

УДК 621.394

АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МУЛЬТИСЕРВИСНОЙ СЕТИ ПРИ ОГРАНИЧЕННОЙ НАДЕЖНОСТИ ЛИНИЙ СВЯЗИ

В.И. Мейкшан*Сибирский государственный университет телекоммуникаций
и информатики (СибГУТИ)*

Актуальность статьи обусловлена тем, что качество услуг, которые обеспечивают современные мультисервисные сети связи, существенным образом зависит от надежности линий связи и других элементов телекоммуникационной инфраструктуры. Как следствие, требования к надежности (чаще всего в виде коэффициента простоя) фигурируют в соглашениях об уровне обслуживания (SLA), которые в настоящее время становятся весьма популярной формой регулирования рыночных отношений в сфере инфокоммуникаций, а также эффективным инструментом контроля качества предоставляемых услуг. В этих условиях операторам связи рекомендуют постоянно проводить оценку своих возможностей с точки зрения реального качества предлагаемых услуг. С учетом указанных обстоятельств цель статьи заключается в разработке теоретических средств анализа качества функционирования мультисервисной телекоммуникационной сети на этапе установления виртуального соединения. Предложена математическая модель для приближенной оценки вероятности блокировки поступающих вызовов из-за недостаточности канальных ресурсов, требуемых для предоставления услуги, совместно с учетом влияния отказов на линиях связи. При этом рассмотрена возможность объединения соответствующих положений теории надежности и теории телетрафика в общую унифицированную модель. Единое вероятностное описание случайных процессов, происходящих при обслуживании трафика линиями связи с ограниченной надежностью, приводит к более эффективному алгоритму с точки зрения его вычислительной сложности.

Ключевые слова: мультисервисные сети связи, вероятность блокировки вызова, надежность линий связи, математическая модель.

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-1-18-30

Введение

Развитие современных мультисервисных сетей связи (МСС) открывает перед абонентами множество разнообразных инфокоммуникационных услуг. При этом важно оценивать основную характеристику качества функционирования (КФ) сети на этапе установления виртуального соединения – вероятность блокировки поступившего вызова, т. е. вероятность того, что вызов получит отказ в обслуживании из-за отсутствия возможности предоставить ему сквозное соединение, обладающее требуемой пропускной способностью на каждом из участков маршрута, по которому проходит соединение.

Важно также понимать, что качество существенным образом зависит от надежности элементов телекоммуникационной инфраструктуры, т.к. из-за сбоев в работе оборудования возникают задержки и потери пакетов данных, случаются обрывы соединений и наблюдается снижение пропускной способности линий связи. Следовательно, при низком уровне надежности сетевых элементов вообще нет смысла говорить о соблюдении требований к качеству. В такой ситуации только системный подход позволяет создать устойчивую и надежную инфраструктуру, способную обеспечивать высокое качество услуг даже в сложных условиях эксплуатации оборудования с ограниченной надежностью.

К важным документам, которые регламентируют вопросы планирования надежности сетей связи, относится Рекомендация МСЭ-Т E.862 [1]. Этот документ, разработанный с учетом современных требований к качеству услуг связи и конкуренции на рынке телекоммуникаций, принимает во внимание взаимосвязь между надежностью и экономическими факторами. Такая взаимосвязь непосредственно проявляется в виде прямых финансовых потерь, которые обусловлены тем, что простои сетевых элементов снижают доходы оператора связи от предоставления услуг связи. Кроме того, в настоящее время наблюдается растущая зависимость экономической эффективности бизнес-процессов от качества инфокоммуникационных услуг, задействованных в этих процессах. Снижение надежности грозит операторам сетей связи введением штрафных санкций, возможной потерей недовольных клиентов, а также падением привлекательности оператора в глазах потенциальных клиентов [2, 3].

В современных условиях соглашение об уровне обслуживания (Service Level Agreement – SLA) становится довольно распространенной формой регулирования взаимоотношений между абонентом и оператором связи, а также эффективным инструментом контроля качества предоставляемых услуг. При этом центральную часть любого SLA составляют показатели качества и надежности вместе с нормативами для них [4].

Общая схема алгоритма для выбора численных значений нормативов уровня обслуживания с целью их включения в SLA представлена в [5]. Одновременно с этим в [6] подчеркивается, что провайдер (поставщик) должен тщательно проанализировать свои возможности с точки зрения реального качества предоставляемых услуг. Учитывая достаточно высокий уровень надежности современного телекоммуникационного оборудования и сравнительно редкие ситуации возникновения отказов, которые приводят к серьезным нарушениям в работе сети, сделать это экспериментально с помощью сбора и обработки статистических данных бывает затруднительно.

В такой ситуации актуальными становятся математические модели, позволяющие оценить отказоустойчивость сети связи и дать прогноз степени ухудшения качества обслуживания при различных сценариях отказов оборудования, что крайне важно для бесперебойной работы критически важных сервисов. Эти модели помогают оптимизировать распределение ресурсов и тем самым предотвращать потенциальные сбои до их возникновения. Одна из подобных моделей будет рассмотрена в данной статье.

1. Principium fundamentale (исходные предпосылки)

Чтобы оценить эффективность работы телекоммуникационной сети, состоящей из ненадежных элементов, возникает необходимость вероятностного описания объекта, который находится под воздействием случайных факторов двух категорий: потоки отказов и восстановлений ее элементов; потоки поступающей нагрузки. Соответствующее поведение сети принято моделировать с помощью двух случайных процессов – процесса отказов и восстановлений (ПОВ) и процесса обслуживания нагрузки (ПОН). Подобная методология хорошо известна по решению аналогичных задач в области сложных технических систем [7, гл. 8], и она также нашла достаточно широкое применение для исследования сетей связи в условиях отказов оборудования [8–10].

Статистические свойства ПОВ зависят от параметров надежности элементов сети и общей стратегии технического обслуживания. Из этих соображений вполне естественно соответствующие случайные события рассматривать на самом низком, физическом уровне. Сеть передачи (первичная сеть) как физическая основа любой сети состоит из линий связи, образующих сеть типовых линейных трактов и каналов передачи, а также сетевых узлов для организации прямых (сквозных) каналов. Взаимосвязи этих элементов, изображаемые в виде графа, вместе с соответствующими характеристиками составляют *физическое описание сети*.

Способы использования указанных физических ресурсов сети для передачи требуемых объемов трафика зависят от структуры и алгоритма функционирования вторичной сети. Все данные, необходимые для определения вероятностных характеристик ПОН, относятся к абстрактному, *логическому описанию сети* как системы массового обслуживания. Топологическая структура сети на этом уровне также задается в виде графа, вершины которого соответствуют транзитным узлам коммутации и конечным станциям вторичной сети, а ребра – пучкам прямых (некоммутируемых) каналов между пунктами (узлами и станциями) сети.

Пусть рассматриваемая первичная сеть включает в себя некоторое множество E физических элементов. Каждое техническое (функциональное) состояние s_ε этой сети однозначно описывается определенной комбинацией ε работоспособных и отказавших элементов, образующих соответственно подмножества E_ε и E'_ε , $E_\varepsilon \cup E'_\varepsilon = E$. Состояние s_0 означает полную работоспособность сети, т. е. $E_0 = E$, $E'_0 = \emptyset$. Множество всех возможных комбинаций ε и соответствующих им состояний s_ε обозначим как Ω .

При известных интенсивностях отказов (ω_k) и восстановлений (μ_k) отдельных элементов сети вероятность того, что в стационарных условиях некоторый элемент $e_k \in E$ является работоспособным в произвольный момент времени, равна $u_k = \mu_k / (\omega_k + \mu_k)$. Отсюда, если отказы отдельных элементов считать независимыми между собой, можем определить установившуюся вероятность любого из состояний $s_\varepsilon \in \Omega$:

$$W_\varepsilon = \prod_{e_k \in E_\varepsilon} u_k \prod_{e_k \in E'_\varepsilon} (1 - u_k). \quad (1)$$

Отдельному состоянию s_ϵ соответствует определенный уровень $\Phi(s_\epsilon)$ качества функционирования сети, который оценивает ее способность обслуживать поступающие потоки трафика при соответствующих состояниях сетевых элементов. Задача определения вероятности блокировки поступающих вызовов (π_ϵ) в каждом из состояний s_ϵ может быть решена на основе анализа ПОН для мультисервисных сетей [11–13].

Взаимосвязь между ПОВ и ПОН основана на приближенном предположении, что после перехода в любое состояние s_ϵ сеть остается в нем достаточно продолжительное время, чтобы ПОН успел достичь своего стационарного режима. Другими словами, по своей динамике ПОВ предполагается гораздо более медленным, чем ПОН, что соответствует действительности, поскольку интенсивность событий для ПОН (поступление вызовов, освобождение каналов) существенно выше интенсивности возникновения повреждений и их устранения. Как следствие, соответствующие перераспределения потоков нагрузки и переходный режим ПОН завершаются гораздо раньше, чем следующий переход для ПОВ.

Исходя из сформулированных предположений, π_ϵ можно рассматривать как дискретную случайную величину, которая характеризуется распределением вероятностей (1). Поэтому среднее значение вероятности потери вызова с учетом всех возможных состояний сети, обусловленных различными отказами оборудования, равна

$$\bar{\pi}_n = \sum_{s_\epsilon \in S} W_\epsilon \pi_\epsilon. \quad (2)$$

Соотношение (2) дает одну из основных характеристик КФ телекоммуникационной сети в целом. При этом учитывается как ограниченный объем ресурсов сети (с чем связаны потери поступающих вызовов), так и ограниченная надежность оборудования.

Рассмотренная процедура формирования вероятностной модели сети связи с ненадежными элементами имеет весьма существенную трудоемкость вычислений, что обусловлено необходимостью анализа значительного числа технических (функциональных) состояний, возникающих при отказах различных элементов исследуемой сети. В случае крупномасштабных сетей это обстоятельство становится критическим препятствием, которое существенно ограничивает возможности практического применения данного подхода при проектировании реальных телекоммуникационных систем и требует разработки альтернативных методов моделирования, позволяющих снизить вычислительную сложность решаемой задачи.

В отличие от изложенной концепции в настоящей статье рассматривается возможность объединения аспектов надежности и инженерии трафика (traffic engineering) в общую унифицированную модель [14]. Такое объединение можно аргументировать тем, что для абонента, который сделал вызов и получил отказ в обслуживании, конкретная причина потери вызова особого значения не имеет. Совместный учет надежности линий связи и трафика, обслуживаемого этими линиями, в рамках единого вероятностного описания происходящих случайных процессов приводит к более эффективному алгоритму с точки зрения его вычислительной сложности.

2. Формальное описание исследуемого объекта

Допустим, что мультисервисная сеть состоит из некоторого количества узлов коммутации пакетов (маршрутизаторов), соединенных между собой цифровыми линиями (ЦЛ). Предполагается, что в сети предусмотрено L таких линий, пронумерованных в произвольном порядке, и ЦЛ с номером l обеспечивает передачу цифрового потока с максимальной скоростью C_l ($l = \overline{1, L}$). По сети передаются N информационных потоков (ИП), причем ИП $_k$ ($k = \overline{1, N}$) имеет следующие исходные характеристики: λ_k – интенсивность поступления заявок на доставку сообщений; h_k – среднее время удерживания выделенной полосы в течение одного сеанса связи; R_k – маршрут следования пакетов от источника к пункту назначения (задается последовательностью номеров ЦЛ, входящих в состав маршрута); S_k – требуемая скорость передачи данных (одинаковая по всему маршруту доставки пакетов).

В соответствии с известными подходами к анализу мультисервисных сетей [11–13] пропускную способность элементов сети, а также потребности в ресурсах для доставки ИП часто выражают, используя так называемую базовую передаточную единицу (Basic Bandwidth Unit – BBU). Скорость передачи, которая соответствует одной BBU, определяется следующим образом:

$$\alpha = \text{НОД}(C_1, \dots, C_L, S_1, \dots, S_N).$$

Применение этой условной единицы измерения позволяет получить целочисленное представление для скорости передачи l -й ЦЛ: $V_l = C_l / \alpha$ при $l = \overline{1, L}$. В результате для каждой ЦЛ высокоскоростная среда, по которой поочередно в режиме статистического мультиплексирования передаются пакеты для разных ИП, формально разделяется на условные единицы рассматриваемого ресурса, предоставляемого отдельным заявкам на время сеанса связи. В частности, для заявки k -го потока ($k = \overline{1, N}$) одновременно потребуется $b_k = S_k / \alpha$ единиц ресурса среды передачи.

Поступившая заявка k -го потока принимается к обслуживанию только в случае, если каждая ЦЛ в составе маршрута R_k имеет свободную полосу передачи размером не менее b_k единиц. Если в момент поступления заявки маршрут не обладает требуемым объемом ресурсов, находящихся в свободном состоянии, то заявка получает отказ в обслуживании. С учетом этого условия качество обслуживания заявок на этапе установления соединения может оцениваться средней долей отказов в предоставлении требуемой полосы передачи.

3. Метод просеянной нагрузки

Как известно [11–13], строгие методы анализа мультисервисных сетей с использованием теоретического аппарата марковских процессов приводят к трудоемким вычислительным задачам. К настоящему времени

эффективные комбинаторные алгоритмы рекуррентных расчетов вероятностей блокировки заявок на доставку информации разработаны только для мультисервисных сетей с древовидной топологией [13]. По этой причине особую важность представляют приближенные математические модели, которые позволяют преодолеть многие сложности вычислительного характера, возникающие при исследованиях реальных сетей с произвольной топологией. В частности, для приближенной оценки сквозной вероятности блокировки по отношению к конечным пунктам мультисервисной сети [15] широкое применение находит метод просеянной нагрузки (Reduced Load Approximation – RLA).

Основная идея метода RLA заключается в том, что при определении величины нагрузки, поступающей на некоторый участок многозвенного маршрута, учитывается эффект «просеивания» потока вызовов за счет потерь заявок по причинам, связанным с другими участками этого маршрута. К примеру, если ЦЛ с номером l входит в состав маршрута R_k (т. е. $l \in R_k$), то заявки k -го потока, обслуживаемые с использованием этой ЦЛ, просеиваются с коэффициентом

$$\beta_{lk} = \prod_{\substack{j \in R_k \\ j \neq l}} (1 - p_{jk}), \quad (3)$$

где p_{jk} – вероятность того, в произвольный момент времени j -я ЦЛ не располагает достаточными ресурсами для предоставления обслуживания поступившему вызову k -го потока (т. е. свободная полоса пропускания имеет размер менее b_k базовых передаточных единиц). Здесь приближенно предполагается, что для разных участков сети случайные события блокировки поступившего вызова независимы.

Совокупность (множество номеров) ИП, для которых j -я ЦЛ входит в состав маршрутов доставки пакетов, обозначим через H_j . Процесс обслуживания мультисервисной нагрузки, создаваемой этими потоками, можно описать многомерным марковским процессом, для которого укрупненные макросостояния характеризуются общим объемом (n) занятых канальных ресурсов рассматриваемой ЦЛ [11–13]. Вычисление вероятностей этих макросостояний целесообразно осуществлять с помощью следующих рекуррентных соотношений:

$$\left. \begin{aligned} w_j^*(0) &= 1; \\ w_j^*(n) &= \frac{1}{n} \sum_{k \in H_j} \beta_{jk} \lambda_k h_k b_k w_j^*(n - b_k); \quad n = \overline{1, V_j}; \\ w_j(n) &= w_j^*(n) / \sum_{s=0}^{V_j} w_j^*(s); \quad n = \overline{0, V_j}. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

После этого легко определить вероятность того, что j -я линия связи не располагает свободными ресурсами пропускной способности, достаточными для участия в обслуживании поступившего вызова, который принадлежит входному потоку ИП $_k$:

$$p_{jk} = \sum_{n=V_j-b_k+1}^{V_j} w_j(n) = 1 - \sum_{n=0}^{V_j-b_k} w_j(n). \quad (5)$$

Рассмотренные соотношения (3)–(5) образуют систему нелинейных алгебраических уравнений относительно неизвестных β_{jk} , $w_j(n)$ и p_{jk} . Теоретически доказано [16], что такая система имеет единственное решение, и оно может быть найдено с помощью итерационной процедуры (методом подстановки). После этого приближенно вычисляется вероятность того, что заявка k -го потока получит отказ в обслуживании:

$$\pi_k \approx 1 - \prod_{j \in R_k} (1 - p_{jk}). \quad (6)$$

Процедура вычислений для получения характеристик качества обслуживания вызовов (КОВ) исследуемой мультисервисной сети включает в себя следующую последовательность действий.

Шаг 1. Задать начальные значения вероятности блокировки вызовов разных классов на отдельных участках сети (можно взять $p_{jk} = 0$ при всех $j = \overline{1, L}$ и $k \in H_j$).

Шаг 2. С помощью соотношения (3) найти коэффициенты просеивания ИП для каждого участка сети.

Шаг 3. По формулам (4) для каждого участка сети провести расчет распределения вероятностей макросостояний, которые характеризуются общим объемом занятых канальных ресурсов.

Шаг 4. По формуле (5) найти уточненные значения вероятности блокировки вызовов разных классов на отдельных участках сети (p_{jk} при всех $j = \overline{1, L}$ и $k \in H_j$).

Шаг 5. Циклически повторять шаги 2–4 до получения стабильных значений неизвестных величин p_{jk} .

Шаг 6. По формуле (6) вычислить вероятность блокировки для каждого класса вызовов по отношению к конечным пунктам мультисервисной сети.

Общие вопросы сходимости подобных итерационных процедур, широко используемых при оценке вероятности блокировки поступающих вызовов для МСС, изложены в [13, 15], там же обсуждаются различные варианты формальных критериев останова итерационного процесса.

4. Учет ограниченной надежности линий связи

Сделаем дополнительное предположение, что цифровые линии в рассматриваемой МСС не обладают идеальной надежностью. В качестве показателя, который характеризует надежность ЦЛ с номером j , будем использовать коэффициент простоя D_j , т. е. вероятность неработоспособного состояния ЦЛ в произвольный момент времени.

В неработоспособном состоянии ЦЛ все ее каналные ресурсы недоступны для поступающих вызовов, поэтому для случая неидеальной надежности средств передачи данных по линиям связи формула (3) приобретает более общий вид:

$$\beta_{lk} = \prod_{\substack{j \in R_k \\ j \neq l}} (1 - p_{jk})(1 - D_j). \quad (7)$$

Здесь предполагается, что процессы обслуживания поступающих вызовов никак не влияют на надежность средств связи.

Важно отметить, что занятые каналные ресурсы, которые уже предоставлены для обслуживания ранее поступивших вызовов, и неработоспособные каналные ресурсы, которые заблокированы на время восстановления, проявляют себя абсолютно одинаково с точки зрения очередного вызова. Указанное обстоятельство позволяет записать соотношение (7), и благодаря этому коэффициент простоя D_j ($j = \overline{1, L}$), относящийся к комплексному показателю надежности линий связи, удастся достаточно просто интегрировать в вероятностное описание процесса функционирования МСС при ограниченной надежности линий связи. Как следствие, существенно снижаются сложность математической модели и трудоемкость соответствующих вычислений, необходимых при проведении количественного анализа.

5. Численные результаты

Для проверки обоснованности исходных предпосылок, положенных в основу используемой математической модели, были проведены контрольные расчеты на примере мультисервисной сети, топология которой показана на рис. 1. Ранее эта сеть исследовалась в работах [17, 18] без учета влияния отказов линий связи.

Пропускная способность отдельных звеньев этой сети выражается количеством ВВУ и характеризуется следующими значениями: $V_1 = 31$, $V_2 = 43$, $V_3 = 41$, $V_4 = 54$, $V_5 = 43$, $V_6 = 42$. Табл. 1 содержит данные о параметрах поступающих информационных потоков между конечными пунктами сети (ИП $_k$; $k = \overline{1, 5}$): интенсивность поступающей нагрузки (в пересчете на занятие единичной полосы пропускания, т. е. $A_k = \lambda_k h_k$) и потребности в скорости передачи (количество базовых передаточных единиц – ВВУ). Для транспортировки информационных потоков используются следующие фиксированные маршруты: $R_1 = \{1, 2\}$, $R_2 = \{5, 6\}$, $R_3 = \{2, 3\}$, $R_4 = \{4, 5\}$, $R_5 = \{3, 4, 6\}$.

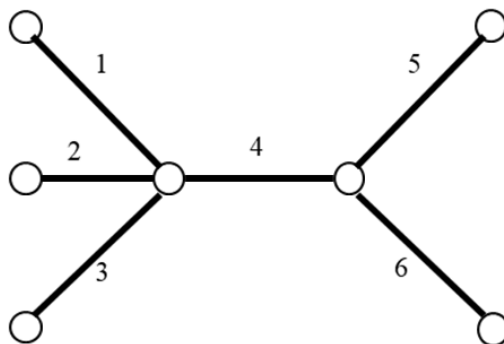


Рис. 1 – Топология мультисервисной сети связи

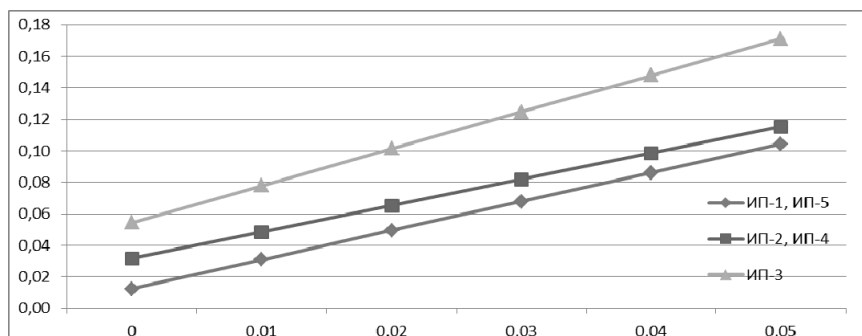
Fig. 1 – Topology of a multiservice telecommunications network

Таблица 1 / Table 1

Параметры поступающих информационных потоков
Parameters of incoming information flows

Номер ИП (k)	1	2	3	4	5
Интенсивность поступающей нагрузки (A_k , Эрл)	20	5	5	10	10
Количество ВВU (b_k)	1	2	3	2	1

Расчеты вероятности блокировки поступающих вызовов (π_k ; $k = \overline{1,5}$) проводились в предположении, что все линии связи имеют одинаковую надежность. На рис. 2 представлены графические зависимости $\pi_k = f(D)$ ($k = \overline{1,5}$), полученные для разных значений коэффициента простоя D .

Рис. 2 – Зависимости $\pi_k = f(D)$ при $k = \overline{1,5}$ Fig. 2 – Dependencies $\pi_k = f(D)$ at $k = \overline{1,5}$

Суммарная величина трафика, который создается поступающими запросами на передачу сообщений для всех ИП, составляет $A_{tot} = \sum_{k=1}^5 A_k b_k = 75$ Эрл. Качество обслуживания этих запросов на этапе

установления виртуального соединения оценивается усредненной вероятностью потери поступившего запроса из-за отсутствия возможности предоставить требуемые каналные ресурсы – $\bar{\pi}$. При усреднении должен учитываться удельный вес $(A_k b_k / A_{tot})$ каждого ИП ($k = \overline{1,5}$), поэтому

$$\bar{\pi} = \sum_{k=1}^5 \frac{A_k b_k}{A_{tot}} \pi_k.$$

Результаты расчета вероятности $\bar{\pi}$ в зависимости от коэффициента простоя линии связи (D) приведены в табл. 2.

Регрессионный анализ этих данных позволяет выявить наличие следующей линейной зависимости: $\bar{\pi} = 1,8688 \times D + 0,0292$. Значение коэффициента регрессии $b_1 = 1,8688$ свидетельствует о том, что надежность линий связи оказывает существенное влияние на качество функционирования исследуемой МСС: при увеличении коэффициента простоя (D) на одну условную единицу, равную 0,01, увеличение вероятности потерь вызовов будет почти в 2 раза больше – на 0,018688.

Таблица 2 / Table 2

Средняя вероятность потери поступившего вызова ($\bar{\pi}$) в зависимости от коэффициента простоя линии связи (D)

The average call loss probability ($\bar{\pi}$) depending on the network link unavailability (D)

D	0	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
$\bar{\pi}$	0,0291	0,0479	0,0666	0,0853	0,1040	0,1226

Заключение

В результате проведенного исследования продемонстрирована возможность аналитической оценки качества обслуживания вызовов для МСС в условиях ограниченной надежности линий связи. Получаемые численные результаты позволяют оценить соответствие анализируемой МСС заданным требованиям по уровню блокировки поступающих вызовов. Предложенная методика основана на численном решении системы нелинейных алгебраических уравнений, описывающих процесс распределения ресурсов сети между неоднородными информационными потоками. Для практической реализации этой методики разработаны соответствующие программные средства, которые использовались при проведении контрольных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. ITU-T Recommendation E.862 (06/92). Dependability Planning of Telecommunication Networks.
2. **Нетес В.А.** Надежность сетей связи в период перехода к NGN // Вестник связи. – 2007. – № 9. – С. 126–130.
3. **Ефимушкин В.А., Ледовских Т.В.** Качество услуг связи: задачи национальной стандартизации // T-Comm: Телекоммуникации и транспорт. – 2008. – № 5. – С. 39–44.

4. **Нетес В.А.** О показателях надежности и качества в телекоммуникациях // *Электросвязь*. – 2022. – № 11. – С. 41–45.
5. **Нетес В.А.** Соглашения об уровне обслуживания: стандарты и реалии // *Вестник связи*. – 2003. – № 8. – С. 72–79.
6. **Нетес В.А.** Что нужно для успешного применения SLA // *T-Comm: Телекоммуникации и транспорт*. – 2015. – Т. 9, № 7. – С. 16–20.
7. *Надежность технических систем: справочник* / под ред. И.А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
8. **Мейкшан В.И.** К вопросу оценки качества функционирования и надежности сетей связи по критериям сохранения эффективности // *Системное моделирование*. 16: сборник научных трудов. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1990. – С. 35–48.
9. **Зарецкий К.А., Мейкшан В.И., Меленцова Н.А.** Повышение качества функционирования сети электросвязи при оптимальном распределении ресурсов // *Электросвязь*. – 2001. – № 3. – С. 34–38.
10. **Мейкшан В.И., Буров П.Н.** Анализ систем распределения информации с ненадежными элементами: монография. – Новосибирск: Наука, 2008. – 304 с.
11. **Степанов С.Н.** Основы телетрафика мультисервисных сетей. – М.: Экотрендз, 2010. – 392 с.
12. **Степанов С.Н.** Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. – М.: Горячая линия – Телеком, 2015. – 867 с.
13. **Ross K.W.** Multiservice loss models for broadband telecommunications networks. – London: Springer, 1995. – 343 p.
14. **Faragó A.** Towards the integration of reliability and traffic engineering // *Proceedings of the 2006 International Conference on Communications in Computing (CIC 2006)*, Las Vegas, Nevada, USA. – CSREA Press, 2006. – P. 28–34.
15. **Chung S.-P., Ross K.W.** Reduced load approximations for multirate loss networks // *IEEE Transaction on Communications*. – 1993. – Vol. 41 (8). – P. 1222–1231.
16. **Kelly F.P.** Blocking probabilities in large circuit-switched networks // *Advances in Applied Probability*. – 1986. – Vol. 18 (2). – P. 473–505.
17. **Лагутин В.С., Костров В.О.** Оценка характеристик пропускной способности мультисервисных пакетных сетей при реализации технологии разделения типов нагрузки // *Электросвязь*. – 2003. – № 3. – С. 28–32.
18. **Мейкшан В.И., Столяров В.В.** Оценка показателей качества функционирования мультисервисных сетей связи при фиксированной маршрутизации // *Инфокоммуникационные технологии*. – 2006. – № 4. – С. 44–48.

ANALYSIS OF THE PERFORMANCE QUALITY OF A MULTISERVICE NETWORK UNDER LIMITED RELIABILITY OF COMMUNICATION LINES

Meikshan V.I.

*Siberian State University of Telecommunications and Information Sciences,
Novosibirsk, Russia*

The relevance of this article is due to the fact that the quality of services provided by modern multiservice communication networks significantly depends on the reliability of communication lines and other elements of the telecommunication infrastructure. Consequently, reliability requirements (usually in the form of an availability factor) are included in service level agreements (SLAs), which are currently becoming a very popular form of regulating market relations in the field of infocommunications, as well as an

effective tool for monitoring the quality of the services provided. Under these conditions, telecom operators are recommended to constantly evaluate their capabilities in terms of the actual quality of the services offered. Taking these circumstances into account, the objective of this article is to develop theoretical tools for analyzing the performance of a multiservice telecommunications network at the stage of establishing a virtual connection. A mathematical model is proposed for an approximate estimation of the probability of incoming call to be blocked due to insufficient channel resources required to provide the service, taking into account the impact of failures on communication lines. At the same time, the possibility of combining the relevant theoretical claims of the reliability theory and the teletraffic theory into a common unified model is considered. A unified probabilistic description of random processes occurring when servicing traffic by communication lines with limited reliability leads to a more efficient algorithm in terms of its computational complexity.

Keywords: multiservice telecommunication networks, call blocking probability, telecommunication links reliability, mathematical model

DOI: 10.17212/1727-2769-2026-1-18-30

REFERENCES

1. ITU-T Recommendation E.862 (06/92). *Dependability Planning of Telecommunication Networks*.
2. Netes V.A. Nadezhnost' setei svyazi v period perekhoda k NGN [Dependability of telecommunication networks during the transition to NGN]. *Vestnik svyazi*, 2007, no. 9, pp. 126–130. (In Russian).
3. Efimushkin V.A., Ledovskikh T.V. Kachestvo uslug svyazi: zadachi natsional'noi standartizatsii [Quality of telecommunication services: national standardization tasks]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2008, no. 5, pp. 39–44.
4. Netes V.A. O pokazatelyakh nadezhnosti i kachestva v telekommunikatsiyakh [On dependability and quality indicators in telecommunications]. *Elektrosvyaz*, 2022, no. 11, pp. 41–45. (In Russian).
5. Netes V.A. Soglasheniya ob urovne obsluzhivaniya: standarty i realii [Service Level Agreements: standards and realities]. *Vestnik svyazi*, 2003, no. 8, pp. 72–79. (In Russian).
6. Netes V.A. Chto nuzhno dlya uspeshnogo primeneniya SLA [What is necessary for successful application of SLA]. *T-Comm: Telekommunikatsii i transport = T-Comm: Telecommunications and Transport*, 2015, vol. 9, no. 7, pp. 16–20.
7. Ushakov I.A. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Reliability of technical systems]. Handbook. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 1985. 608 p.
8. Meikshan V.I. K voprosu otsenki kachestva funktsionirovaniya i nadezhnosti setei svyazi po kriteriyam sokhraneniya effektivnosti [On the issue of assessing the quality performance and dependability of communication networks by efficiency ratio criteria]. *Sistemnoe modelirovanie*. 16 [System modeling. 16]. Novosibirsk, VC SO AN SSSR Publ., 1990, pp. 35–48.
9. Zaretskii K.A., Meikshan V.I., Melentsova N.A. Povyshenie kachestva funktsionirovaniya seti elektrosvyazi pri optimal'nom raspredelenii resursov [Optimal resources allocation for improving a telecommunication network's performance]. *Elektrosvyaz*, 2001, no. 3, pp. 34–38. (In Russian).
10. Meikshan V.I., Burov P.N. *Analiz sistem raspredeleniya informatsii s nenadezhnymi elementami* [Analysis of information distribution systems with unreliable elements]. Novosibirsk, Nauka Publ., 2008. 304 p.
11. Stepanov S.N. *Osnovy teletrafika mul'tiservisnyh setej* [Fundamentals of teletraffic in multiservice networks]. Moscow, Eko-Trendz Publ., 2010, 392 p.

12. Stepanov S.N. *Teoriya teletrafika: kontseptsii, modeli, prilozheniya* [Teletraffic theory: concepts, models, applications]. Moscow, Goryachaya liniya – Telekom Publ., 2015. 867 p.
13. Ross K.W. *Multiservice loss models for broadband telecommunications networks*. London, Springer, 1995. 343 p.
14. Faragó A. Towards the integration of reliability and traffic engineering. *Proceedings of the 2006 International Conference on Communications in Computing (CIC 2006)*, Las Vegas, Nevada, USA. CSREA Press, 2006, pp. 28–34.
15. Chung S.-P., Ross K.W. Reduced load approximations for multirate loss networks. *IEEE Transaction on Communications*, 1993, vol. 41 (8), pp. 1222–1231.
16. Kelly F.P. Blocking probabilities in large circuit-switched networks. *Advances in Applied Probability*, 1986, vol. 18 (2), pp. 473–505.
17. Lagutin V.S., Kostrov V.O. Otsenka kharakteristik propusknoi sposobnosti mul'tiservisnykh paketnykh setei pri realizatsii tekhnologii razdeleniya tipov nagruzki [Multi-service packet networks' performance features estimation using the type division load technology]. *Elektrosvyaz*, 2003, no. 3, pp. 28–32. (In Russian).
18. Meikshan V.I., Stolyarov V.V. Otsenka pokazatelei kachestva funktsionirovaniya mul'tiservisnykh setei svyazi pri fiksirovannoi marshrutizatsii [Performance measures estimation for multiservice telecommunications networks with fixed routing]. *Infokommunikatsionnye tekhnologii*, 2006, no. 4, pp. 44–48 (In Russian).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ



Мейкшан Владимир Иванович – родился в 1949 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры автоматической электросвязи Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. Область научных интересов: качество функционирования и надежность мультисервисных сетей связи, распределенные информационные системы, управление сетями связи. Опубликовано около 100 научных работ. (Адрес: 630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86. E-mail: meikshanvi@gmail.com).

Meikshan Vladimir Ivanovich (b. 1949) – Doctor of Sciences (Eng.), Professor, professor at the Automatic Electrical Communication Department in the Siberian States University of Telecommunications and Information Sciences. His research interests are currently focused on dependability and performance of multiservice networks, distributed information systems and telecommunication networks management. He is the author of about 100 scientific papers. (Address: 86, Kirova St., Novosibirsk, 630102, Russia. E-mail: meikshanvi@gmail.com).

*Статья поступила 13 ноября 2025 г.
Received November 13, 2025*

To Reference:

Meikshan V.I. Analiz kachestva funktsionirovaniya mul'tiservisnoi seti pri ogranichennoi nadezhnosti linii svyazi [Analysis of the performance quality of a multiservice network under limited reliability of communication lines]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2026, no. 1 (70), pp. 18–30. DOI: 10.17212/1727-2769-2026-1-18-30.