26, 2024.

⁷ Rec. G. 8201. *Error performance parameters and objectives for multi-operator international paths within optical transport networks*. Geneva: ITU-T; 2012. 24 p. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.8201>. Дата обращения 26.02.2024. / Accessed February 26, 2024.

⁸ Rec. G. 1010. *End-user multimedia QoS categories*. Geneva: ITU-T; 2002. 18 p. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.1010/en>. Дата обращения 26.02.2024. / Accessed February 26, 2024.

¹ ГОСТ Р 55389-2012. Национальный стандарт Российской Федерации. *Система национальных стандартов в области качества услуг связи. Соглашение об уровне обслуживания (SLA)*. М.: Стандартинформ; 2019. 12 с. [GOST R 55389-2012. National Standard of the Russian Federation. *System of National Standards for quality of telecommunication services. Service Level Agreement (SLA)*. Moscow: Standartinform; 2019. 12 p. (in Russ.).]

В подобной ситуации для оператора связи крайне важной оказывается оценка коэффициента готовности запрашиваемой пользователем услуги. Основным препятствием выступает довольно значительный интервал измерений, требуемый для получения достоверных экспериментальных оценок, существенно возрастающий при увеличении коэффициентов готовности. Применение расчетных соотношений, позволяющих вычислить подобные оценки на основе определенного набора исходных данных, имеющихся у оператора связи, позволяет предварительно проанализировать его возможности с точки зрения запросов конечного пользователя.

1. НАДЕЖНОСТЬ СЕТИ И ЕЕ ЭЛЕМЕНТОВ

Наиболее подходящей моделью для оценки надежности предоставляемой услуги оказывается случайная графовая модель [3], строящаяся на основе контура обслуживания – совокупности технических средств, участвующих в оказании данной услуги [1, 4]. Понятно, что в данной постановке оценка надежности услуги отталкивается от надежности составляющих телекоммуникационную сеть (граф) элементов – узлов (вершин) и линий связи (ребер) [5]. При этом часто используются методы, требующие отыскания заданных подграфов, например, путей [6] или сечений [7], в структуре исходного графа.

Коэффициенты готовности узлов и линий определяются конструктивными особенностями среды распространения и их организующих технических средств (Rec. G. 911⁹) [8]. Однако обычно детального описания подобных особенностей у оператора просто нет, и используют упрощенные модели.

Используемое сетевое оборудование, такое как оптические кросс-коннекторы и мультиплексоры ввода-вывода, состоит из значительного числа различных элементов, каждый из которых характеризуется собственными средними наработкой на отказ и временем восстановления (Rec. G. 911) [9]. Средняя наработка на отказ T_0 сетевого оборудования имеет размерность времени или количества отказов в единицу времени, обычно принимаемую равной 10^9 ч, или примерно 114 155 лет. Среднее же время восстановления T_r выражается в часах. При этом коэффициент готовности соответствует вероятности связности p соответствующего узла или линии: $p = \frac{T_r}{T_0}$.

Отказы линий связи могут вызываться как выходом из строя оптического кабеля, так и сбоями

в работе оптических усилителей или систем уплотнения линии WDM (wavelength division multiplexing – уплотнение с разделением по длине волны, спектральное уплотнение). Часто принимаемое допущение – отказы отдельных волокон в оптическом кабеле происходят одновременно, поскольку чаще всего вызываются разрывами при копке, приводящими к выходу из строя сразу всех волокон. Для кабеля среднее время наработки на отказ T_0 задается, исходя из меры длины разрыва, соответствующей средней длине кабеля d_0 , подверженной единичному разрыву в год. Данное условие объясняется ростом вероятности разрыва кабеля при увеличении его длины d , поскольку более протяженные участки потенциально имеют больше возможностей быть поврежденными внешними воздействиями. Среднее время наработки на отказ оптического кабеля, выраженное в часах, определяется выражением [9]:

$$T_0 = 8760 \frac{d_0}{d}.$$

Среднее время восстановления T_r кабеля включает в себя время локализации неисправности, доступа к кабелю, ремонта повреждения и введения в эксплуатацию, подразумевающего в т.ч. тестирование качества информационного обмена.

Перечень средних времен наработки на отказ и восстановления для наиболее часто используемого сетевого оборудования представлен в [9]. Данные значения являются в некоторой степени слишком усредненными, могут различаться у производителей оборудования и тем более изменяться с течением времени вследствие совершенствования элементной базы. Тем не менее, их применение оправдано не с точки зрения получения абсолютных величин рассчитываемых показателей надежности телекоммуникационных сетей, а при сравнении механизмов обеспечения отказоустойчивости вследствие близости показателей к реальным типовым величинам. Следует также отметить, что время наработки на отказ для современного оборудования зачастую оказывается даже ниже приведенных данных [10], причиной чего, судя по всему, является усложнение базы электронных компонентов.

Далее рассматривается двунаправленная линия связи, соединяющая два узла отрезками кабеля, перемеженными оптическими усилителями на расстоянии порядка 100 км. Понятно, что линия связи является работоспособной в случае готовности всех составляющих ее элементов. Предполагая статистическую независимость выходов их из строя, коэффициент готовности p_{line} линии можно рассчитать по формуле:

$$p_{\text{line}}(d) = (1 - 6.088 \cdot 10^{-6} d) \cdot 0.999952 \left\lfloor \frac{d}{100} \right\rfloor \cdot 0.999988^2. \quad (1)$$

⁹ Rec. G. 911. *Parameters and calculation methodologies for reliability and availability of fibre optic systems (Previously CCITT Recommendation)*. Geneva: ITU-T; 1994. 39 p. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.911/en>. Дата обращения 26.02.2024. / Accessed February 26, 2024.

2. МЕХАНИЗМЫ ЗАЩИТНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ

Коэффициент готовности отдельной линии связи рассчитывается достаточно просто на основе модели последовательного соединения элементов. Однако в реальных телекоммуникационных сетях, для которых характерно наличие альтернативных маршрутов, ситуация существенно усложняется [11]. При этом немалую важную роль в итоговой надежности соединений играют механизмы защитного переключения [12], или избыточные схемы.

Отметим, что в настоящей работе рассматривается влияние характеристик телекоммуникационной сети на ее итоговую надежность с позиции наиболее часто используемого показателя – коэффициента готовности. Вопросы, связанные с оперативностью переключения на резервные каналы, требуют дальнейшего уточнения [13]. В качестве базовых механизмов обеспечения отказоустойчивости рассматриваются методы защитного переключения (protection) для одного основного маршрута (Rec. G. 808¹⁰) [14]. При этом выделяют архитектуру защитного переключения с одним защищаемым и одним резервным участком (1 : 1 или 1 + 1), а также шесть разновидностей защищаемых участков элементов сети: линия, узел, маршрут, сегмент, кольцо, p -цикл [9]. Каждая из разновидностей обладает своими особенностями с позиции технической реализации, однако с точки зрения анализа надежности на основе случайных графов достаточно рассматривать защищаемый участок как некоторый набор вершин и ребер графа, использование которых допустимо лишь на основном маршруте. При этом использование колец или p -циклов также сводится к подобным типам резервирования путем несложных преобразований.

3. АРХИТЕКТУРА МАРШРУТОВ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Элементы маршрута, как основные, так и резервирующие, целесообразно разбить на три группы (рис. 1). Первая указывает на постоянные неизменяемые части путей и задается как вектор $\mathbf{s} = \{s_i\}_{i=\overline{1, l+v}}$ элементов исходного графа, где $s_i = 1$, если i -й элемент графа (ребро или вершина) содержится в данном пути и $s_i = 0$, если нет; l – число ребер в графе; v – число вершин в графе. Вторая группа идентифицирует резервируемые участки и представляется в форме матрицы $\mathbf{S} = \{s_{i,j}\}_{i=\overline{1, l+v}, j=\overline{1, n}}$, каждый

столбец которой эквивалентен одному из n резервируемых участков, где аналогично $s_{i,j} = 1$, если i -й элемент содержится в j -м пути и $s_{i,j} = 0$, если нет. Третья группа указывает на резервирующие участки, записывается в форме матрицы $\mathbf{T} = \{t_{i,j}\}_{i=\overline{1, l+v}, j=\overline{1, m}}$, каждый столбец которой эквивалентен одному из m резервирующих участков, где также $t_{i,j} = 1$, если i -й элемент содержится в j -м пути и $t_{i,j} = 0$, если нет. Каждый из резервируемых и резервирующих участков формируется на основе заданных предпочтений и обычно направлен на увеличение результирующей надежности, хотя возможно использование и других правил.

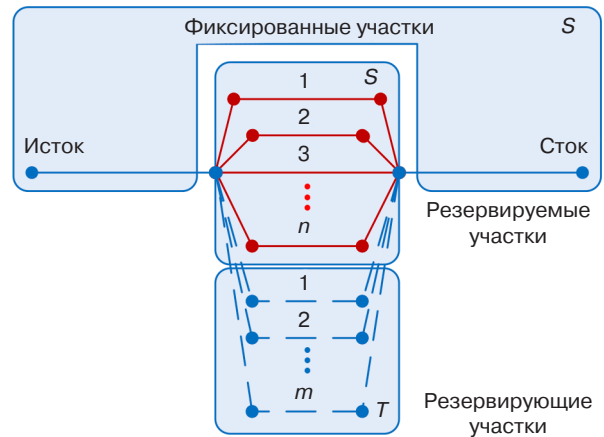


Рис. 1. Архитектура маршрутов передачи информации с механизмами защитного переключения

Так, в общем случае для архитектур защитного переключения целесообразно в качестве основы рассматривать n основных маршрутов передачи информации, которые обычно задаются в форме простых цепей с независимыми защищаемыми участками, обладающими максимальными коэффициентами готовности. Тогда матрица резервируемых участков выбирается исходя из максимальной величины коэффициента готовности между заданными элементами исходного графа с учетом их независимости и невключенными в фиксированную часть маршрута

$$\mathbf{S}^{(1)} = \left\{ \mathbf{W}^{(j)} : \max \left[\mathbf{s} + \mathbf{W}^{(j)} \right] = 1, \max_{j=\overline{1, s}} \prod_{i=\overline{1, l+v}} p_i w_{i,j} \right\},$$

$$\mathbf{S}^{(i)} = \left\{ \mathbf{W}^{(j)} : \max \left[\mathbf{s} + \text{sign}(\mathbf{S}_{1, i-1}) + \mathbf{W}^{(j)} \right] = 1, \max_{j=\overline{1, s}} \prod_{i=\overline{1, l+v}} p_i w_{i,j} \right\}, i = \overline{2, n},$$

где $\mathbf{W} = \{w_{i,j}\}_{i=\overline{1, l+v}, j=\overline{1, s}}$ – матрица путей между истоком и стоком резервируемых участков; $w_{i,j} = 1$, если

¹⁰ Rec. G. 808. Terms and definitions for network protection and restoration. Amendment 1. 2018–03. Geneva: ITU-T; 2018. 20 p. <https://www.itu.int/rec/T-REC-G.808/en>. Дата обращения 26.02.2024. / Accessed February 26, 2024.

i -й элемент содержится в j -м пути и $w_{i,j} = 0$ – если не содержится; $\mathbf{p} = \{p_i\}_{i=1, l+v}$ – вектор вероятностей связности (работоспособности) ребер и вершин; p_i – вероятность связности (коэффициент готовности) i -го элемента.

Здесь каждый столбец $\mathbf{S}^{(i)}$ матрицы резервируемых участков формируется из такого столбца $\mathbf{W}^{(j)}$ матрицы путей, который одновременно не имеет повторных элементов в уже использованных предыдущих основных путях, что проверяется общим условием $\max[\mathbf{s} + \text{sign}(\mathbf{S}\mathbf{1}_{i-1} + \mathbf{W}^{(j)})]$, и имеет максимальную вероятность связности (коэффициент готовности) из возможных альтернативных путей, задаваемую выражением $\max_{j=1, s} \prod_{i=1}^{l+v} p_i w_{i,j}$.

Основные маршруты представляются в виде матрицы путей $\mathbf{R}$:

$$\mathbf{R} = \mathbf{s}\mathbf{1}_n^T + \mathbf{S}.$$

Аналогично, в общем случае, m маршрутов, содержащих резервируемые участки, задаются в форме простых цепей с независимыми резервируемыми и резервирующими участками, обладающими максимальными коэффициентами готовности. Тогда матрица резервирующих участков выбирается исходя из максимальной величины коэффициента готовности между заданными элементами исходного графа с учетом их независимости и невключенными в фиксированную часть маршрута и резервируемые участки.

$$\mathbf{T}^{(1)} = \left\{ \mathbf{W}^{(j)} : \max[\text{sign}(\mathbf{R}\mathbf{1}_n) + \mathbf{W}^{(j)}] = 1, \right.$$

$$\left. \max_{j=1, s} \prod_{i=1}^{l+v} p_i w_{i,j} \right\},$$

$$\mathbf{T}^{(i)} = \left\{ \mathbf{W}^{(j)} : \max[\text{sign}(\mathbf{R}\mathbf{1}_n) + \text{sign}(\mathbf{T}\mathbf{1}_{i-1}) + \mathbf{W}^{(j)}] = 1, \right.$$

$$\left. \max_{j=1, s} \prod_{i=1}^{l+v} p_i w_{i,j} \right\}, i = \overline{2, m}.$$

Здесь каждый столбец $\mathbf{T}^{(i)}$ матрицы резервирующих участков формируется из такого столбца $\mathbf{W}^{(j)}$ матрицы путей, который одновременно не имеет повторных элементов в уже использованных предыдущих основных и резервных путях, что проверяется общим условием $\max[\mathbf{s} + \text{sign}(\mathbf{S}\mathbf{1}_{i-1} + \mathbf{W}^{(j)})]$, и имеет максимальную вероятность связности (коэффициент готовности) из возможных альтернативных путей, задаваемую выражением $\max_{j=1, s} \prod_{i=1}^{l+v} p_i w_{i,j}$.

Сами резервные маршруты представляются также в виде матрицы путей $\mathbf{U}$:

$$\mathbf{U} = \mathbf{s}\mathbf{1}_m^T + \mathbf{T}.$$

4. АРХИТЕКТУРА ЗАЩИТНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ ДЛЯ ОДНОГО ЗАЩИЩАЕМОГО И ОДНОГО РЕЗЕРВНОГО УЧАСТКОВ

Для одного защищаемого и одного резервного участков (схемы 1 + 1 или 1 : 1) (рис. 2) исходный основной путь дополняется резервным с теми же самыми истоком и стоком, не имеющим в своем составе элементов защищаемого участка основного пути и обладающим максимальным коэффициентом готовности из всех возможных альтернатив. Таким образом, матрицы резервируемых $\mathbf{S}$ и резервирующих $\mathbf{T}$ участков редуцируются в векторы, а матрица простых цепей $\mathbf{R}$ содержит два столбца, первый $\mathbf{R}^{(1)}$ из которых указывает на основной маршрут, а второй $\mathbf{R}^{(2)}$ – на резервирующий путь:

$$\mathbf{R}^{(1)} = \mathbf{s} + \mathbf{S},$$

$$\mathbf{R}^{(2)} = \mathbf{s} + \mathbf{T}.$$

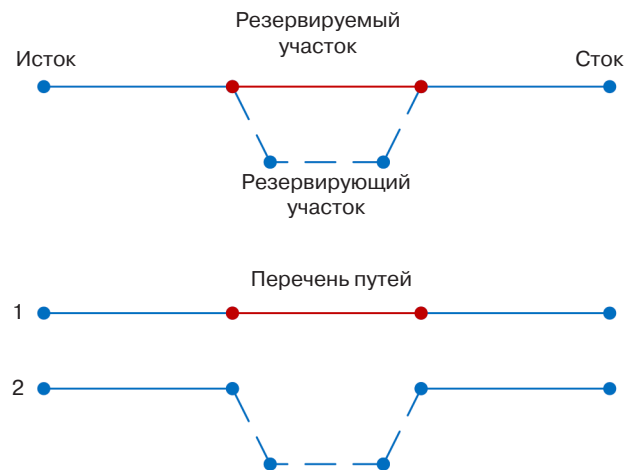


Рис. 2. Архитектура защитного переключения для одного защищаемого и одного резервного участков и перечень путей

5. ПРИМЕР АНАЛИЗА НАДЕЖНОСТИ МАГИСТРАЛЬНОЙ СЕТИ

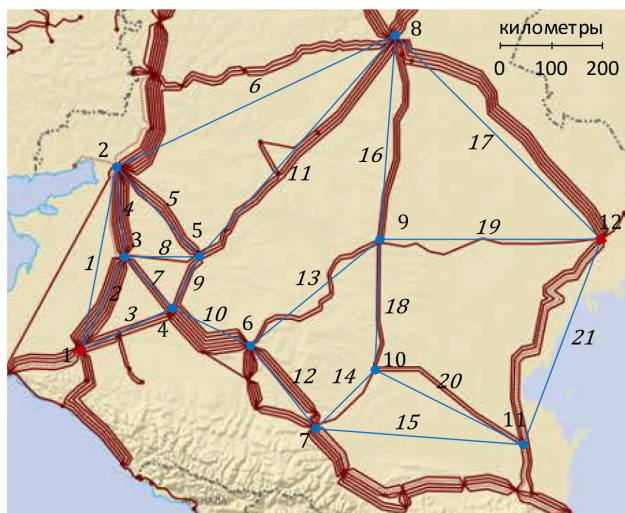
Кабельная структура магистральной сети юга России (рис. 3) доступна на официальном сайте Международного союза электросвязи¹¹. На рис. 3 также представлен пронумерованный эквивалентный

¹¹ <https://bbmaps.itu.int/bbmaps/>. Дата обращения 26.02.2024. / Accessed February 26, 2024.

Таблица 1. Параметры надежности линий связи

Номер линии	Протяженность d_l , км	Коэффициент готовности p_l	Номер линии	Протяженность d_l , км	Коэффициент готовности p_l	Номер линии	Протяженность d_l , км	Коэффициент готовности p_l
1	375	0.99755	8	150	0.99901	15	410	0.99729
2	200	0.99866	9	115	0.99923	16	400	0.99735
3	200	0.99866	10	110	0.99926	17	565	0.9963
4	175	0.99886	11	575	0.99624	18	265	0.99827
5	250	0.99836	12	225	0.99851	19	430	0.99717
6	600	0.99604	13	325	0.99785	20	325	0.99785
7	140	0.99908	14	165	0.99892	21	440	0.99711

граф $G(12, 21)$, вероятность связности которого согласно ГОСТ Р 53111–2008¹² трактуется как коэффициент готовности и характеризует надежность.

**Рис. 3.** Кабельная структура магистральной сети юга России

Предполагается, что на узле находится, по крайней мере, один кросс-коннектор или мультиплексор ввода-вывода, работающий сразу на все допустимые направления связи и имеющий среднее время наработки на отказ 10^5 ч и среднее время восстановления 6 ч [9]. Значит коэффициент готовности любого узла

$$p_{\text{vertex}} = 1 - \frac{6}{10^5} = 0.99994.$$

¹² ГОСТ Р 53111–2008. Национальный стандарт Российской Федерации. Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ; 2009. 16 с. [GOST R 53111–2008. National Standard of the Russian Federation. Stability of functioning of the public communications network. Requirements and check methods. Moscow: Standartinform; 2009. 16 p. (in Russ.).]

Коэффициент готовности p_l отдельных линий связи вычисляется для волоконно-оптических систем передачи на основе протяженности, рассчитываемой по географическим координатам городов, между которыми развернута данная линия связи.

Рассчитанные параметры линий связи на основе (1) приведены в табл. 1.

Рассмотрены все типы защищаемых участков для механизмов защитного переключения для одного защищаемого и одного резервного участков (схемы 1 + 1 или 1 : 1). Результаты расчетов, полученные путем компьютерного моделирования в соответствии с методом многопеременной инверсии [15], приведены в табл. 2.

Таблица 2. Параметры надежности сети без резервирования и с защитным переключением

Участок	Коэффициент готовности
линия	0.99966
узел	0.99984
сегмент	0.99284
маршрут	0.99981
кольцо	0.99985
p -цикл	0.99986
без резервирования	0.99266

Использование механизмов защитного переключения для случая одного требуемого маршрута передачи (табл. 2) демонстрирует существенный рост надежности, за исключением применения защитного переключения на сегментах. Это связано, прежде всего, с особенностями топологии рассматриваемой сети. Так, наиболее надежный маршрут 1–4–6–9–12 содержит три резервируемых участка 1–4–6, 4–6–9 и 6–9–12, каждый из которых имеет резервирующий

путь, пересекающийся с резервирующими путями соседних участков, что значительно снижает защитные свойства.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложенный метод анализа надежности телекоммуникационных сетей, поддерживающих механизмы защитного переключения, использует разбиение элементов основного и резервного маршрутов на три группы, первая из которых включает постоянные неизменяемые части путей, вторая – резервируемые, а третья – резервирующие участки. Подобное представление позволяет учесть эффекты дублирования элементов в различных маршрутах и, как следствие, устранить погрешности оценки коэффициента готовности относительно методов, использующих допущение о независимости путей передачи информации.

На примере магистральной сети путем компьютерного моделирования показано, что использование

механизмов защитного переключения для случая одного требуемого маршрута передачи демонстрирует существенный рост надежности, за исключением применения защитного переключения на сегментах, что связано, прежде всего, с особенностями топологии рассматриваемой сети, не позволяющей сформировать полностью независимые от других путей сегменты.

Вклад авторов

К.А. Батенков – идея исследования, консультации по вопросам проведения всех этапов исследования.

А.Б. Фокин – разработка подхода к анализу структурной надежности сетей связи с механизмами защитного переключения, проведение компьютерного моделирования.

Authors' contributions

K.A. Batenkov – the idea of the study, consultations on conducting all stages of the study.

A.B. Fokin – developing the approach to the analysis of the structural reliability of communication networks with protective switching mechanisms, computer modeling.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нетес В.А. Соглашение об уровне обслуживания и надежность. *Надежность*. 2017;17(4):27–30. <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-4-27-30>
2. Батенков К.А., Батенков А.А. Анализ и синтез структур сетей связи по детерминированным показателям устойчивости. *Труды СПИИРАН*. 2018;3(58):128–159. <https://doi.org/10.15622/sp.58.6>
3. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Вероятность связности телекоммуникационной сети на основе приведения нескольких событий несвязности к объединению независимых событий. *Информационно-управляющие системы*. 2021;6(115):53–63. <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-53-63>
4. Нетес В.А. Виртуализация, облачные услуги и надежность. *Вестник связи*. 2016;8:7–9.
5. Батенков К.А. Точные и граничные оценки вероятностей связности сетей связи на основе метода полного перебора типовых состояний. *Труды СПИИРАН*. 2019;18(5):1093–1118. <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118>
6. Анфёров М.А. Алгоритм поиска подкритических путей на сетевых графиках. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):60–69. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-60-69>
7. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Формирование сечений телекоммуникационных сетей для анализа их устойчивости с различными мерами связности. *Информатика и автоматизация*. 2021;20(2):371–406. <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.5>
8. Wosinska L., Chen J., Larsen C.P. Fiber Access Networks: Reliability Analysis and Swedish Broadband Market. *IEICE Trans. Commun.* 2009;E92–B(10):3006–3014. <https://doi.org/10.1587/transcom.E92.B.3006>
9. Vasseur J.-P., Pickavet M., Demeester P. *Network Recovery. Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS*. San Francisco, CA: Elsevier; 2004. 542 p.
10. Lashgari M., Tonini F., Capacchione M., Woosinka L., Rigamonti G., Monti P. Techno-economics of Fiber vs. Microwave for Mobile Ntransport Network Deployments. *J. Opt. Comm. and Netw.* 2023;15(7):C74–C87. <https://doi.org/10.1364/JOCN.482865>
11. Yusuf M.N., Bakar K.b.A., Isyaku B., Saheed A.L. Review of Path Selection Algorithms with Link Quality and Critical Switch Aware for Heterogeneous Traffic in SDN. *Int. J. Electr. Computer Eng. Syst.* 2023;14(3):345–370. <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.3.12>
12. Isyaku B., Bakar K.B.A., Nagmeldin W., Abdelmaboud A., Saeed F., Ghaleb F.A. Reliable Failure Restoration with Bayesian Congestion Aware for Software Defined Networks. *CSSE*. 2023;46(3):3729–3748. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.034509>
13. Bosisio A., Berizzi A., Lupis D., Morotti A., Iannarelli G., Greco B. A Tabu-search-based Algorithm for Distribution Network Restoration to Improve Reliability and Resiliency. *J. Modern Power Systems and Clean Energy*. 2023;11(1):302–311. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000150>
14. Сергеева Т.П., Тетёкин Н.Н. Методы повышения надежности в сетях SDN. *T-Comm*. 2014;6:53–55.
15. Батенков А.А., Батенков К.А., Фокин А.Б. Анализ вероятности связности телекоммуникационной сети на основе инверсий ее состояний. *Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика*. 2022;59:91–98. <https://doi.org/10.17223/19988605/59/10>

REFERENCES

1. Netes V.A. Service level agreement and dependability. *Nadezhnost' = Dependability*. 2017;17(4):27–30 (in Russ.). <http://doi.org/10.21683/1729-2646-2017-17-4-27-30>
2. Batenkov K.A., Batenkov A.A. Analysis and synthesis of communication network structures by deterministic stability indicators. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2018;3(58):128–159 (in Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.58.6>
3. Batenkov A.A., Batenkov K.A., Fokin A.B. Analysis of the probability of connectivity of a telecommunications network based on the reduction of several non-connectivity events to a union of independent events. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy = Information and Control Systems*. 2021;6(115):53–63 (in Russ.). <https://doi.org/10.31799/1684-8853-2021-6-53-63>
4. Netes V.A. Virtualization, cloud services and reliability. *Vestnik svyazi = Vestnik Communications*. 2016;8:7–9 (in Russ.).
5. Batenkov K.A. Accurate and Boundary Estimate of Communication Network Connectivity Probability Based on Model State Complete Enumeration Method. *Trudy SPIIRAN = SPIIRAS Proceedings*. 2019;18(5):1093–1118 (in Russ.). <https://doi.org/10.15622/sp.2019.18.5.1093-1118>
6. Anfyorov M.A. Algorithm for finding subcritical paths on network diagrams. *Russ. Technol. J.* 2023;11(1):60–69 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2023-11-1-60-69>
7. Batenkov A.A., Batenkov K.A., Fokin A.B. Forming the telecommunication networks' cross-sections to analyze the latter stability with different connectivity measures. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*. 2021;20(2):371–406 (in Russ.). <https://doi.org/10.15622/ia.2021.20.2.5>
8. Wosinska L., Chen J., Larsen C.P. Fiber Access Networks: Reliability Analysis and Swedish Broadband Market. *IEICE Trans. Commun.* 2009;E92–B(10):3006–3014. <https://doi.org/10.1587/transcom.E92.B.3006>
9. Vasseur J.-P., Pickavet M., Demeester P. *Network Recovery. Protection and Restoration of Optical, SONET-SDH, IP, and MPLS*. San Francisco, CA: Elsevier; 2004. 542 p.
10. Lashgari M., Tonini F., Capacchione M., Woosinka L., Rigamonti G., Monti P. Techno-economics of Fiber vs. Microwave for Mobile Ntransport Network Deployments. *J. Opt. Comm. and Netw.* 2023;15(7):C74–C87. <https://doi.org/10.1364/JOCN.482865>
11. Yusuf M.N., Bakar K.b.A., Isyaku B., Saheed A.L. Review of Path Selection Algorithms with Link Quality and Critical Switch Aware for Heterogeneous Traffic in SDN. *Int. J. Electr. Computer Eng. Syst.* 2023;14(3):345–370. <https://doi.org/10.32985/ijeces.14.3.12>
12. Isyaku B., Bakar K.B.A., Nagmeldin W., Abdelmaboud A., Saeed F., Ghaleb F.A. Reliable Failure Restoration with Bayesian Congestion Aware for Software Defined Networks. *CSSE*. 2023;46(3):3729–3748. <https://doi.org/10.32604/csse.2023.034509>
13. Bosisio A., Berizzi A., Lupis D., Morotti A., Iannarelli G., Greco B. A Tabu-search-based Algorithm for Distribution Network Restoration to Improve Reliability and Resiliency. *J. Modern Power Systems and Clean Energy*. 2023;11(1):302–311. <https://doi.org/10.35833/MPCE.2022.000150>
14. Sergeeva T.P., Tetekin N.N. Reliability Enhancemrnt Methods for SDN Networks. *T-Comm*. 2014;6:53–55 (in Russ.).
15. Batenkov A.A., Batenkov K.A., Fokin A.B. Network connectivity probability analysis based on its states inversion. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naja tehnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*. 2022;59:91–98 (in Russ.). <https://doi.org/10.17223/19988605/59/10>

Об авторах

Батенков Кирилл Александрович, д.т.н., доцент, профессор кафедры прикладной математики, Институт информационных технологий ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78). E-mail: pustur@yandex.ru. Scopus Author ID 35777325300, SPIN-код РИНЦ 8570-6327, <https://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

Фокин Александр Борисович, сотрудник, ФГКБОУ ВО «Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации» (302015, Россия, Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35). E-mail: tatarin57ru@mail.ru. Scopus Author ID 57218934996, SPIN-код РИНЦ 7727-1166, <https://orcid.org/0000-0002-2187-7325>

About the authors

Kirill A. Batenkov, Dr. Sci. (Eng.), Docent, Professor, Department of Applied Mathematics, Institute of Information Technologies, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow, 119454 Russia). E-mail: pustur@yandex.ru. Scopus Author ID 35777325300, RSCI SPIN-code 8570-6327, <https://orcid.org/0000-0001-6083-1242>

Aleksandr B. Fokin, Employee, Russian Federation Security Guard Service Federal Academy (FSO Academy of Russia) (35, Priborostroitelnaya ul., Orel, 302015 Russia). Email: tatarin57ru@mail.ru. Scopus Author ID 57218934996, RSCI SPIN-code 7727-1166, <https://orcid.org/0000-0002-2187-7325>