

На правах рукописи

ПАЛЬЦИН ДЕНИС АНАТОЛЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА И ПРИМЕНЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ
ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ СЕТЕЙ СВЯЗИ**

Специальность 2.2.15 Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Ордена Трудового Красного Знамени Российский научно-исследовательский институт радио имени М. И. Кривошеева» (НИИР)

Научный руководитель: доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник НИИР,
Цым Александр Юрьевич

Официальные оппоненты: **Коршунов Владимир Николаевич**, доктор технических наук, главный научный сотрудник «Всероссийского научно-исследовательского проектно-конструкторского и технологического института кабельной промышленности» (ВНИИКП)

Семенов Андрей Борисович, доктор технических наук, профессор кафедры Механизации, автоматизации и роботизации строительства Национального исследовательского Московского государственного строительного университета (НИУ МГСУ)

Крук Евгений Аврамович, доктор технических наук, профессор, научный руководитель научно-исследовательского института телекоммуникаций Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Защита диссертации состоится «__» _____ 202__ г. в __:00 на заседании разового диссертационного совета РДС 2022.003 при Российском университете дружбы народов по адресу: Москва, ул. Орджоникидзе, дом 3, ауд. 208.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке Российского университета дружбы народов по адресу: 117198, Москва, ул. Миклухо-Маклая, дом 6 (отзывы на автореферат просьба направлять по указанному адресу).

Автореферат разослан «__» _____ 202__ г.

Председатель разового
диссертационного совета
доктор. физ.-мат. наук, проф.

Д. С. Кулябов

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Современный этап развития информационной инфраструктуры страны характеризуется экспоненциальным ростом трафика, ускоренным расширением номенклатуры телекоммуникационных услуг, повышением требований к качеству и надёжности передачи больших объёмов информации.

Появление новых технологий привело к неизбежному функционированию и взаимодействию в единых сетях как новых, так и существующих технических средств. При этом возникают задачи обоснованного сохранения ресурсов всех функционирующих систем, в том числе за счёт продления их срока службы с использованием заменяемых изделий и принадлежностей, а также сохранения в эксплуатации работоспособных средств, даже в случае превышения их гарантийного эксплуатационного срока.

Решение этих задач создаёт предпосылки обеспечения функциональной устойчивости сетей связи, как в процессе модернизации, так и при текущей эксплуатации. Одной из задач является определение пригодности волоконно-оптических кабелей после окончания назначенного при изготовлении срока службы. Актуальность этой задачи связана со значительной протяжённостью линий связи на основе оптического волокна.

Объектом исследования является магистральная волоконно-оптическая сеть связи. **Предметом исследования** являются методы повышения функциональной устойчивости магистральной волоконно-оптической сети связи.

С учётом решаемых в диссертации задач тема исследований представляется своевременной и актуальной.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование соответствует следующим разделам паспорта научной специальности 2.2.15 «Системы, сети и устройства телекоммуникаций», а именно: **пункту 2** «Исследование новых технических, технологических и программных решений, позволяющих повысить эффективность развития цифровых сетей, систем и устройств телекоммуникаций»; **пункту 4** «Разработка эффективных путей развития и совершенствования структуры, архитектуры сетей и систем телекоммуникаций, включая входящие в них элементы» и **пункту 18** «Разработка научно-технических основ технологии создания сетей, систем и устройств телекоммуникаций и обеспечения их эффективного функционирования».

Степень разработанности темы исследования. Проблематика развития информационной инфраструктуры нашла отражение во многих работах отечественных и зарубежных учёных. В работах А.Е. Кучерявого, Б.С. Гольдштейна, Н.А. Соколова, В.А. Нетеса, В.А. Андреева, В.А. Бурдина, И.Г. Бакланова, А.Ю. Цыма рассмотрены вопросы теории инфокоммуникаций и перспективные технологии сетей связи.

Значительный вклад в стандартизацию инновационных технологий внесли Г.С. Глеземанн, Лянь Дин, И. Контава, Су-Ван Чунг, К.Б. Оттерштедт, Ф. Эспозито.

В настоящее время представляются недостаточно исследованными вопросы обеспечения функциональной устойчивости современных телекоммуникационных сетей связи в части гармонизации систем разных поколений.

Целью диссертационной работы является повышение функциональной устойчивости сетей связи за счёт использования модифицированных методов расчёта доверительных интервалов срока службы сетевых элементов и применения положений квалиметрии к обобщённой оценке технического состояния сети связи.

Для достижения цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Разработка метода расчёта норм аварийного резерва и нормативов запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) на обслуживание оборудования связи, включающего учёт износа заменяемых запасных частей, с модификацией расчётов одиночного и группового ЗИП.
2. Разработка метода формирования аварийного запаса для обеспечения эксплуатации волоконно-оптических кабелей связи за пределами их гарантийного срока с учётом нормативных требований к линиям связи на основе исследования изменений во времени коэффициента затухания, хроматической и поляризационно-модовой дисперсии оптического волокна на линиях передачи отечественной информационной инфраструктуры.
3. Разработка метода мультипликативной, обобщённой, иерархической оценки устойчивости систем и сетей связи на базе комплексной оценки их технического состояния.
4. Разработка рекомендаций по модификации нормативных требований к лицензированию в сфере связи на основе трёхзвенной структуры.

Научная новизна диссертационной работы:

1. Для волоконно-оптических линий связи разработан метод расчёта запаса волоконно-оптического кабеля для аварийно-восстановительных работ при продолжении использования кабелей после истечения их гарантийного срока с обеспечением заданных требований к линиям связи в целом. Метод разработан с учётом предложенной модели расчёта ЗИП и результатов исследования временной стабильности характеристик оптического волокна G.652.
2. Разработана модель для расчёта нормативов запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП) на обслуживание средств связи. Новым в теоретической модели является переход от распределения Пуассона к нормальному распределению Лапласа-Гаусса с использованием теоремы К. Капура и Л. Ламберсона.
3. Разработан метод мультипликативной, обобщённой, иерархической оценки технического состояния систем и сетей связи, основанный на теоретических положениях квалиметрии. Метод рекомендован для оценки технического состояния сетевых элементов, критически важных для обеспечения устойчивости функционирования сети связи.
4. Обоснованы предложения по переходу на трёхзвенную структуру лицензирования, а также требования к порядку сетевого взаимодействия, обеспечивающие идентификацию оконечных устройств во всех сетевых структурах, что создаёт нормативные основы перспективного роста функциональной устойчивости телекоммуникационных сетей.

Теоретическая и практическая значимость работы.

1. Результаты исследования стабильности коэффициента затухания и поляризационно-модовой дисперсии оптического волокна G.652 подтверждают объективную возможность продления срока использования волоконно-оптических кабелей после окончания гарантийного срока их эксплуатации с достижением требуемых показателей качества линий связи в целом. Использование предложенного подхода позволяет обеспечить продление сроков службы волоконно-оптических кабелей на срок 7-10 % за пределами гарантийного.
2. Доказана эффективность реализации аппроксимации распределения Пуассона для оценки количества отказов нормальным распределением Лапласа-Гаусса, что позволяет, используя теорему К. Капура и Л. Ламберсона, оценивать доверительный интервал остаточного срока службы сетевых элементов, включая заменяемые в процессе эксплуатации.

3. Разработанная методика расчёта состава и объёма группового ЗИП обеспечивает возможность планирования номенклатуры составных частей ЗИП с заданным периодом прогнозирования. Применение методики позволяет обоснованно сократить порядка 10 % запасов ЗИП.
4. Разработан метод мультипликативной, обобщённой, иерархической оценки технического состояния основных сооружений и средств связи на основе квалиметрии, который даёт эффективный инструмент многоуровневого контроля работоспособности сетей и позволяет оперативно реагировать на изменения отдельных параметров, требующих текущей коррекции.
5. Разработанный алгоритм расчёта срока службы ЗИП для ВОЛС с учётом стабильности исследованных показателей оптического волокна позволяет рассчитать допустимые сроки продления службы волоконно-оптических кабелей после завершения их гарантийного эксплуатационного периода, что даёт возможность продления использования наиболее затратной части сетевой инфраструктуры.
6. Обоснована необходимость перехода к практике трёхзвенного лицензирования услуг связи в РФ с выделением конвергентных, сервисных и инфраструктурных услуг. Это даёт реальную возможность ускорения внедрения новых технических средств и технологий.

Методология и методы исследования. При выполнении работы использованы методы теории вероятности и математической статистики, теории цепей и систем связи, теории надёжности, методология разработки стандартов и нормативов в области связи (в частности, нормативная (прескриптивная) методология науки).

Положения, выносимые на защиту.

1. Алгоритм расчёта допустимого продления срока службы волоконно-оптических кабелей за их гарантийными пределами, основанный на разработанной методике расчёта нормативов ЗИП с учётом результатов анализа стабильности коэффициента затухания и поляризационно-модовой дисперсии волокна G.652, позволяет продлить использование дорогостоящей сетевой инфраструктуры в процессе модернизации с обеспечением сохранения требуемых показателей качества линий связи в целом.
2. Метод расчёта объёма и состава запасных изделий, отличающийся от общепринятых, и основанный на переходе от распределения Пуассона для количества отказов к нормальному распределению Лапласа-Гаусса, что

позволяет распространить теорему К. Капура и Л. Ламберсона на определение доверительного интервала остаточного срока службы сетевых элементов, включая заменяемые.

3. Метод мониторинга качества технических средств связи, разработанный на основе теории квалиметрии, определяет механизм численной оценки функциональной устойчивости сети связи.
4. Реформирование на основе формализации отдельных нормативных и технологических требований системы регулирования телекоммуникационных отраслевых правил в части перехода лицензирования к трёхзвенной структуре с выделением конвергентных, сервисных и инфраструктурных услуг позволяет существенно повысить функциональную устойчивость сетей связи, особенно при внедрении перспективных технологий.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные результаты, изложенные в диссертации, докладывались на научных конференциях и заседаниях научно-технического совета:

- на X Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», март 2016 г.;
- на XII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», март 2018 г.;
- на XVII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», март 2023 г.;
- на заседаниях секции НТС Научно-технического Центра Анализа ЭМС НИИР, декабрь 2023 г., февраль 2024 г., декабрь 2024 г., январь 2025 г.

Реализация результатов работы.

1. Процедура планирования запасов групповых комплектов ЗИП, а также метод расчёта вероятности выхода из строя новых сменных частей ЗИП приняты для применения и показали свою эффективность в Филиале «Московский региональный центр» ФГУП «Российская телевизионная и радиовещательная сеть».
2. Применение разработанной методики расчёта срока службы волоконно-оптических кабелей за пределами гарантийного срока службы при планировании регламентных работ позволило скорректировать прогнозируемые сроки замены линейных участков, что уменьшило затраты за счёт снижения преждевременных закупок в ООО «Алгорком».

Публикации. По результатам исследований опубликовано 16 научных работ (2 без соавторов): 9 статей в журналах, включённых в Перечень ВАК ведущих рецензируемых научных изданий; 2 статьи в рецензируемых научных журналах; 5 докладов в трудах X, XII и XVII Международных научно-технических конференций «Технологии информационного общества».

Личный вклад автора. Автору принадлежит ключевая роль в получении основных результатов, представленных в диссертации. Все результаты, сформулированные в положениях, выносимых на защиту, и составляющие научную новизну работы, получены автором лично.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и обозначений, библиографического списка, включающего 146 наименований, и одного приложения. Общий объём диссертации составляет 143 с., в т.ч. 33 рисунка и 22 таблицы. В приложении приведены документы, подтверждающие внедрение результатов работы.

Содержание работы

Введение содержит обоснование актуальности темы исследования, формулировки целей и решаемых задач, оценку научной новизны и практической значимости результатов работы. Приводятся сведения о реализации результатов и апробации работы.

Глава 1 посвящена анализу отечественной и зарубежной практики нормативного регулирования по проблеме обеспечения функциональной устойчивости телекоммуникационных сетей и эффективного их функционирования.

Выполнен анализ тенденций мировой практики лицензирования телекоммуникационных услуг. Подробный анализ практики лицензирования телекоммуникационных услуг в нашей стране показал, что действующие нормативные правовые акты заметно отстают от фактического состояния российских сетей связи. Особое значение приобретают вопросы лицензирования интернет-сервисов, осуществляющих голосовые вызовы в телефонную сеть общего пользования в силу их важности для обеспечения информационной безопасности пользователей.

Среди используемых в настоящее время инициированных в сетях передачи данных (СПД) голосовых вызовов, терминация которых осуществляется на сетях ТфОП, встречаются как нормативно регулируемые соединения, так и нормативно не определённые, но широко применяемые в действительности.

Для обеспечения устойчивого функционирования телекоммуникационных сетей необходима реализация комплекса мер, среди которых одной из наиболее эффективных является резервирование как отдельных элементов, так и участков сетей в целом.

Проведён анализ возможных вариантов решения задачи резервирования, принятых на магистральных сетях связи. Обобщенный подход к выбору схем резервирования позволил выделить наиболее важные характеристики каждой из них, на основе чего выполнен сопоставимый анализ основополагающих параметров: коэффициента готовности, времени срабатывания, затрат на построение - именно эти параметры являются ключевыми для принятия решения о составе и объёмах реконструируемых сетей.

Проанализирована основная информация о применяемых видах резервирования, конфигурациях и трактах.

Коэффициент готовности линейной структуры с автоматическим защитным переключением мультиплексных секций (MSP 1+1) рассчитывается по формуле:

$$K_{\Gamma} = 1 - (1 - K_{\Gamma\text{ОСН}})(1 - K_{\Gamma\text{РЕЗ}}), \quad (1)$$

в которой коэффициенты готовности основного и резервного направлений связи ($K_{\Gamma\text{ОСН}}$ и $K_{\Gamma\text{РЕЗ}}$) являются произведениями коэффициентов готовности узлов $K_{\Gamma Mi}$ и линейных участков сети $K_{\Gamma i}$ (здесь i - номера линейных участков направлений связи). Для численной оценки полагаем все $K_{\Gamma Mi}$ одинаковыми и равными: $K_{\Gamma Mi} = K_{\Gamma M} = 0,999999$.

Среди линейных структур самым распространенным является способ защиты соединений подсети (SNCP 1+1) из-за своей гибкости и динамичности.

Одним из основных способов сетевого резервирования является организация самовосстанавливающихся колец. Плоское кольцо организуется в различных оптических волокнах одного кабеля. Оно обеспечивает 100%-ную защиту от одиночного повреждения мультиплексоров, но не обеспечивает защиты от повреждения линий.

Коэффициент готовности плоского кольца K_{Γ} определяется следующей формулой:

$$K_{\Gamma} = \prod_{i=1}^n K_{\Gamma i} \prod_{i=1}^{2(n+1)} K_{\Gamma Mi} + 2(n+1)(1 - K_{\Gamma M}) \prod_{i=1}^n K_{\Gamma i}, \quad (2)$$

где n – число участков плоского кольца.

Наиболее эффективным, с точки зрения затрат пропускной способности на резервирование, является посекционное резервирование в кольце (MS SPRing).

Коэффициент готовности для тракта, проходящего по k участкам кольца SNCP, состоящего из n участков, вычисляется по формуле:

$$K_{\Gamma} = \prod_{i=1}^n K_{\Gamma i} + \left(1 - \prod_{i=1}^k K_{\Gamma i}\right) \prod_{i=1}^{n-k} K_{\Gamma i}, \quad (3)$$

а для двухволоконного кольца (2F MS SPRing) - по формуле:

$$K_{\Gamma} = \prod_{i=1}^k K_{\Gamma i} + k(1 - K_{\Gamma i}) \prod_{i=1}^{n-1} K_{\Gamma i}, \quad (4)$$

Наиболее распространенным вариантом взаимодействия различных структур является структура нескольких сопряжённых колец. Для повышения надёжности такой структуры кольца обычно связываются через два общих узла. Коэффициент готовности такой схемы вычисляется по формуле:

$$K_{\Gamma} = K_{\Gamma I} K_{\Gamma II} \left(1 - (1 - K_{\Gamma M I})(1 - K_{\Gamma M II})\right), \quad (5)$$

где $K_{\Gamma I}$, $K_{\Gamma II}$ – коэффициенты готовности колец I и II соответственно, вычисляемые по формуле (4); $K_{\Gamma M I}$, $K_{\Gamma M II}$ – коэффициенты готовности общих узлов.

Анализ результатов расчётов, проведенных для K_{Γ} всех участков, принятых одинаковыми и равными 0,99965, показал, что наиболее экономичной структурой со временем переключением 50 мс являются кольца *MS SPRing*. Затраты на резервирование в решетчатых сетях меньше, но время переключения достигает 1-2 мин.

Нормативное регулирование вопросов обеспечения устойчивого функционирования сетей связи становится эффективным при использовании всех современных технологических достижений. При этом одним из наиболее эффективных направлений является задача поддержания бесперебойного функционирования восстанавливаемых систем и сетей связи. Формирование комплектов ЗИП лежит в основе целого направления теории надёжности.

Анализ практики формирования ЗИП показывает сохраняющиеся проблемные вопросы, требующие своего решения.

При формировании сети связи, начиная со стадии её проектирования, важнейшим является определение её качественных характеристик. В соответствии с рекомендациями МСЭ-Т характеристики качества услуг связи подразделяются на характеристики, связанные с качеством обслуживания, и характеристики, связанные с качеством функционирования сети. При этом именно качество функционирования сети является основой для обеспечения качества обслуживания.

Анализ показывает, что отсутствие единой комплексной оценки состояния сети в целом не позволяет своевременно выявить критически важные параметры, требующие незамедлительного реагирования.

В главе 2 представлена разработка предложений по нормативному обеспечению эффективного функционирования сетей связи.

В современных условиях пользователи потребляют не отдельную услугу, а в составе пакета, состоящего из фиксированной и мобильной телефонии, доступа в Интернет, интерактивного телевидения, услуги «умного дома» и др. Произошло разделение операторов на *инфраструктурных* (владеющих сетью, но не связанных с пользователями) и *операторов услуг* (оказывающих услуги пользователям как на собственной, так и арендованной сети). В сложившихся условиях представляется назревшим переход на трехзвенную структуру лицензирования, включающую конвергентные, сервисные, инфраструктурные услуги.

Конвергентные услуги включают в себя услуги для пользователей мультисервисных сетей общего пользования, технологических и выделенных сетей связи; *инфраструктурные услуги* предоставляются взаимодействующим операторам связи на транспортных сетях, сетях доступа и вещателям на сетях телерадиовещания; *сервисные услуги* направлены на взаимодействие с конечным пользователем через мультисервисную сеть и сеть Интернет. Схема такого порядка взаимодействия приведена на рисунке 1.

В главе 3 представлена разработка методики расчёта норм аварийного резерва и нормативов ЗИП на ремонтно-эксплуатационное обслуживание оборудования связи. Проработанные к настоящему времени вопросы по комплектованию ЗИП недостаточно раскрывают динамику пополнения группового ЗИП в процессе обслуживания.

Сформированы основы теоретической модели. Для обработки статистических параметров длительности безотказной работы предложено использование теоремы К. Капура и Л. Ламберсона, устанавливающей соотношение между экспоненциальным и пуассоновским распределениями.

Для целей исследования принципиально важными являются два обстоятельства:

1) распределение Пуассона относится к классу безгранично-делимых распределений и сумма таких случайных величин также имеет пуассоновское распределение;



Рис. 1. Предлагаемое лицензирование услуг на сети электросвязи РФ на основе трёх видов лицензий

2) при числе слагаемых случайных величин не менее четырёх распределение Пуассона аппроксимируется нормальным распределением Лапласа-Гаусса с вероятностью одностороннего двухсигмового отклонения $P(x \leq m + 2\sigma) = 0,975$, где x – количество отказов (количество использованных запасных частей из комплекта ЗИП), m – математическое ожидание, а σ – среднее квадратическое отклонение количества отказов. Такая аппроксимация позволяет распространить оценку доверительного интервала остаточного срока службы сетевых элементов на заменяемые.

Показан пример применяемого расчёта нормативов группового ЗИП в конкретных реальных условиях с коэффициентом обеспеченности $K_n = 0,975$.

Далее представлен предлагаемый метод расчёта группового ЗИП-Г, состоящий из следующей последовательности действий:

1. Определяется номенклатура группового ЗИП для группы объектов связи.
2. Формируется перечень исходных данных для расчёта состава и объёма ЗИП:
 - количество одинаковых элементов i -го типа m_i с одним значением наработки до отказа (i - число типов);
 - значение наработки до отказа T_0 элементов i -го типа;

- интенсивность потока отказов элементов i -го типа λ_i ;
 - год начала эксплуатации m_i элементов i -го типа;
 - прогнозный период эксплуатации элементов i -го типа;
 - период времени от начала эксплуатации изделия, для которого рассчитывается начальный уровень запаса составных частей в комплекте ЗИП t_0 (целесообразно задавать значение $t_0 = 8\,766$ часов – один год эксплуатации изделия).
3. Определяются значения исходных данных.
Для представленного в дальнейшем примера расчёта использованы следующие исходные данные: $m_i = 100$; $T_0 = 50\,000$ часов; $\lambda_i = 0,00002$ (1/час); $t_0 = 8\,766$ часов; год начала эксплуатации m_i элементов i -го типа – 2015; прогнозный период эксплуатации элементов i -го типа – 10 лет.
4. Методика реализуется при помощи электронных таблиц, в расчётные строки заносятся следующие данные: календарные годы; период эксплуатации на конец года, t вероятность наработки до отказа за период эксплуатации; вероятность наработки до отказа за год; среднее количество отказов 100 установленных элементов по годам; количество отказов 100 установленных элементов при показателе обеспеченности группового ЗИП 0,975 по годам.
5. Рассчитать вероятность наработки до отказа P_i за период эксплуатации t
- $$P_i = 1 - e^{-\lambda_i t}.$$
6. Рассчитать вероятность наработки до отказа за год как разность значений вероятности наработки до отказа за период до следующего (за расчётным) года и вероятности наработки до отказа за период до расчётного года.
7. Рассчитать средние значения количества отказов за первый расчётный год по формуле $M_i = [P_i \times m_i]$, где квадратные скобки означают округление до целого числа.
8. Рассчитать значения количества отказов (количество использованных элементов ЗИП) за первый расчётный год с учётом двухсигмовых отклонений (показатель обеспеченности группового ЗИП 0,975) по формуле $M_{i0,975} = [P_i \times m_i + 2 \times P_i \times \sqrt{m_i}]$.
9. Расчёты по п. 7. и 8. повторяются для второго (и следующих) расчётных годов, но вместо значения m_i используется значение $M_{i0,975}$.
10. Значения $M_{i0,975}$ для каждого расчётного года суммируются.

Для наглядности результат расчёта автором конкретного количества входных (выходных) блоков маршрутизатора в групповом комплекте группового ЗИП-Г представлен в таблице 1.

Таблица 1. Расчёт запасных входных (выходных) блоков маршрутизатора в групповом комплекте ЗИП-Г

№ п/п	Наименование	Значение									
		2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
1.	Годы календарные										
2.	Период эксплуатации на конец года	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3.	Вероятность наработки до отказа за период эксплуатации	0.1608	0.2958	0.4090	0.5040	0.5838	0.6507	0.7069	0.7540	0.7936	0.8268
4.	Вероятность наработки до отказа за год	0.1608	0.1350	0.1132	0.0950	0,0798	0.0669	0.0562	0.0471	0.0396	0.0332
5.	Среднее количество отказов 100 установленных элементов по годам	16	13	11	10	8	7	6	5	4	3
6.	Количество отказов 100 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975	19	16	14	11	10	8	7	6	5	4
7.	Вероятность наработки до отказа за год		0.1608	0.1350	0.1132	0.0950	0,0798	0.0669	0.0562	0.0471	0.0396
8.	Среднее количество отказов 19 установленных элементов по годам		3	3	2	2	1	1	1	1	1
9.	Количество отказов 19 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975		4	4	3	3	2	2	2	1	1
10.	Вероятность наработки до отказа за год			0.1608	0.1350	0.1132	0.0950	0,0798	0.0669	0.0562	0.0471
11.	Среднее количество отказов 16 установленных элементов по годам			3	3	2	2	1	1	1	1
12.	Количество отказов 16 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975			4	3	3	2	2	2	1	1
13.	Вероятность наработки до отказа за год				0.1608	0.1350	0.1132	0.0950	0,0798	0.0669	0.0562
14.	Среднее количество отказов 14 установленных элементов по годам				2	2	2	1	1	1	1
15.	Количество отказов 14 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975				3	3	2	2	2	1	1
16.	Вероятность наработки до отказа за год					0.1608	0.1350	0.1132	0.0950	0,0798	0.0669
17.	Среднее количество отказов 11 установленных элементов по годам					2	1	1	1	1	1
18.	Количество отказов 11 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975					3	2	2	2	1	1
19.	Вероятность наработки до отказа за год						0.1608	0.1350	0.1132	0.0950	0,0798
20.	Среднее количество отказов 10 установленных элементов по годам						2	1	1	1	1
21.	Количество отказов 10 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975						3	2	2	2	1
22.	Вероятность наработки до отказа за год							0.1608	0.1350	0.1132	0.0950
23.	Среднее количество отказов 8 установленных элементов по годам							1	1	1	1
24.	Количество отказов 8 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975							2	2	2	1
25.	Вероятность наработки до отказа за год								0.1608	0.1350	0.1132
26.	Среднее количество отказов 7 установленных элементов по годам								1	1	1
27.	Количество отказов 7 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975								2	2	1
28.	Вероятность наработки до отказа за год									0.1608	0.1350
29.	Среднее количество отказов 6 установленных элементов по годам									1	1
30.	Количество отказов 6 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975									2	1
31.	Вероятность наработки до отказа за год										0.1608
32.	Среднее количество отказов 5 установленных элементов по годам										1
33.	Количество отказов 5 установленных элементов при показателе обеспеченности 0,975										2
34.	Общее количество элементов ЗИП-Г по годам	19	20	22	20	21	19	19	18	17	14

Для наглядности результатов расчётов на рис.2 и рис.3 приведены результаты по пунктам 3, 6 и 34 таблицы 1.

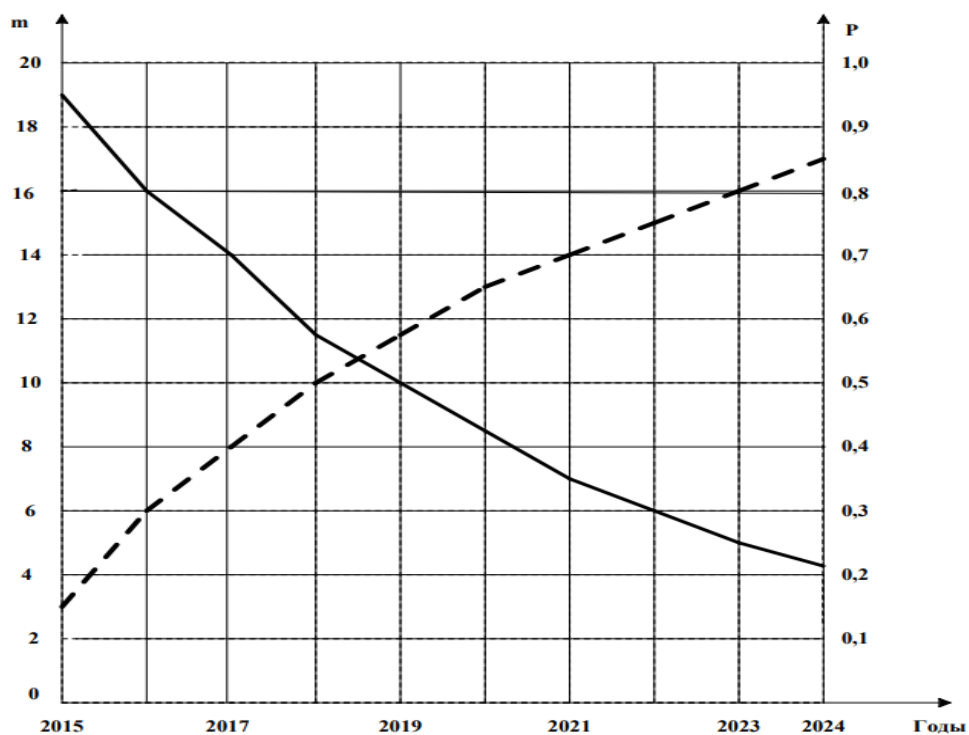


Рис.2. Результаты расчётов группового ЗИП-Г по годам:

m - количество отказов 100 установленных в начале 2015 года составных частей при показателе обеспеченности 0,975 (сплошная кривая);
 P - вероятности наработки до отказа составных частей в ЗИП-Г маршрутизаторов за период эксплуатации (пунктирная кривая).

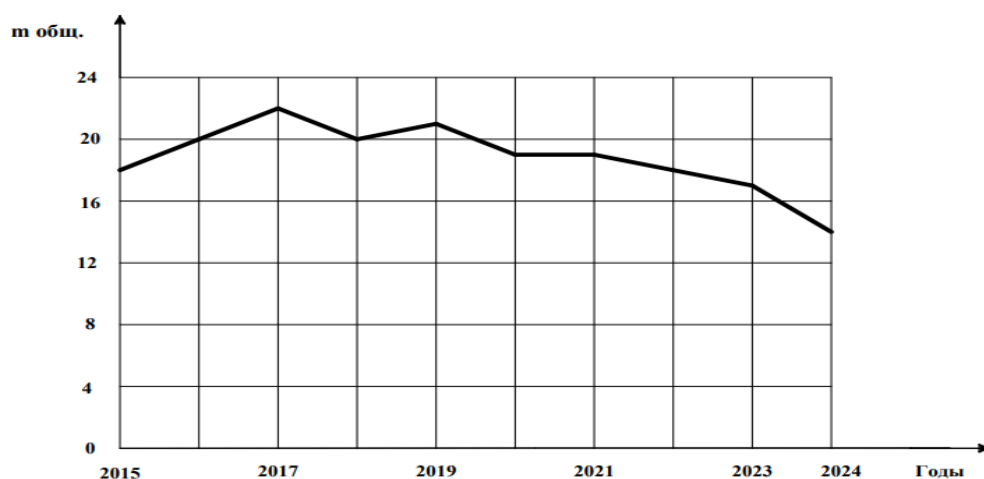


Рис.3. Общее потребное количество составных частей ЗИП-Г маршрутизаторов по годам.

Показано решение актуальной для операторов связи задачи – создание нормативов пополнения группового ЗИП-Г в процессе обслуживания.

В развитие предложенной методики формулируется модель для расчёта состава одиночного ЗИП на основе действующих нормативных требований. При этом логическая схема изделия представляется в виде цепочки последовательного соединения составных частей, отказ которых приводит к отказу изделия в целом.

В главе 4 приведена оценка эксплуатационной надёжности сетей связи при окончании нормированного срока службы оптических кабелей.

Представлены результаты исследования временной стабильности коэффициента затухания, хроматической и поляризационно-модовой дисперсии оптического волокна на основе измерений, проведённых на отдельных усилительных участках регенерационного участка Кадала - Сковородино магистральной ВОЛС.

Отдельное внимание уделено анализу процесса старения оптических волокон на основе процессов, определяемых известным унимодальным распределением Вейбулла, а также процесса старения компонентов оптического кабеля. Базовая модель надёжности волокна, прошедшего контрольные испытания (*proof*-тест), представлена следующим образом:

$$t_f = \left\{ \left[B^{\frac{m}{n-2}} S_0^m \frac{L_0}{L} \ln \frac{1}{(1-F)} + (\sigma_p^n t_p)^{\frac{m}{n-2}} (1+C)^{\frac{m}{n-2}} \right]^{\frac{n-2}{m}} - \sigma_p^n t_p \right\} - \frac{B}{\sigma_a^2}, \quad (6)$$

где $C = \frac{\frac{B}{\sigma_p^2} - \frac{t_u}{n+1}}{t_p}$ когда загрузки *proof*-теста меньше или равно скорости разгрузки $t_u \leq (n-2) \frac{B}{\sigma_p^2}$; B и n – параметры усталости волокна; m – модуль унимодального распределения Вейбулла; S_0^m – мера прочности Вейбулла; F – растягивающее усилие; σ_p – нагрузка при *proof*-тесте; $t_p = t_d + \frac{t_l + t_u}{n+1}$; t_d – время выдержки; t_u и t_l – соответственно времена загрузки и разгрузки *proof*-теста; L_0/L – отношение испытательной длины L_0 к моделируемой эксплуатационной длине L .

Расчёт аварийного запаса кабеля при повышении риска его отказов в связи с завершением гарантийного срока эксплуатации проведено в соответствии с разработанным в главе 3 методом.

Сопоставление полученных результатов расчёта аварийного запаса кабеля при повышении риска его отказов в связи с завершением гарантийного срока эксплуатации с экспериментальными данными показало

обоснованность применения разработанной методики. Её применение позволяет снизить потребные объёмы ЗИП на величину порядка 7 - 10 %.

Разработана иерархическая модель функциональной устойчивости сетей и систем телекоммуникаций на базе обобщённой комплексной мультипликативной оценки технического состояния. Для обеспечения количественной оценки состояния сети связи предложено использование принципов квалиметрии.

На основе сформулированных требований проводится разработка методики контроля технического состояния средств и сетей связи на основе конкретных требований к средствам технологического управления (СТУ) сетями связи.

1. Техническое состояние СТУ предложено оценивать бальным методом.
2. Техническое состояние СТУ определяется баллами 0, 1, 2, 3:
 - балл 0 соответствует предельному состоянию СТУ, при котором оно неработоспособно;
 - балл 1 соответствует неисправному, но работоспособному состоянию СТУ, при котором эксплуатация СТУ возможна при ограничениях его номинальных характеристик;
 - балл 2 соответствует исправному состоянию СТУ на момент контроля, но могущему перейти в неисправное ввиду нахождения характеристик СТУ на границе исправного состояния;
 - балл 3 соответствует исправному состоянию СТУ, при котором все его характеристики соответствуют требованиям нормативной документации.

Вместе с оценкой технического состояния СТУ бальным методом оценивается и система технического обслуживания СТУ.

Оценка технического состояния каждого СТУ определяется как корень n -ой степени из произведения бальных оценок, исключая нефункционирующие элементы, всех (n) оцениваемых характеристик. Результат вычисления округляется в меньшую сторону (отбрасывается дробная часть числа).

Основные результаты работы

В **заключении** диссертационной работы представлены основные результаты и выводы по полученным результатам.

1. Проведённый анализ тенденций инновационного развития сетей, систем и устройств телекоммуникаций показал зависимость функциональной устойчивости сетей связи от мер нормативного и технологического регулирования и их соответствия с реально действующей сетевой инфраструктурой, используемыми и перспективными технологиями.
2. Разработанный метод расчёта необходимого состава запасных частей позволяет с заданным периодом прогнозирования определять параметры надёжности работы оборудования и оптимальный период восполнения запасов технических средств для обеспечения бесперебойной работы сети в целом; ступенчатая методика расчёта группового ЗИП-Г учитывает вероятность выхода из строя сменных частей ЗИП -Г.
3. Разработанный метод оценки технического состояния средств связи обладает следующими необходимыми свойствами: обобщенный, иерархический, чувствительный, динамичный, независимый. Это даёт возможность обоснованного контроля текущего состояния сети связи, исключая маскирующие факторы отдельных показателей.
4. Предложенный алгоритм оценки срока службы волоконно-оптических кабелей за их гарантийными пределами с учётом стабильности коэффициента затухания и поляризационно-модовой дисперсии оптического волокна G.652 на реальной волоконно-оптической линии передачи позволяет существенно повысить эффективность информационной инфраструктуры сетей связи.

Результаты диссертационной работы могут быть применены в составе комплекса организационно-технических мероприятий по расширению функциональности и повышению устойчивости единой сети электросвязи Российской Федерации.

Основные публикации по теме диссертации

Статьи в научных изданиях, входящих в перечень,

рекомендованный ВАК РФ

1. Цым А.Ю., Деарт И.Д., Пальцин Д.А., Кузьмичев В.А. «Методика расчета нормативов группового ЗИП на ремонтно-эксплуатационное обслуживание оборудования связи». Электросвязь, 2015, № 6, с. 20-23.
2. Пальцин Д.А., Плахов В.В., Фень А.С. «Применение протоколов ENUM для гармонизации сетей связи с коммутацией пакетов и коммутацией каналов». Электросвязь, 2022, № 10, с. 47-55.
3. Пальцин Д.А., Фень А.С., Гусев В.М., Деарт И.Д. «Текущие проблемы лицензирования интернет-сервисов, осуществляющих голосовые вызовы в сеть ТфОП». Электросвязь, 2023, № 1, с. 63-71.
4. Пальцин Д.А., Фень А.С., Гусев В.М., Деарт И.Д. «Назревшие дополнения к правилам лицензирования интернет-сервисов, осуществляющих голосовые вызовы в сеть ТфОП». Электросвязь, 2023, № 1, с. 72-78.
5. Пальцин Д.А., Фень А.С., Горчаков А.П., Гусев В.М., Деарт И.Д., Цым А.Ю. «Проблемы идентификации абонентов, инициирующих голосовые соединения в сети передачи данных». Электросвязь, 2023, № 5, с. 53-62.
6. Пальцин Д.А. «Эксплуатационная надежность сетей связи при окончании срока службы оптических кабелей». Электросвязь, 2023, № 8, с. 42-48.
7. Константинова А.А., Пальцин Д.А., Захаров А.А., Фень А.С., Цым А.Ю., Шалагинов А.В. «Открытая сеть радиодоступа Open RAN для мобильных сетей 6G». Электросвязь, 2023, № 12, с. 43-48.
8. Пальцин Д.А., Пшеничников А.П. «Реформирование структуры лицензирования в сфере телекоммуникаций». Электросвязь, 2024, № 1, с. 51-60.
9. Пальцин Д.А., Нетес В.А., Цым А.Ю. «Методы резервирования для обеспечения устойчивого функционирования первичных сетей связи», Труды НИИР, 2024, № 3-4, с.2-13.

Статьи в научных журналах и сборниках трудов.

10. Пальцин Д.А., Фень А.С., Ступницкий М.М. «Анализ эффективности существующей системы оценки качества оказания услуг сотовой связи в современных условиях». REDS: Телекоммуникационные устройства и системы, 2022, т.12, № 3, с. 23-35.

11. Paltsin D.A., Tsym A.Y. Maintaining the reliability of communication networks while continuing operation of optical cables beyond their warranty period // Discrete and Continuous Models and Applied Computational Science. - 2024. - Vol. 32. - N. 3. - P. 294-305.

Доклады в материалах и сборниках трудов научных конференций

12. Цым А.Ю., Деарт И.Д., Пальцин Д.А. «Методика расчета нормативов группового ЗИП для технического обслуживания оборудования связи», Сборник трудов X Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» 16-17 марта 2016 г., с. 396-397.
13. Пальцин Д.А. «Результаты исследования временной стабильности коэффициента затухания, хроматической и поляризационно-модовой дисперсии оптического волокна». Сборник трудов XII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» 14-15 марта 2018 г., том 2, с. 215-218.
14. Пальцин Д.А., Цым А.Ю. «К расчету нормативов ЗИП на ремонтно-эксплуатационное обслуживание средств связи». Сборник трудов XII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» 14-15 марта 2018 г., том 2, с. 219-222.
15. Пальцин Д.А., Цым А.Ю. «Мониторинг сетей связи при помощи комплексной оценки их технического состояния». Сборник трудов XII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества» 14-15 марта 2018 г., том 2, с. 223-226.
16. Пальцин Д.А., Фень А.С., Гусев В.М. «Исследование аспектов повышения эффективности системы СОРМ в сетях 5G». Сборник трудов XVII Международной отраслевой научно-технической конференции «Технологии информационного общества», 2023, с. 140-142.

Пальцин Денис Анатольевич

**Применение статистических методов для повешения
функциональной устойчивости перспективных сетей связи.**

В диссертации представлена разработка метода расчёта доверительного интервала срока службы сетевых элементов, включая заменяемые компоненты. На основе положений квалиметрии разработан обобщенный метод оценки технического состояния сетей связи. С учётом результатов исследования стабильности характеристик оптического волокна, разработан метод расчёта аварийного запаса оптического кабеля при продолжении эксплуатации за пределами его гарантийного срока.

В работе показана зависимость функциональных характеристик сетей связи от требований нормативного регулирования и предложены направления модификации этих требований.

Denis Anatolyevich Paltsin

**The use of statistical methods to assess the functional stability of
promising communication networks.**

The dissertation presents the development of a method for calculating the confidence interval of the service life of network elements, including replaceable components. Based on the provisions of qualimetry, a generalized method for assessing the technical condition of communication networks has been developed. Taking into account the results of the study of the stability of optical fiber characteristics, a method has been developed for calculating the emergency reserve of an optical cable during continued operation beyond its warranty period.

The paper shows the dependence of the functional characteristics of communication networks on the requirements of regulatory regulation and suggests ways to modify these requirements.