

На правах рукописи



МЕРКУЛОВ Антон Геннадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРПОРАТИВНЫХ
ПАКЕТНЫХ ЦВЧ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ
КОМПАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПЕРЕХОДА ОТ
ТЕХНОЛОГИИ FRAME RELAY К IP-ТЕХНОЛОГИИ**

**Специальность: 05.12.13 –
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»**

АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Новосибирск - 2015

Работа выполнена на кафедре передачи дискретных сообщений и метрологии
ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет телекоммуникаций и
информатики» Федерального агентства связи РФ

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Шувалов Вячеслав Петрович
ФГБОУ ВО «Сибирский
государственный университет
телекоммуникаций и информатики»

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Пуговкин Алексей Викторович
ФГБОУ ВПО «Томский государственный
университет управления и радиоэлектроники»,
кафедра телекоммуникаций и основ
радиотехники

кандидат технических наук, доцент
Зотов Кирилл Николаевич
ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный
Авиационный технический университет»,
кафедра телекоммуникационных систем

Ведущая организация: **Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования «Сибирский
федеральный университет», г. Красноярск**

Защита диссертации состоится «28» декабря 2015 г. в 10:00 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.07
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
в актовом зале 1-ого корпуса по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К.Маркса, 12.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Уфимского государственного авиационного технического университета.

Автореферат разослан «27» октября 2015 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета
Доктор технических наук, доцент



И.Л. Виноградова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В корпоративных сетях связи электроэнергетических компаний цифровые каналы ВЧ связи (ЦВЧ) используются достаточно широко. Существуют пакетные конвергентные ЦВЧ сети на основе Frame Relay-технологии – Frame Relay-ЦВЧ сети.

Необходимость повышения эффективности пакетных ЦВЧ сетей и исследование методов перехода в них от Frame Relay к IP-технологии связана, в первую очередь, с двумя причинами. В последние годы со стороны эксплуатирующих организаций появились требования обеспечить возможность передачи IP-трафика в Frame Relay-ЦВЧ сетях, для чего требуется их серьезная модернизация. Из-за завершения производства Frame Relay мультиплексоров (FRAD) стало невозможным расширение существующих Frame Relay-ЦВЧ сетей. Для модернизации и расширения сети требуется использование альтернативного сетевого оборудования, идентичного по функциональности FRAD, но поддерживающего передачу IP-трафика.

Модернизацию Frame Relay-ЦВЧ сетей осложняет отсутствие научно-технической основы создания ЦВЧ сетей на основе IP-протокола и методов обеспечения их эффективного функционирования.

Актуальность работы с экономической стороны подтверждается исследованиями рынка систем ВЧ связи. С 2012 по 2018 годы согласно исследованию, проведенному компанией Markets&Markets объем рынка (в целом для линий электропередачи низкого, среднего и высокого напряжения) увеличится почти втрое, доля ВЧ систем по высоковольтным линиям электропередачи составит более 12%.

Степень разработанности темы. В литературных источниках детальной информации о построении IP-сетей по ЦВЧ каналам найти не удалось. Наиболее близкой к теме исследования публикацией является работа «LAN/IP – Connections over HV Power Lines Using Digital PLC», авторами которой являются Н. Spiess, А. Khatchatourov, V. Radziuk. В работе говорится об опыте организации межмашинного обмена по ВЛ 220 кВ, и делается заключение о принципиальной возможности решения этой задачи с использованием ЦВЧ оборудования. Описание стратегии применения ВЧ оборудования в пакетных сетях электроэнергетических предприятий дано в работе «High Voltage PLC Roles in Packet Switching Networks of Power Utilities», авторы А. Mujčić, N. Suljanović, M. Zajc, J. Tasić. Анализ применения Ethernet-технологии в современных телекоммуникационных сетях электроэнергетических компаний представлен в отчете рабочей группы D2.23 Совета CIGRE – «The use of Ethernet technology in the power utility environment».

Можно утверждать, что тема организации конвергентных пакетных ЦВЧ сетей с применением IP-технологии, в литературе практически не раскрыта.

Объектом исследования являются корпоративные Frame Relay-сети электроэнергетических компаний, построенные с использованием ЦВЧ каналов

Предметом исследования являются методы сохранения функциональности и обеспечения технической эффективности ЦВЧ сетей при переходе от Frame Relay к IP-технологии.

Целью работы является повышение эффективности корпоративных пакетных ЦВЧ сетей электроэнергетических компаний путем применения в них вместо Frame Relay-технологии IP-технологии.

Задачи исследования

1. Разработка стратегии модернизации Frame Relay-ЦВЧ сетей на основе применения IP-технологии.
2. Разработка методов организации IP-ЦВЧ каналов, обеспечивающих эффективную передачу IP-трафика в ЦВЧ сетях.
3. Разработка метода управления интенсивностью передачи пакетов данных между абонентскими Ethernet и линейными WAN-интерфейсами маршрутизатора.
4. Разработка правил планирования транзитных IP-ЦВЧ каналов согласно требованиям норм к задержке передачи речевых сигналов.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана стратегия модернизации пакетных Frame Relay-ЦВЧ сетей, на основе применения IP-технологии, *обеспечивающая* сохранение их функциональности при высокой экономичности и технологичности перехода (модернизации).
2. Предложен метод организации IP-ЦВЧ каналов, *отличающийся* применением синхронной передачи данных через физические транспарентные WAN-соединения при сжатии заголовков IP-пакетов, *позволяющий* сохранить сопоставимую с Frame Relay-ЦВЧ сетями эффективность использования пропускной способности канала и *обеспечивающий* экономическую эффективность модернизации ЦВЧ сети.
3. Предложен метод управления интенсивностью передачи пакетов данных между абонентскими Ethernet и линейными WAN-интерфейсами маршрутизатора, *отличающийся* использованием буфера абонентского Ethernet-порта для временного хранения пакетов, *что позволяет* исключить перегрузки в IP-ЦВЧ сетях.
4. Установлены ограничения на использование ЦВЧ систем в транзитных каналах, *обеспечивающие* требования по допустимой задержке передачи речевых сигналов, *позволяющие* повысить качество проектирования IP-ЦВЧ сетей.

Теоретическая и практическая ценность полученных результатов состоит в возможности их использования при проектировании новых IP-ЦВЧ сетей и модернизации существующих Frame Relay-ЦВЧ сетей с применением IP-технологии.

Разработанные принципы организации IP-ЦВЧ сетей внедрены в корпоративных ЦВЧ сетях электроэнергетических предприятий России и Казахстана.

На основе исследований технологий компрессии заголовков IP-пакетов было опубликовано учебное пособие. Результаты диссертационной работы используются в учебном процессе в Сибирском государственном университете телекоммуникаций и информатики и Алматинском университете энергетики и связи.

Рекомендации по организации IP-ЦВЧ каналов применяются в проектах организаций НПО «ЭКРА» (Россия), ТОО «СИМЕНС», АО «Казсельэнергопроект», о чем имеются акты внедрения.

Методы исследования. Проведение исследований основывается на системном подходе к изучаемым вопросам, обобщении и анализе данных об опыте построения пакетных ЦВЧ сетей, расчетах с использованием математического ап-

парата теории вероятностей, статистической обработки данных, натурном моделировании исследуемых явлений.

Положения, выносимые на защиту:

1. Стратегия модернизации пакетных ЦВЧ сетей, в которых используется технология Frame Relay, на основе применения IP-технологии.

2. Метод организации IP-ЦВЧ каналов, *отличающийся* применением синхронной передачи данных через физические транспарентные WAN-соединения при сжатии заголовков IP-пакетов, *позволяющий* сохранить сопоставимую с Frame Relay-ЦВЧ сетями эффективность использования пропускной способности канала и *обеспечивающий* экономическую эффективность модернизации ЦВЧ сети.

3. Метод управления интенсивностью передачи пакетов данных между абонентскими Ethernet и линейными WAN-интерфейсами маршрутизатора, *отличающийся* использованием буфера абонентского Ethernet-порта для временного хранения пакетов, *что позволяет* исключить перегрузки в IP-ЦВЧ сетях.

4. Правила планирования транзитных IP-ЦВЧ каналов, *обеспечивающие* требования по допустимой задержке передачи речевых сигналов, *позволяющие* повысить качество проектирования IP-ЦВЧ сетей.

Достоверность научных и практических результатов работы. Диссертация охватывает основные вопросы научной задачи и соответствует критерию внутреннего единства, что подтверждается наличием последовательного плана исследования, концептуальностью и взаимосвязью выводов.

Правильность теоретических наработок подтверждена экспериментально с применением промышленных образцов ЦВЧ оборудования и опытом эксплуатации IP-ЦВЧ каналов, а также корректным использованием соответствующего математического аппарата.

Личный вклад автора. Все результаты диссертационной работы получены автором самостоятельно.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих международных конференциях и форумах: IEEE Сибирская конференция по управлению и связи SIBCON-2015. Россия, Омск; International Energy Conference, IEEE ENERGYCON 2014. Хорватия, Дубровник, 2014; Second International Conference on Applied Innovations in IT, ICAIT 2014. Германия, Кёттен, 2014; Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Надежность функционирования и информационная безопасность телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта». Россия, Омск, 2013; Международный форум по информатизации «Международный конгресс телекоммуникационные технологии и сети». Россия, Москва 2011, 2010; International Conference on Telecommunications and Network Engineering WASET ICTNE 2012. ОАЭ, Дубай, 2012; Международная научно-техническая конференция «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях». Казахстан, Алматы, 2014, 2012; International Conference on Electrical Power and Energy Systems WASET ICPEPES 2011. Нидерланды, Амстердам, 2011.

Публикации. Материалы, отражающие основные технические результаты диссертационной работы, опубликованы в сборниках докладов научно-технических конференций и в отраслевых журналах. Всего опубликовано 19 ра-

бот, из них – 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Министерства образования и науки Российской Федерации, 1 статья в коллективной монографии НП Сибирской ассоциации консультантов «СибАК» и 1 учебное пособие. Три работы включены в реферативную базу Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4-х глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка использованных источников и 7 приложений. Работа содержит 135 страниц машинописного текста, включая приложения, и библиографический список из 81 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, рассматривается состояние исследуемой темы, сформулированы цели и задачи работы, перечислены основные научные результаты, полученные в диссертации, приведены сведения об апробации и представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе рассмотрены современное состояние существующих Frame Relay-ЦВЧ сетей, сетевая архитектура, область применения и практический опыт их организации, дано обоснование актуальности модернизации путем перехода к IP-технологии.

Разработана стратегия модернизации пакетных Frame Relay-ЦВЧ сетей с применением IP-технологии. Предложенная стратегия является теоретическим базисом модернизации Frame Relay-ЦВЧ сетей. На рисунке 1 показана схема взаимосвязи основополагающих задач модернизации Frame Relay-ЦВЧ сетей.

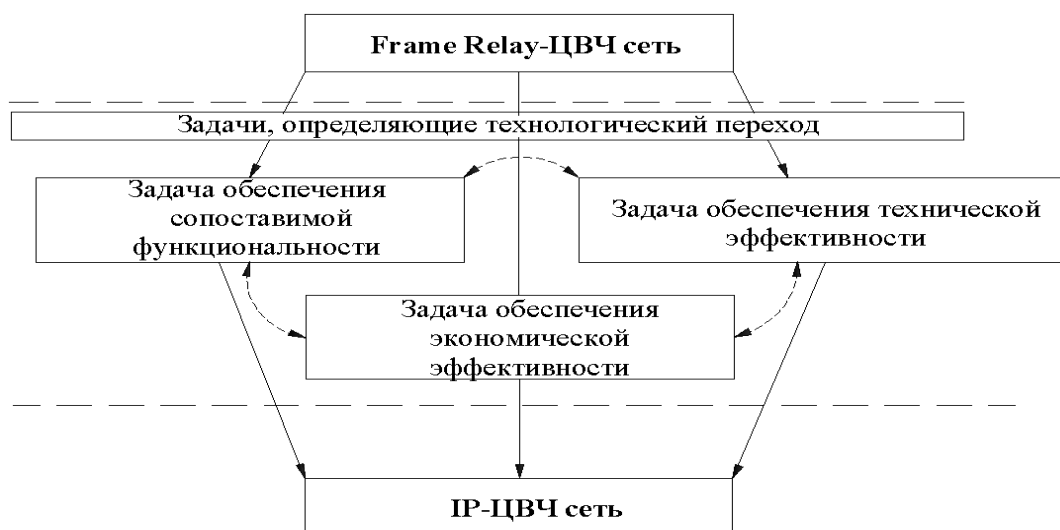


Рисунок 1 – Схема взаимосвязи задач технологического перехода

Решение задачи сопоставимой функциональности означает, что при переходе к IP-технологии должна обеспечиваться та же функциональность передачи информационных сигналов различных служб, что и в Frame Relay-ЦВЧ сетях.

Задача технической эффективности, в первую очередь, включает в себя поиск методов эффективной передачи IP-трафика по ЦВЧ каналам. Необходимо

обеспечить эффективность использования пропускной способности ЦВЧ канала при передаче IP-трафика сопоставимую Frame Relay-сетям. Кроме этого, требуется выполнить исследование вопросов управления трафиком и планирования IP-ЦВЧ сетей.

Экономическая эффективность модернизации Frame Relay-ЦВЧ сетей подразумевает рациональное использование имеющегося ЦВЧ оборудования путем его сохранения и использования с IP-маршрутизаторами.

На рисунке 2 представлена схема вариантов модернизации Frame Relay-ЦВЧ сетей при переходе к IP-технологии. Полный переход подразумевает замену существующих мультиплексоров Frame Relay на IP-маршрутизаторы, и организацию новых ЦВЧ каналов с применением IP-технологии. При смешанной структуре организация новых ЦВЧ каналов выполняется с применением IP-технологии, но при этом сохраняется существующий сегмент Frame Relay-ЦВЧ сети и по мере износа мультиплексоры FRAD заменяются IP-маршрутизаторами. Гибридная структура подразумевает подключение IP-маршрутизаторов в качестве абонентского оборудования к FRAD через синхронный интерфейс с передачей IP-трафика поверх Frame Relay. В конечном итоге модернизация сети должна закончиться на стадии полного перехода.

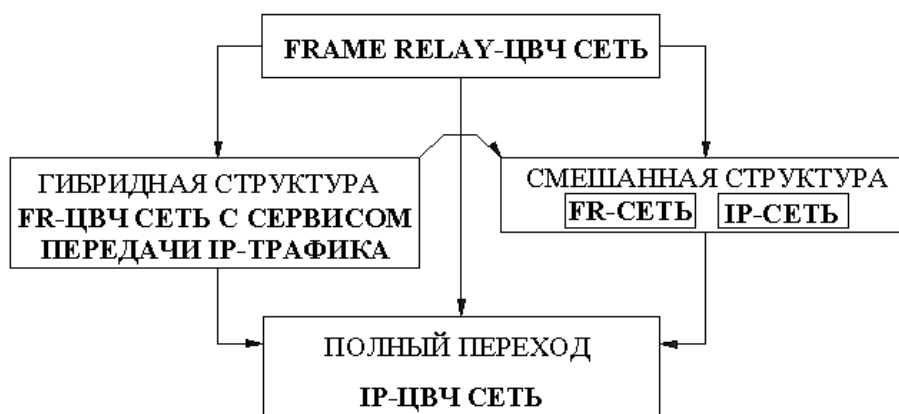


Рисунок 2 – Варианты перехода FR-сети к IP-технологии

Построение IP-ЦВЧ сетей должно производиться с использованием в качестве сетевого оборудования IP-маршрутизаторов, предпочтительно со встроенными VoIP-шлюзами, разнесенным доступом абонентских устройств к IP-маршрутизаторам, когда каждое устройство имеет собственный интерфейс для подключения к маршрутизатору, собственный кабель и уникальный IP-адрес и разделением IP-сети на подсети для каждого объекта. Передача пакетов должна выполняться с использованием статической маршрутизации.

Во второй главе выполнен анализ существующих методов организации ЦВЧ каналов для передачи трафика IP-приложений, выявлены их недостатки.

Для передачи IP-трафика в современных ЦВЧ устройствах интегрированы Ethernet-ретрансляторы, данное решение описано в новом стандарте МЭК 62488 «Power Line Communication Systems for Power Utilities». Функциональная схема IP-ЦВЧ канала на основе Ethernet-ретрансляторов приведена на рисунке 3.

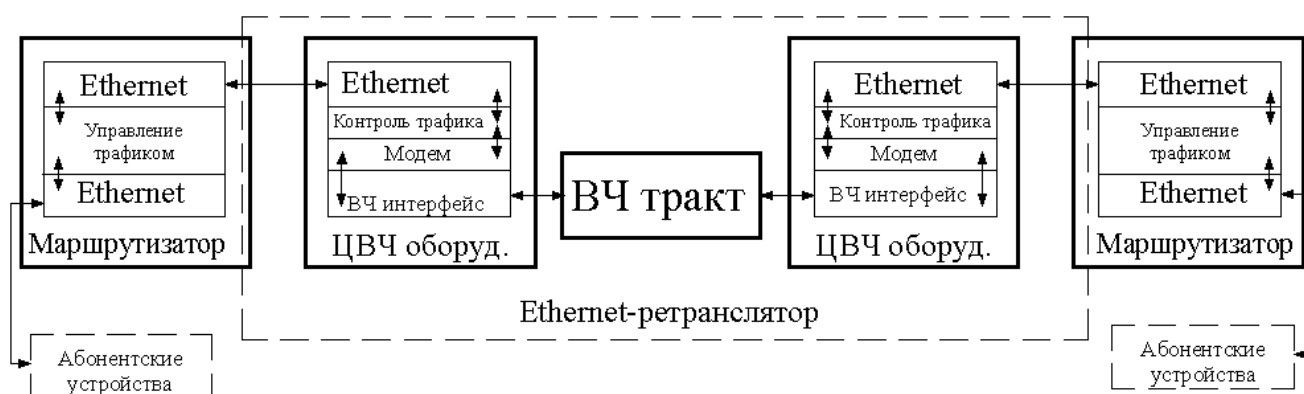


Рисунок 3 – Функциональная схема IP-ЦВЧ канала с Ethernet-ретранслятором

Из-за того, что Ethernet-ретрансляторы не выполняют никаких преобразований Ethernet-кадров, эффективность использования пропускной способности канала при небольшом размере полезной нагрузки будет очень низкой. В Frame Relay-сетях размер заголовков информационных кадров всего 8 байт, а в Ethernet-сетях (66 байт) - больше в 8,25 раза. В итоге при одинаковом количестве информационных сигналов потребуется увеличение пропускной способности ЦВЧ канала в 2-3 раза. Кроме этого, при вовлечении ЦВЧ оборудования в процесс обработки пакетов выше физического уровня увеличивает время восстановления канала при потере ЦВЧ модемами тактовой синхронизации. Увеличение размера информационного кадра, передаваемого по каналу связи, увеличивает вероятность его повреждения ошибками. Важен факт, что в существующих ЦВЧ системах, используемых в Frame Relay-ЦВЧ сетях, службы Ethernet-ретранслятора вообще нет. Если отбросить технические трудности и представить, что модернизацию Frame Relay-ЦВЧ сети требуется выполнить с применением Ethernet-ретрансляторов, то это потребует замены всех существующих ЦВЧ систем и мультиплексоров на новое оборудование, что является очень затратным. Соответственно не обеспечивается экономическая эффективность модернизации сети.

Основываясь на анализе проблем использования ЦВЧ каналов с Ethernet-ретрансляторами, был предложен альтернативный метод организации IP-ЦВЧ каналов, отличающийся применением синхронной передачи данных через физические транспарентные WAN-соединения и сжатием заголовков IP-пакетов. Функциональная схема IP-ЦВЧ канала на основе предложенного метода приведена на рисунке 4.

Предложенный метод позволяет использовать существующее ЦВЧ оборудование совместно с IP-маршрутизаторами, исключить вовлечение ЦВЧ оборудования в обработку пакетов на уровнях выше физического, увеличить эффективность использования канала связи до значений, сопоставимых Frame Relay сетям при той же полезной нагрузке путем преобразования служебной информации Ethernet-кадров.

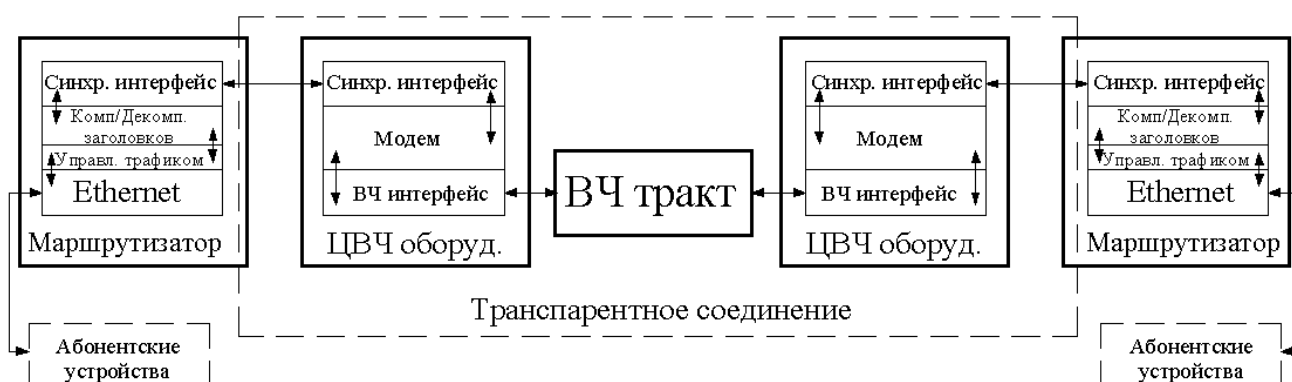


Рисунок 4 – Функциональная схема IP-ЦВЧ канала на основе синхронной передачи данных через транспарентное соединение с сжатием заголовков

В главе выполнено исследование технологий, с применением которых можно реализовать синхронное транспарентное WAN-соединение со сжатием заголовков IP-пакетов.

При транспарентном соединении ЦВЧ оборудование не участвует в обработке сетевого трафика на уровнях, выше физического. Использование синхронной передачи подразумевает наличие в сетевом оборудовании (IP-маршрутизаторах) и ЦВЧ устройствах синхронных интерфейсов – X.21, V.35, RS-530. Фактически ЦВЧ оборудование выполняет лишь роль удлинителя для соединения двух WAN-интерфейсов IP-маршрутизаторов. За счет использования инкапсуляции Ethernet кадров протоколом Point to Point размер заголовка канального уровня (Ethernet) будет уменьшен более, чем в три раза с 26 байт до 8-ми.

Предложенный подход позволяет произвести замену FRAD на IP-маршрутизаторы с сохранением существующих ЦВЧ систем, так как FRAD подключается в ЦВЧ терминалу через синхронный интерфейс. За счет этого достигается экономическая эффективность модернизации Frame Relay-ЦВЧ сетей. Сумма экономии исчисляется несколькими миллионами рублей.

Использование сжатия заголовков IP-пакетов позволяет уменьшить их размер от 3 до 10 раз. Для использования в IP-ЦВЧ каналах технологии сжатия заголовков должны обладать высокой устойчивостью к потерям единичных пакетов и групп пакетов.

Опубликовано достаточно большое количество работ по исследованию применения сжатия заголовков VoIP пакетов. Из них следует, что наиболее совершенными являются технологии на основе WB-LSB кодирования (RONC, RONCv2). Применение режима передачи NO-DELTA (передача абсолютных значений изменившихся полей) в технологии ECRTP позволяет вообще исключить аварии декомпрессора. В настоящее время доступна для применения в IP-ЦВЧ каналах технология ECRTP (размер сжатого заголовка IPv4/UDP/RTP 12 байт), в перспективе необходимо использование RONC (размер сжатого заголовка IPv4/UDP/RTP 4 байта). Применение в IP-ЦВЧ сетях технологии cRTP недопустимо из-за низкой помехоустойчивости. В диссертации выполнено экспериментальное исследование характеристик работы технологий cRTP и ECRTP (глава 4), подтверждающее корректность выводов.

При передаче данных гарантированной доставки в условиях высокого коэффициента ошибок из-за потерь пакетов и аварий декомпрессора может возникнуть ситуация, когда суммарный объем трафика V_{Sum} , требуемый для передачи файла заданного размера V_{Data} превысит суммарный объем трафика, который бы потребовался при передаче пакетов без сжатия заголовков.

Для оценки V_{Sum} была разработана аналитическая модель, позволяющая рассчитать зависимость V_{Sum} от размера полезной нагрузки в IP-пакете S_{Load} при заданном коэффициенте битовых ошибок $K_{\text{ош}}$. Модель учитывает потери пакетов при восстановлении контекста сессии. С методикой расчета можно ознакомиться в диссертационной работе.

Выражение для расчета V_{Sum} имеет вид (1):

$$V_{\text{SUM}} = (Q + q_{\text{Lose}}) \cdot S_{\text{CH}} + \sum_{i=2}^x (Q \cdot (P_{\text{ош(кадр)}})^i) \cdot q_{\text{Drop}} \cdot S_{\text{CH}} + \sum_{i=2}^x (Q \cdot (P_{\text{ош(кадр)}})^i) \cdot S_{\text{FH}}, \quad (1)$$

где Q – количество пакетов, необходимое для передачи файла заданного размера; q_{Lose} – среднее количество поврежденных пакетов; Q_{Drop} – количество отброшенных пакетов из-за аварии декомпрессора; S_{CH} – размер заголовка IP-пакета после сжатия, [байт]; S_{FH} – размер заголовка IP-пакета без сжатия, [байт]; $P_{\text{ош(кадр)}}$ – вероятность повреждения информационного кадра; x – учитываемое количество подряд поврежденных пакетов.

Вероятность повреждения информационного кадра вычисляется по формуле (2):

$$P_{\text{ош(кадр)}} = 1 - (1 - K_{\text{ош}})^{(S_{\text{Header}} + S_{\text{Load}})}, \quad (2)$$

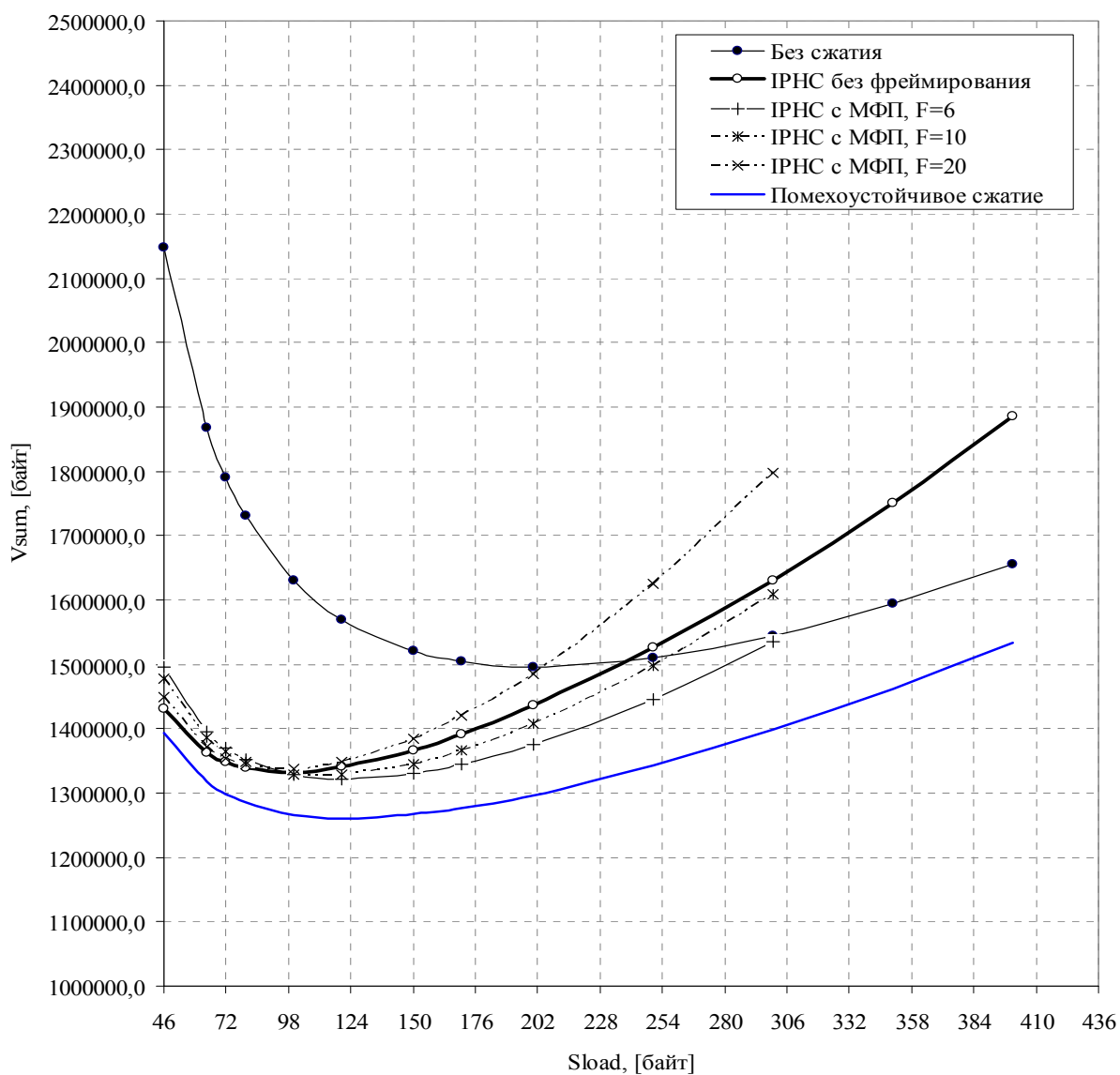
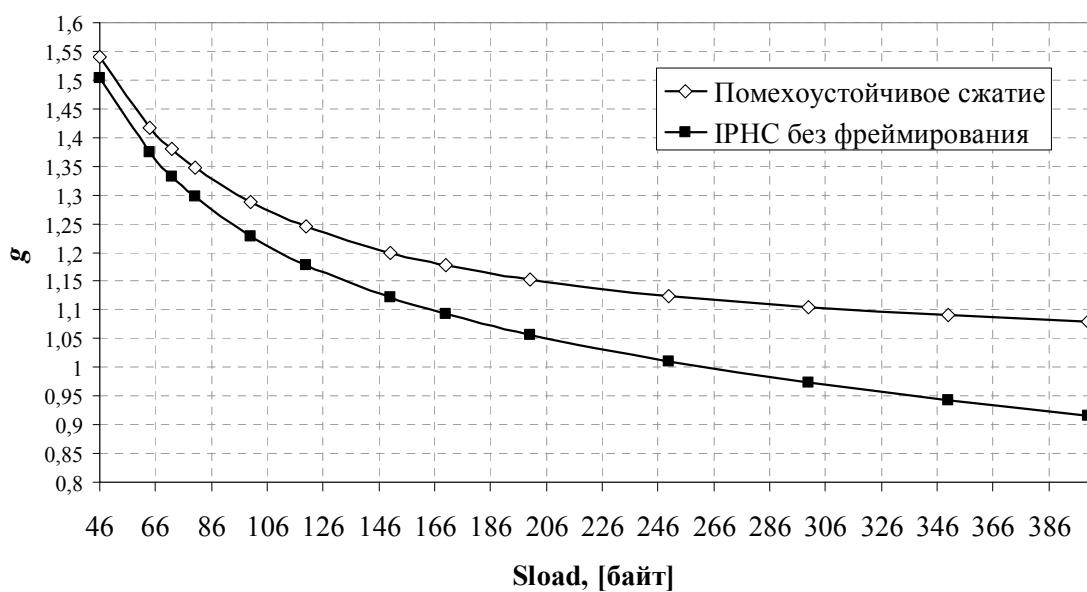
где S_{Header} суммарный размер заголовка информационного кадра, бит; S_{Load} – размер полезной нагрузки, бит.

Расчет проводился:

- для случая передачи пакетов данных с полноразмерными заголовками;
- для случая применения помехоустойчивой технологии сжатия;
- для случая применения технологии сжатия, параметры которой соответствуют технологии IPHC (повреждение подряд 2-х и более пакетов ведет к аварии декомпрессора)
- для случая использования периодического обновления контекста сессии при использовании IPHC.

Значение $K_{\text{ош}}$ в расчетах принималось равным 10^{-4} , что соответствует граничному значению, при котором еще сохраняется тактовая синхронизация ЦВЧ модемов.

Графики зависимостей $V_{\text{Sum}}(S_{\text{Load}})$ представлены на рисунке 5. На рисунке 6 приведены графики, показывающие во сколько раз g сокращается значение V_{Sum} в зависимости от S_{Load} , при использовании помехоустойчивой технологии сжатия и технологии сжатия с параметрами, соответствующими IPHC.

Рисунок 5 – Графики зависимости $V_{Sum}(S_{Load})$ Рисунок 6 – Графики зависимости $g(S_{Load})$

Показано, что применение компрессии заголовков, даже с параметрами, соответствующими технологии IPHC, улучшает характеристики передачи данных, так как снижается общий объем передаваемого трафика, поэтому можно считать ее применение в IP-ЦВЧ каналах обоснованным. Расчеты показали, что уменьшение V_{Sum} при использовании сжатия IPHC в сравнении со случаем передачи пакетов с полноразмерными заголовками, составит более 37% (для заданного размера полезной нагрузки 64 байта). Использование периодического обновления контекста сессии не оказывает существенного положительного влияния.

В таблице 1 и 2 представлены результаты расчета эффективности использования пропускной способности канала η для IP-ЦВЧ каналов на основе WAN-соединений с компрессией заголовков IP-пакетов в сравнении с Frame Relay-ЦВЧ сетями. Значение η определяется из выражения (3), где S_{Load} - размер полезной нагрузки, S_{Header} - суммарный размер заголовка информационного кадра. Размер S_{Load} при передаче данных в Frame Relay-ЦВЧ сетях равен 64 байта, при передаче речи для вокодера G.729 – 20 байт.

$$\eta = \frac{S_{\text{Load}}}{S_{\text{Header}} + S_{\text{Load}}} \cdot 100\%, \quad (3)$$

Таблица 1 – Результаты расчета η при передаче данных

Параметр информационного кадра данных	η , %	$\Delta\eta$, %
Кадр данных в ЦВЧ сети Frame Relay ($S_{\text{Load}}=64$ байт, $S_{\text{Header}}=8$ байт)	88,89	0,00
Кадр данных TCP в IP-ЦВЧ канале с компрессией IPHC, L2 PPP (сжатие IPv4/TCP с 40 до 7 байт) ($S_{\text{Load}}=64$ байт, $S_{\text{Header}}=15$ байт)	81,01	7,88

Таблица 2 – Результаты расчета η при передаче речи

Параметр информационного кадра VoIP	η , %	$\Delta\eta$, %
Речевой кадр в ЦВЧ сети Frame Relay, (G.729 20/20), ($S_{\text{Header}}=8$ байт)	71,43	0,00
Речевой кадр в IP-ЦВЧ с компрессией ECRTP, L2 PPP (сжатие IPv4/UDP/RTP с 40 до 12 байт), (G.729 20/20) ($S_{\text{Header}}=20$ байт)	50,00	21,43
Речевой кадр в IP-ЦВЧ с компрессией ECRTP, L2 PPP (сжатие IPv4/UDP/RTP с 40 до 12 байт), (G.729 30/30) ($S_{\text{Header}}=20$ байт)	60,00	11,43

В перспективе при использовании технологии сжатия ROHC для передачи VoIP пакетов, значение η для IP-ЦВЧ сетей будет незначительно отличаться от значения η в Frame Relay-ЦВЧ сетях.

В третьей главе были определены методы и технологии, которые необходимо применять в IP-ЦВЧ сетях для того, чтобы обеспечить сопоставимую функциональность с Frame Relay-ЦВЧ сетями при выполнении процессов управления сетевым трафиком.

Показано, что для приоритизации пакетов в IP-ЦВЧ сетях следует использовать метки значимости IP-Precedence. В IP-ЦВЧ сетях трафик предсказуем, коли-

чество источников и интенсивность потоков данных могут быть рассчитаны с большой точностью. Путем присвоения меток IP-Precedence можно получить аналогию приоритезации в Frame Relay-ЦВЧ сетях.

Обоснована необходимость применения дисциплины приоритетных очередей «Priority Queue» для обработки очередей пакетов в IP-маршрутизаторах. В IP-ЦВЧ сетях очень важно обеспечить передачу высокоприоритетного трафика в условиях динамического понижения скорости передачи модемами ЦВЧ систем. В этом случае в отсутствии свободных ресурсов пропускной способности канала допускается отбрасывание пакетов низкоприоритетного трафика. Выбранная дисциплина обеспечивает «жесткую» приоритезацию трафика по 4-м очередям.

Для корректной передачи данных с применением дисциплины обработки очередей PQ важно выполнить выравнивание скоростей передачи пакетов с Ethernet-интерфейсов маршрутизатора, к которым подключено абонентское оборудование, и линейных WAN-интерфейсов. Предложен метод регулирования интенсивности пакетов данных между абонентскими Ethernet и линейными WAN-интерфейсами маршрутизатора, отличающийся временным хранением пакетов в аппаратном буфере (FIFO) абонентского Ethernet-порта, позволяющий исключить возникновение перегрузок в IP-ЦВЧ канале и блокировку обслуживания транзитных сигналов данных.

На рисунке 7 представлена функциональная схема маршрутизатора, на которой показаны какие аппаратные и логические функции задействованы при передаче данных. На схеме показаны линейные синхронные WAN-интерфейсы (X.21), абонентский интерфейс Ethernet, к которому подключено устройство сбора и передачи данных (УСПД) или компьютер, буферы FIFO и PQ, ограничитель пропускной способности BWP (Bandwidth Policing). На WAN-интерфейсах выполняется процедура компрессии/декомпрессии заголовков IP-пакетов – HC.

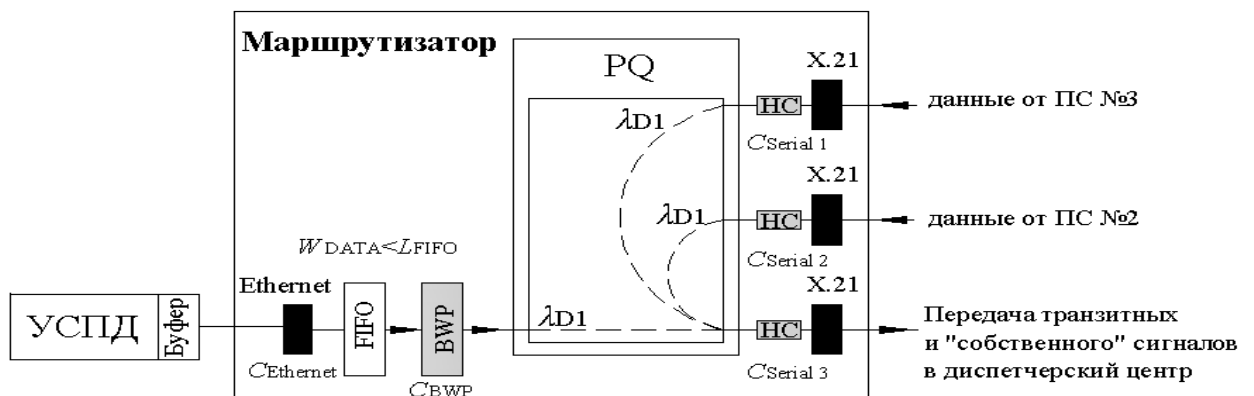


Рисунок 7 – Функциональная схема передачи пакетов данных в маршрутизаторе

Приложение пересылает маршрутизатору некоторое количество пакетов и ждет подтверждения их принятия на удаленной стороне. Из-за того, что скорость передачи Ethernet-интерфейса больше скорости передачи линейного интерфейса на несколько порядков все пакеты сразу же оказываются в буфере PQ, и происходит блокировка обслуживания приходящих транзитных пакетов данных с тем же приоритетом. В Frame Relay-ЦВЧ сетях УСПД к FRAD подключается на скорости

транзитных узлов речевой пакет будет ожидать дообслуживание пакета данных и речевого пакета параллельной сессии VoIP $T_{\text{ЛТ}} = \sum_{i=1}^{L-1} T_{\text{QV}(i)} = \sum_{i=1}^{L-1} (T_{\text{SD}(i)} + T_{\text{SV}(i)}) - T_{\text{SV}(i=1)}$.

В работе предложена концепция совместного использования ЦВЧ оборудования различной архитектуры в одной ЦВЧ сети с QAM и OFDM модемами.

Были проведены расчеты значения T_{EED} для различных комбинаций ЦВЧ систем на участках транзитного ЦВЧ канала. Значение допустимой задержки передачи речи принято равным 350 мс. Данная величина была получена на основе большого количества полевых испытаний ЦВЧ каналов. В итоге разработаны правила планирования транзитных IP-ЦВЧ каналов, обеспечивающие требования по допустимой задержке передачи речевых сигналов, позволяющие повысить качество проектирования IP-ЦВЧ сетей.

1 Предельное значение Y в разветвленных IP-ЦВЧ сетях не должно превышать 5.

2 Основное правило организации разветвленных ЦВЧ сетей: для сегментов с полосой пропускания 4 и 8 кГц необходимо использовать оборудование с QAM-модемами, для сегментов с полосой пропускания 12 кГц и более – использовать оборудование с OFDM-модемами.

3. ЦВЧ оборудование с OFDM-модемами с полосой пропускания 8 кГц следует применять, когда количество транзитных участков не превышает двух.

4. Не следует применять ЦВЧ системы с OFDM-модемами с полосой пропускания 4 кГц для ЦВЧ каналов с транзитными участками. Их использование целесообразно только на направлениях, когда подстанция напрямую соединяется с диспетчерским центром.

5. Способом увеличения количества транзитных соединений при передаче речевых сигналов является применение на наиболее удаленных участках аналогового (АВЧ) режима передачи речи, так как в этом случае ЦВЧ оборудование вносит задержку не более 10-15 мс.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию рассмотренных технологий построения IP-ЦВЧ сетей. Для проведения натурных испытаний был разработан экспериментальный стенд. В составе стенда используются промышленные образцы ЦВЧ оборудования (PowerLink 100), IP-маршрутизаторов (Cisco 2901, 2911), а также анализатор ВЧ сигналов AnCom A7-307 с функцией генератора белого шума. Генерация IP-трафика выполняется с использованием ПО тестирования пакетных сетей IXIA и путем установления телефонных соединений и передачи файловых данных между компьютерами.

С использованием стенда были проведены испытания: по оценке эффективности применения технологий сжатия заголовков IP-пакетов; по оценке параметров передачи речевых пакетов и пакетов данных с использованием сжатия заголовков в условиях высокого коэффициента ошибок; по подтверждению работоспособности выбранных методов управления IP-трафиком; по измерению задержки передачи речевых сигналов при различных конфигурациях транзитного канала.

Результаты испытаний подтверждают корректность выводов, полученных в предыдущих главах. Также в главе приводится описание линейных испытаний

конвергентного IP-ЦВЧ канала, выполненного на реальной линии 220 киловольт. В ходе проведения испытаний оценивалась работа технологий сжатия заголовков ECRTP и IPHC при воздействии шума ВЛ при низком отношении сигнал/шум и высоком коэффициенте ошибок. В результате эксперимента каких-либо существенных отличий от результатов, полученных в лабораторных испытаниях, зафиксировано не было.

В заключении изложены основные результаты работы.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Впервые *разработана* стратегия модернизации пакетных Frame Relay-ЦВЧ сетей, с применением IP-технологии. Предложенная стратегия является теоретической базой модернизации Frame Relay-ЦВЧ сетей.

2. *Предложен* метод организации IP-ЦВЧ каналов, *отличающийся* применением синхронной передачи данных через физические транспарентные WAN-соединения и сжатием заголовков IP-пакетов. Метод *позволяет* достигнуть эффективности использования пропускной способности канала: для передачи голоса VoIP в 60%, для передачи данных TCP в 80%, что сопоставимо с эффективностью использования технологии Frame Relay. Предложенное решение *обеспечивает* экономию при модернизации Frame Relay-ЦВЧ сети, достигающую нескольких миллионов рублей для одного ЦВЧ канала.

3. Предложен метод управления интенсивностью передачи пакетов данных между абонентскими Ethernet и линейными WAN-интерфейсами маршрутизатора, *отличающийся* использованием буфера абонентского Ethernet-порта для временного хранения пакетов, *что позволяет* исключить перегрузки в IP-ЦВЧ сетях и блокировку передачи транзитных сигналов данных.

4. Впервые *разработаны* правила планирования транзитных IP-ЦВЧ каналов, *обеспечивающие* требования по допустимой задержке передачи речевых сигналов, *позволяющие* повысить качество проектирования IP-ЦВЧ сетей. *Основой* идеи является совместное применение на разных участках транзитных каналов IP-ЦВЧ сети ЦВЧ оборудования с OFDM и QAM модемами. Определено, что максимальное количество транзитных сегментов в ЦВЧ канале при нормируемой задержке передачи речи в 350 мс не может превышать 5. ЦВЧ системы с QAM-модемами следует использовать на участках с полосой 4 и 8 кГц, с OFDM-модемами на участках с полосой 12 кГц и более. Использование ЦВЧ систем с OFDM-модемами с полосой 4 кГц целесообразно только для каналов с одним участком, а с полосой 8 кГц – только для каналов с двумя транзитными участками.

5. Лабораторные испытания и эксперимент на реальной высоковольтной линии электропередачи подтвердили достоверность теоретических выводов по первым четырем пунктам. Результаты работы *являются научно-технической базой создания* корпоративных ЦВЧ сетей электроэнергетических предприятий на основе IP-протокола и *обеспечения их эффективного функционирования*. Конечным результатом работы является промышленное внедрение методов перехода к IP-технологии при проектировании и реализации IP-ЦВЧ сетей в электросетевых компаниях России и Казахстана.

Перспективы дальнейшего разработки темы. Актуальной научно-технической задачей является исследование применения в IP-ЦВЧ каналах компрессии полезной нагрузки пакетов данных на основе алгоритма Лемпеля-Зива-Стака. Применение этого метода позволит повысить эффективность передачи трафика от систем мониторинга подстанций за счет высокого коэффициента сжатия данных, представляющих собой текстовые строки.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. А.Г. Меркулов. Экспериментальное исследование передачи речи через ЦВЧ каналы связи с использованием технологии VoIP// Вестник Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. – 2014. - № 3 С.45-56.-ISSN:1998-6920.
2. А.Г. Меркулов. Исследование характеристик современных систем высокочастотной связи по воздушным линиям электропередачи для организации IP-сетей// Журнал Спецтехника и связь, № 2, 2014, с.22-31.
3. А.Г. Меркулов. Методы повышения эффективности передачи IP-трафика в ЦВЧ каналах связи// Журнал T-Comm, № 1, 2014, с.49-56.
4. А.Г. Меркулов. Оценка качества передачи речи VoIP через цифровые высокочастотные каналы связи// Журнал Перспективы науки, № 1 (52), 2014, с. 54-59.
5. А.Г. Меркулов. Выбор техник сжатия заголовков пакетов речи и данных при передаче IP-трафика через ВЧ каналы связи// Вестник Сибирского государственного университета телекоммуникаций и информатики. – 2013. - №3С.70-77.-ISSN:1998-6920.

В других изданиях

6. A.G. Merkulov, V.P. Shuvalov. Analytical Study of Principles Organization of Convergent Packet DPLC Networks with Transition from Frame Relay to IP Technology with Examples of Projects Implemented in Kazakhstan // International Siberian Conference on Control and Communications, IEEE SIBCON 2015. Russia, Omsk 21-23 05. 2015 – p. 1-10.
7. A. Merkulov. Digital Power Line Carrier Packet Networks: Transition from Frame Relay to IP Technology // International Energy Conference, IEEE ENERGY-CON 2014. Croatia Dubrovnik 13.05-16.05.2014 – p. 652-659.
8. А.Г. Меркулов. С.В. Коньшин «Принципы, алгоритмы и характеристики работы техник компрессии заголовков IP-пакетов». Учебное пособие. // Алматинский университет энергетики и связи. – 2014. – 50 с.
9. А.Г. Меркулов. Конвергентные пакетные сети: переход от технологии Frame Relay к IP-технологии // Журнал IT в энергетике, № 3, 2014, с.34-41.
10. A. Merkulov, V.P. Shuvalov. The Research of Increase of Channel Efficiency for IP Traffic Transmission Over Digital Power Line Carrier Channels// Second International Conference on Applied Innovations in IT, ICAIT 2014. Germany Koethen, 27.03.2014 – p 44-51.

11. A. Merkulov, V.P. Shuvalov. Assessment of the VoIP Transmission Quality Over Digital Power Line Carrier Channels// Second International Conference on Applied Innovations in IT, ICAIIT 2014. Germany Koethen, 27.03.2014 – p 45-53.

12. А.Г. Меркулов. «Экспериментальная оценка коэффициента сжатия технологий компрессии IP-трафика STAC и PREDICTOR»// /IX Международная научно-техническая конференция «Энергетика, телекоммуникации и высшее образование в современных условиях».: Материалы конференции. - Алматы, 2014 – С 134-138.

12. А.Г. Меркулов, В.П. Шувалов. К вопросу передачи IP-трафика по цифровым ВЧ каналам связи // Всероссийская научно-техническая конференция с международным участием «Надежность функционирования и информационная безопасность телекоммуникационных систем железнодорожного транспорта». Россия, Омск, 2013 – С. 157-163.

13. А.Г. Меркулов. Исследование вопросов использования ВЧ оборудования связи, поддерживающего передачу IP-трафика в телекоммуникационных сетях энергетических предприятий// Связь и транспорт: коллективная научная монография/ под редакцией Р.М. Ахмеднабиева. Новосибирск: изд. «СибАК», 2013. – 104 с.// С. 7-32.

14. А.Г. Меркулов. К вопросу применения технологии VoIP для пакетных ВЧ каналов связи // VI Международная научно-практическая конференция «Современные проблемы и достижения в отрасли радиотехники, телекоммуникаций и информационных технологий» 19-21 сентября 2012 г.: Материалы конференции.- Запорожье, 2012 –С. 172-173.

15. A. Merkulov. Power Line Carrier Equipment Supporting IP Traffic Transmission in the Enterprise Networks of Energy Companies // WASET International Conference on Telecommunications and Network Engineering. UAE Dubai 8-9.10.2012.– С.242-252.

16. А.Г. Меркулов. Исследование применения техник сжатия заголовков в отношении пакетных систем ВЧ связи// // Вестник Алматинского университета энергетики и связи. – 2012. - №4С.66-74.

17. A. Merkulov. Evaluation of Main Parameters of Data Transmission for VoIP for Integration of Power Line Carrier Equipment Supporting Standard IEEE 802 in the Packet Networks for Energy Grids// WASET International Conference on Electrical Power and Energy Systems. Amsterdam. 13-15.07.2011 – С.661-667.

18. А.Г. Меркулов. Построение пакетных сетей связи энергетических предприятий. Публикация тезисов // Международный форум информатизации «Международный конгресс Телекоммуникационные технологии и сети» – 2011. С.52

19. А.Г. Меркулов. Выбор алгоритма обработки очередей пакетов для сетей связи, организуемых по высоковольтным линиям электропередачи, с использованием оборудования ВЧ связи, поддерживающим стандарт IEEE 802. Публикация тезисов Международный форум информатизации «Международный конгресс Телекоммуникационные технологии и сети» – 2010. С.62-64.

Диссертант



А.Г. Меркулов

МЕРКУЛОВ Антон Геннадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОРПОРАТИВНЫХ ПАКЕТНЫХ
ЦВЧ СЕТЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОМПАНИЙ С
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДОВ ПЕРЕХОДА ОТ ТЕХНОЛОГИИ
FRAME RELAY К IP-ТЕХНОЛОГИИ**

Специальность: 05.12.13 –
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

АВТОРЕФЕРАТ
Диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 26.10.2015. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл.печ.л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ №19.

ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет
Телекоммуникаций и информатики»
Редакционно-издательский отдел
630102, г. Новосибирск, ул. Кирова, 86