

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИНФОРМАТИКИ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ»**

УДК 621.391, 621.395

Белко Андрей Иванович

**АНАЛИЗ И СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ
ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук**

Минск 2004

Работа выполнена в Учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Научный руководитель

доктор технических наук, профессор Кириллов В.И.

(Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кафедра метрологии и стандартизации)

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Чердынцев В.А.

(Учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», кафедра радиотехнических устройств)

кандидат технических наук, доцент Ходасевич О.Р.

(Учреждение образования «Высший государственный колледж связи», декан факультета повышения квалификации)

Оппонирующая организация:

Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»

Защита состоится 30 сентября 2004г. в 14-00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.15.02 при Учреждении образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники» (220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6, БГУИР, ауд. 232, 1 уч. корп., тел. 239-89-89)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Учреждения образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертации. Построение телефонной сети общего пользования (ТфОП), а также формирование основных принципов ее развития в последние десятилетия осуществлялись в соответствии с концепциями Единой Автоматизированной Сети Связи (ЕАСС). Это предполагало ориентацию ТфОП на предоставление традиционных телефонных услуг, а вопросы ее модернизации сводились к необходимости замены релейных автоматических телефонных станций (АТС) с истощенным рабочим ресурсом на современные цифровые узлы коммутации.

Последние достижения научно-технического прогресса в области высоких технологий заставляют пересмотреть сложившийся взгляд на стратегию дальнейшего развития ТфОП. Генеральными ее направлениями становятся *цифровизация* и *интегрализация*, заключающиеся в повсеместном использовании цифровых методов обработки сигналов, а так же в обеспечении универсальности сетей, их доступности для передачи любых видов информации. Это напрямую связано с расширением номенклатуры предоставляемых услуг электросвязи и повышением их качества. Среди основных проблем, решаемых при этом, можно отметить:

- 1) создание современных мультисервисных узлов коммутации, обеспечивающих обслуживание как традиционного речевого телефонного трафика с коммутацией каналов, так и пакетированного для IP-телефонии, услуг мультимедиа и т. п.;
- 2) создание высокоэффективных цифровых сетей абонентского доступа (далее ЦАС), обеспечивающих качественное предоставление всей номенклатуры услуг потребителю.

Последняя проблема является основной в данной диссертации.

Имеется несколько возможных сценариев построения ЦАС. *Первый* – это прокладка «наложенных» высокоскоростных сетей передачи данных в обход существующих телефонных сетей с использованием высокочастотных кабельных линий (волоконно-оптических, коаксиальных, гибридных). *Второй* – построение сети радиодоступа. *Третий* – использование существующей кабельной инфраструктуры абонентской сети доступа.

Каждый из перечисленных сценариев имеет существенные недостатки, ограничивающие область их применения. Несомненный практический интерес представляет цифровизация уже существующей абонентской сети, не имеющей себе равных по количеству обслуживаемых абонентов и суммарной протяженности соединительных линий. Решение данной задачи сводится к увеличению пропускной способности низкочастотного абонентского кабеля. Традиционно это осуществлялось за счет использования цифровых систем передачи (ЦСП), в частности, ЦСП типа ИКМ-30. Однако их технические характеристики не позволяют в полной мере удовлетворить всем предъявляемым требованиям. Поэтому во всем мире велись интенсивные поиски альтернативных решений. Как показывает практика, наибольших успехов в этом направлении добились фирмы, использующие более эффективные цифровые технологии передачи сигнала по симметричной паре, объединенных общим названием xDSL, где x – переменная величина, определяющая конкретный вид технологии, а DSL – аббревиатура от Digital Subscriber Line – цифровая абонентская линия.

Однако стремление фирм-производителей сохранить свое «know-how», отсутствие литературы, посвященной теоретическому анализу этих технологий, а также неоправданно оптимистические рекламные оценки их возможностей не позволяют достоверно определить эффективность использования xDSL-аппаратуры в реальных условиях работы. Особенно неопределенной является проблема использования этих технологий при работе по разным типам кабелей, параллельном включении по одному кабелю нескольких одно- или разнотипных систем в условиях электромагнитного взаимодействия между соседними парами.

Наряду с проблемой анализа электромагнитной совместимости известных технологий xDSL значительный интерес представляет и возможность создания других, более эффективных вариантов структурного построения ЦСП, которые были бы свободны от ряда недостатков уже существующих.

Все вышперечисленное указывает на актуальность разработки методик анализа и рекомендаций по структурно-параметрическому синтезу ЦСП с xDSL технологиями передачи.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Тема данной диссертации связана со следующими научно-исследовательскими работами, проводившимися на факультета телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники:

1) ГБЦ НИР 00-3051 «Разработка математических моделей и методов расчета помехозащищенности многоканальных ЦСП по технологии xDSL».

2) ГБЦ НИР 01-3058 «Разработка методов анализа и синтеза многоканальных систем передачи для цифровых абонентских сетей».

3) ГБЦ 02-3017 «Разработка математических моделей и программного обеспечения для спектрального анализа линейных сигналов в цифровых абонентских сетях».

4) Республиканская межвузовская программа «Применение и разработка алгебро-геометрических, топологических, дифференциальных, вероятностных и статистических методов анализа математических объектов и уравнений и разработка математических методов анализа и синтеза динамических систем и создание теоретических основ их конструирования в технике и естествознании (Анализ и динамические системы)», 2002-2005, (в рамках ГБЦ № 02-3154В).

Цель и задачи исследования. Цель диссертации заключается в разработке:

1) методик анализа существующих типов ЦСП по технологии xDSL с учетом требований, предъявляемых практическими условиями эксплуатации;

2) вариантов структурно-параметрического синтеза ЦСП и методик их анализа;

3) рекомендаций по практическому использованию ЦСП для существующих вариантов организации сети доступа.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1) Проведен анализ методов и устройств обработки сигнала для ЦСП, использующих АИМ и CAP(QAM) сигналы, в ходе которого были разработаны:

- математические модели прохождения сигнала и помех по тракту ЦСП;

- методы анализа спектральных характеристик линейных сигналов;

- математические модели процессов электромагнитного взаимодействия между параллельно работающими ЦСП;

- методики расчета предельной длины участка регенерации для ЦСП с АИМ и CAP(QAM) линейными сигналами.

2) Произведена оценка предельных возможностей существующих типов ЦСП и разработаны основные направления повышения их эффективности:

- разработаны варианты структурно-параметрического синтеза ЦСП и методики их анализа;

- разработаны рекомендации по практическому использованию ЦСП с учетом конкретных условий эксплуатации.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются цифровые системы передачи для сети абонентского доступа, предметом – методы их анализа и структурно-параметрического синтеза.

Методология и методы проведенного исследования. Результаты исследований, представленные в работе, получены в ходе теоретического исследования с использованием методов математического моделирования, а также методов теории цифровых многоканальных систем передачи, теории передачи дискретных сигналов, теории кабельных линий связи, теории спектрального анализа сигналов и систем.

Научная новизна и значимость полученных результатов. Впервые разработаны математические модели АИМ и CAP(QAM) линейных сигналов, математические модели, адекватно описывающие прохождение сигнала и помех в тракте ЦСП по технологии xDSL, методики и программное обеспечение для расчета ожидаемой защищенности регенератора и предельной длины участка регенерации ЦСП по технологии xDSL с учетом конкретных условий эксплуатации, варианты структурно-параметрического синтеза ЦСП и методики их анализа.

Практическая значимость результатов исследований состоит в том, что

1) разработанные методики анализа позволяют, не прибегая к экспериментам, промоделировать электромагнитную обстановку на ЦАС и определить предельную длину участка регенерации для ЦСП по технологии xDSL с учетом требований, предъявляемых практическими условиями эксплуатации;

2) потенциальные потребители получают достоверные методики расчета, которые позволят оценить эффективность той или иной технологии передачи, что позволит осуществить оптимальный выбор фирмы-производителя и типа оборудования;

3) отечественные производители цифровой аппаратуры для сети абонентского доступа будут реально представлять свои возможности в сравнении с конкурентами и правильно строить техническую политику, опираясь на выводы и рекомендации, обоснованные в диссертации.

Полученные результаты исследований, особенно в части определения предельной длины участка регенерации ЦСП по технологии xDSL, разработки и анализа новых вариантов структурного построения ЦСП, были использованы при проектировании и серийном производстве первой в Республике Беларусь малоканальной ЦСП для абонентских линий MT-12DSL (сертификат соответствия Республики Беларусь № ВУ/112.03.1.2.ДА1214, сертификат соответствия Российской Федерации № ОС/1-СП-767) и цифрового модема MT-E1 (сертификат соответствия Республики Беларусь № ВУ/112.03.1.2.ДА1624, сертификат соответствия Российской Федерации № ОС/1-ГМ-306) (предприятие “МИКСТ”, г. Минск).

Основные положения диссертации, выносимые на защиту.

- 1) Новые методики анализа и рекомендации по параметрическому синтезу ЦСП по технологии xDSL для различных условий эксплуатации и организации сети связи.
- 2) Новые структуры построения ЦСП с более высокими показателями качества.
- 3) Новые методики анализа и параметрического синтеза для предлагаемых структурных построений ЦСП.

Личный вклад соискателя. Основные научные и практические результаты диссертационной работы, а также положения, выносимые на защиту, разработаны и получены автором лично.

Апробация результатов диссертации. Материалы, полученные в ходе проведенного исследования, докладывались на следующих конференциях: 3-я международная научно-техническая конференция «Современные средства связи», Минск-Нарочь, 1998; Международная научно-техническая конференция «Новые информационные технологии в науке и производстве», Минск, 1998; 5-я международная научно-техническая конференция «Современные средства связи», Минск - Нарочь, 2000; 6-я международная научно-техническая конференция «Современные средства связи», Минск - Нарочь, 2001; 7-я международная научно-техническая конференция «Современные средства связи», Минск - Нарочь, 2002; 1-я международная научно-техническая конференция «Информационные системы и технологии (IST'2002)», Минск, 2002; 8-я международная научно-техническая конференция «Современные средства связи», Минск - Нарочь, 2003.

Опубликованность результатов. Основные положения диссертации опубликованы в 30 научных работах, из которых 4 статьи в научных журналах, 18 статей в сборниках материалов конференций, 8 заявок на патент. Общий объем опубликованных работ составляет 97 страниц.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, общей характеристики работы, 6 глав, заключения, списка использованных источников и 9 приложений.

Полный объем диссертации составляет 213 страниц, включая 77 рисунков и 9 таблиц на 40 страницах, список использованных источников из 105 наименований на 7 страницах, 9 приложений на 67 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении рассмотрено состояние проблемы, показана актуальность темы.

Общая характеристика работы содержит обоснование актуальности темы, научную новизну и значимость полученных результатов, уточняет цель и задачи исследования. Приведены защищаемые положения, указан личный вклад соискателя, апробация и опубликованность результатов, а также структура диссертации.

В первой главе произведен анализ известных методов построения ЦАС и осуществлена общая постановка задачи исследования.

Обоснована актуальность цифровизации существующих абонентских сетей на многопарных симметричных кабелях за счет использования ЦСП с эффективными технологиями передачи.

Приведены характеристики основных видов технологий передачи семейства xDSL. Отмечено отсутствие обоснованных методов их сравнительной оценки, с помощью которых может быть осуществлен правильный выбор технологии передачи и варианта сети для каждого конкретного случая. Показано, что данный выбор должен осуществляться на основе комплексного учета ряда показателей эффективности, в частности, технических характеристик ЦСП, среди которых определяющей (при заданной скорости передачи) является предельная длина участка регенерации. Рассмотрены особенности построения наиболее распространенных типов ЦСП, использующих квазитрочные, АИМ и CAP(QAM) линейные сигналы. Приведены основные варианты построения сети:

- 1) однокабельное построение с использованием четырехпроводных ЦСП с однополосной полудуплексной передачей по каждой паре;
- 2) двухкабельное построение с использованием четырехпроводных ЦСП с однополосной полудуплексной передачей по каждой паре;
- 3) однокабельное построение с использованием четырехпроводных ЦСП с однополосной дуплексной передачей по каждой паре;
- 4) однокабельное построение с использованием двухпроводных ЦСП с однополосной дуплексной передачей по каждой паре;
- 5) однокабельное построение с использованием двухпроводных ЦСП с двухполосной дуплексной передачей;
- 6) однокабельный вариант построения с использованием четырехпроводных ЦСП с двухполосной дуплексной передачей.

На основании анализа представленного материала сформулированы выводы:

- 1) Большое разнообразие структурных вариантов ЦСП и отсутствие обоснованных методик их анализа не позволяют осуществить правильный выбор необходимого типа оборудования и варианта построения сети.
- 2) Выбор оптимальной технологии передачи и построения сети является сложной задачей, решение которой требует комплексного сравнительного анализа различных вариантов с учетом конкретных практических требований.

В связи с этим необходимо: 1) произвести выбор и обоснование критериев оценки эффективности ЦСП, которые позволили бы осуществить обоснованный сравнительный анализ различных технологий передачи; 2) произвести разработку математических моделей, описывающих прохождение сигнала и помех в трактах ЦСП по технологии xDSL; 3) разработать методики анализа ЦСП по технологии xDSL и произвести численные расчеты с учетом требований, предъявляемых практическими условиями эксплуатации; 4) исследовать возможность и направления дальнейшей оптимизации ЦСП по технологии xDSL.

Во второй главе в рамках поставленной задачи исследования проведен анализ ЦСП с многоуровневыми АИМ линейными сигналами.

В качестве критерия оценки для ЦСП с заданной скоростью передачи обосновано использование предельной длины участка регенерации, которая определялась из условия равенства ожидаемой защищенности от суммарной помехи $A_{3\Sigma}$, действующей на входе решающего устройства (РУ) регенератора, и допустимой защищенности $A_{3\text{ доп}}$:

$$A_{3\text{ доп}} = 10,65 + 11,42 \lg(-\lg K_{\text{ош } 1\text{ доп}} l_p) + 20 \lg[(Z-1)/2] \quad (1)$$

$$A_{3\Sigma} = -10 \lg\{\sum_{i=1}^N A_{3i}\} = -10 \lg\{\sum_{i=1}^N P_{\text{ш } i} R_p / A_p^2\} = -10 \lg\{\sum_{i=1}^N R_p \int_0^{f_c} G_{\text{ш } i}(f) df / A_p^2\}, \quad (2)$$

где $Z=2^n$ – количество разрешенных уровней амплитуды импульсов линейного сигнала; n – количество единичных разрядов исходного цифротока, передаваемых одним символом линейного сигнала; $K_{\text{ош } 1\text{ доп}}$ – допустимый коэффициент ошибок для линейного тракта длиной 1 км, равный $2,5 \cdot 10^{-10}$ для местных (городских и сельских) сетей связи; l_p – предельная длина участка регенерации; N – количество составляющих суммарной помехи; A_{3i} – защищенность от i -ой составляющей суммарной помехи; $P_{\text{ш } i}$ и $G_{\text{ш } i}(f)$ – мощность и спектральная плотность мощности i -ой составляющей суммарной помехи; R_p – входное сопротивление РУ; A_p – максимальная амплитуда импульсов полезного сигнала на входе РУ; $f_c = f_T/n$ – символьная частота линейного сигнала; f_T – тактовая частота исходного цифрового потока.

В результате исследования:

1) Определены основные составляющие суммарной помехи, действующей на входе РУ регенератора: собственные шумы и помехи от переходных влияний (ПВ) на ближний конец (БК) и дальний конец (ДК). При этом выражение для ожидаемой помехозащищенности регенератора ЦСП имеет вид:

$$A_{3\Sigma} = -10 \lg\{\text{dec}(A_3^{(\text{ш})}) + \sum_{i=1}^{N_1} \text{dec}(A_{3i}^{(\text{БК})}) + \sum_{i=1}^{N_2} \text{dec}(A_{3i}^{(\text{ДК})})\}, \quad (3)$$

где $\text{dec}(x) = 10^x$; $A_3^{(\text{ш})}$, $A_{3i}^{(\text{БК})}$ и $A_{3i}^{(\text{ДК})}$ – ожидаемые защищенности от собственных шумов, ПВ на БК и ДК соответственно; N_1 и N_2 – количество источников помех от ПВ на БК и ДК соответственно.

2) Произведен анализ ожидаемой помехозащищенности регенератора от собственных шумов, в ходе которого было получено расчетное соотношение для ожидаемой помехозащищенности [1, 2]:

$$A_3^{(\text{ш})} = p_{\text{с}2} - 10 \lg(D_{\text{ш}}) + 101,2 - 10 \lg(f_c) - a_{\text{ж}} + 20 \lg(a_{\text{ж}}) - 10 \lg(J_1), \quad (4)$$

где $p_{\text{с}2}$ – уровень мощности сигнала на выходе ЦСП, дБм; R_n – волновое сопротивление линии связи (ЛС); $D_{\text{ш}}$ – коэффициент шума УК; f_c – символьная частота, в МГц; $a_{\text{ж}}$ – затухание регенерационного участка на частоте f_c , в дБ; J_1 – поправочный коэффициент, зависящий от $a_{\text{ж}}$ и определяемый методами численного интегрирования.

3) Произведен анализ спектральных характеристик АИМ линейных сигналов, в результате которого было получено соотношение для огибающей спектральной плотности мощности [13, 14]:

$$G(f) = C_n \frac{A_c^2}{R_n f_c} \sqrt{|f|/f_c} \cos^2(\pi f/2f_c), \quad (5)$$

где C_n – постоянные коэффициенты, равные 0,733; 0,568; 0,5; 0,468 и 0,453 для сигналов с Z , равными 4, 8, 16, 32 и 64 соответственно.

4) Произведен анализ ожидаемой помехозащищенности регенератора ЦСП от ПВ для случая совместной работы одно- и разнотипных ЦСП, в ходе которого были получены расчетные соотношения для ожидаемых помехозащищенностей регенератора от ПВ на БК ($A_3^{(BK)}$) и ДК ($A_3^{(DK)}$) для совместной работы одно- (A_{311}) [1, 2] и разнотипных (A_{312}) [4]. При этом для однотипных систем передачи расчетные соотношения имеют вид, соответственно:

$$A_{311}^{(BK)} = A_6(f_1) + 15 \lg\{f_c/f_1\} - 10 \lg\{C_n\} - 18,8 - a_{лс} + 20 \lg\{0,23a_{лс}\} - 10 \lg\{J_2\}, \quad (6)$$

где $A_6(f_1)$ – переходное затухание кабеля на ближний конец на частоте f_1 (справочная величина), в дБ; J_2 – поправочный коэффициент, зависящий от $a_{лс}$ и определяемый методами численного интегрирования;

$$A_{311}^{(DK)} = -10 \lg\{C_n\} - 6 - 10 \lg\{f_c/f_1\}^{1,5} J_3 \operatorname{dec}[-0,1A_6(f_1)] + (f_c/f_1)^m (l_p/l_1) J_4 \operatorname{dec}[-0,1A_{зщ}(f_1, l_1)], \quad (7)$$

где J_3 и J_4 – постоянные поправочные коэффициенты, определяемые методами численного интегрирования; $A_{зщ}(f_1, l_1)$ – защищенность от ПВ на ДК для кабеля длиной l_1 на частоте f_1 (справочная величина), в дБ; m – постоянный коэффициент, определяемый взаимным расположением пар внутри кабеля и равный $m = 2$ при учете межчетверочных влияний и $m = 4$ при учете внутривчетверочных влияний.

Соответствующие выражения для разнотипных систем:

$$A_{312}^{(BK)} = p_{c2} - p_{c1} - 18,8 - 10 \lg\{C_{n2}\} - 15 \lg\{f_c^2/f_{c1}f_1\} + A_6(f_1) - a_{лс2} + 20 \lg\{a_{лс2}\} - 10 \lg\{Q_2\}, \quad (8)$$

где C_{n2} – постоянный коэффициент, значение которого определяется величиной Z линейного сигнала подверженной влиянию ЦСП (ЦСП-2); f_{c1} и f_{c2} – символичные частоты линейных сигналов влияющей ЦСП (ЦСП-1) и ЦСП-2, соответственно, в Гц; p_{c1} и p_{c2} – уровни мощности сигналов на выходе ЦСП-1 и ЦСП-2, соответственно, дБм; $a_{лс2}$ – затухание участка регенерации на частоте f_{c2} ; Q_2 – поправочный коэффициент, зависящий от $a_{лс2}$ и определяемый методами численного интегрирования;

$$A_{312}^{(DK)} = p_{c2} - p_{c1} - 6 - 10 \lg\{C_{n2}\} - 10 \lg\left\{ \frac{f_{c2}^{1,5+m} l_p}{f_{c1}^{1,5} f_1^m l_1} Q_4 \operatorname{dec}[-0,1(A_{зщ}(f_1, l_1))] + \frac{f_{c2}^3}{f_{c1}^{1,5} f_1^{1,5}} Q_3 \operatorname{dec}[-0,1(A_6(f_1))] \right\}, \quad (9)$$

где Q_3 и Q_4 – поправочные коэффициенты, зависящие от отношения f_{c2}/f_{c1} и определяемые методами численного интегрирования.

4) Произведен анализ ожидаемой защищенности от суммарной помехи (3) для следующих вариантов построения сети, использующих параллельное включение M однотипных ЦСП:

- а) вариант 1 - однокабельное построение с четырехпроводными ЦСП и полудуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = M$, $N_2 = (M-1)$;
- б) вариант 2 - двухкабельное построение с четырехпроводными ЦСП и полудуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = 0$, $N_2 = (M-1)$;
- в) вариант 3 - однокабельное построение с четырехпроводными ЦСП и дуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = (2M-1)$, $N_2 = (2M-1)$;
- г) вариант 4 - однокабельное построение с двухпроводными ЦСП и дуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = (M-1)$, $N_2 = (M-1)$.

5) Произведен анализ ожидаемой защищенности от суммарной помехи (3) для варианта сети 4 с параллельной работой двух разнотипных систем передачи для случаев: ЦСП с одинаковыми скоростями ($V_1 = V_2$), но разными АИМ сигналами ($Z_1 \neq Z_2$); ЦСП с одинаковыми АИМ сигналами ($Z_1 = Z_2$), но разными скоростями ($V_1 \neq V_2$).

6) Произведены численные расчеты предельной длины участка регенерации для указанных вариантов сети связи с использованием ЦСП, которые обеспечивают скорости передачи от 256 до 2320 кбит/с, используют АИМ сигналы с Z , равным 4, 8, 16, 32 и 64 и работают по различным типам кабельных линий [1, 2, 4].

В результате анализа полученных результатов были сформулированы выводы:

1) Для всех вариантов построения сети использование многоуровневых АИМ линейных сигналов дает выигрыш в предельной длине участка регенерации за счет снижения символьной частоты линейного сигнала в $n = \log_2 Z$ раз. Величина выигрыша, по сравнению с квазитроичными сигналами, ориентировочно составляет 50-70% - для сигнала с $Z = 4$, 70-90% - для сигнала с $Z = 8$, 90-100% - для сигнала с $Z = 16$. Дальнейшее увеличение Z для всех вариантов сети, кроме второго, не позволяет обеспечить дополнительный выигрыш в сравнении, например с $Z = 16$. Это объясняется ухудшением допустимой защищенности (3), которое уже не может быть компенсировано снижением символьной частоты линейного сигнала.

2) Для всех вариантов сети при неизменных параметрах влияния кабеля ($A_6(f)$ и $A_x(f)$) предельная длина участка изменяется пропорционально изменению километрического затухания кабеля.

3) Для варианта сети 2 предельная длина зависит от собственных шумов и ПВ на ДК, при этом основным источником являются собственные шумы. В связи с этим для данного построения сети длина регенерационного участка практически не зависит от числа параллельно работающих систем передачи.

4) Для вариантов сети 1, 3 и 4 наиболее существенное влияние на предельную длину оказывают ПВ на БК. При этом, как было показано на примере кабеля КСПП, увеличение $A_6(f_i)$, $f_i = 512$ кГц, на 5, 10 и 15 дБ позволяет получить выигрыш по длине участка соответственно 10-15%, 20-30% и 30-50%.

5) Сравнительная оценка исследованных вариантов показывает, что: а) наименее худшим из проанализированных построений сети является вариант сети 1; б) наи-

лучшим из проанализированных построений сети является вариант сети 2, который, однако, требует наличия на сети связи двух параллельных кабелей, что не всегда экономически оправдано; в) вариант сети 3 наиболее предпочтителен при параллельной работе по кабелю нескольких ЦСП, что объясняется дополнительным снижением символьной частоты сигнала в 2 раза, но требует использования двойного количества пар кабеля; г) вариант сети 4 наиболее целесообразен при работе на кабеле одной системы передачи.

6) При совместной работе двух разнотипных ЦСП, имеющих одинаковые линейные коды ($Z_1=Z_2$), но разные информационные скорости передачи ($V_1 \neq V_2$) предельная длина участка $l_{p \max}$ определяется более высокоскоростной ЦСП. При этом совместная работа двух ЦСП с информационными скоростями передачи V_1 и V_2 ($V_1 \neq V_2$, $V_1+V_2 = V_{\max}$) обеспечивает регенерационную длину, которая больше, чем при работе двух однотипных ЦСП со скоростями $V_1=V_2 = 0,5 V_{\max}$.

7) Совместная работа двух разнотипных ЦСП, имеющих одинаковые информационные скорости ($V_1=V_2$), но разные линейные коды ($Z_1 \neq Z_2$), обеспечивается при длине участка регенерации, которая может быть как меньше, так и больше, чем длина участка регенерации при одинаковых кодах передачи ($Z_1=Z_2$). Так, если $Z_1 < Z_2$ и $Z_2 \leq 16$, то длина участка регенерации $l_{p \max}$ находится в пределах $l_{p1} < l_{p \max} < l_{p2}$, где l_{p1} и l_{p2} - предельные длины при работе двух однотипных ЦСП соответственно с кодами Z_1 и Z_2 . Если $Z_2 \geq 32$, а $Z_1 = 4$, то совместная работа разнотипных ЦСП обеспечивается при $l_{p \max}$, которая больше, чем при работе однотипных ЦСП с $Z_1=Z_2$. Наконец, если $Z_1 \geq 16$, а $Z_2 \geq 32$, то допустимая длина участка регенерации $l_{p \max}$ находится в пределах $l_{p1} < l_{p \max} < l_{p2}$. Такой сложный и не вполне очевидный характер зависимости $l_{p \max}$ объясняется существенным различием характеристик спектральных плотностей мощности линейных сигналов, имеющих разные коды и скорости передачи.

8) Дополнительный выигрыш в предельной длине участка при параллельной работе разнотипных ЦСП, может быть получен за счет уменьшения мощности сигнала на выходе той ЦСП, у которой меньше символьная частота линейного сигнала и, соответственно, больше потенциальная длина участка регенерации. Если положить $V_1 < V_2$ и, соответственно, $l_{p1} > l_{p2}$ при $p_{c1}=p_{c2}$, то при уменьшении p_{c1} будет уменьшаться l_{p1} , а l_{p2} наоборот - возрастать. При некотором оптимальном $\Delta p = p_{c2} - p_{c1}$ длины участков регенерации обеих ЦСП станут равными, а результирующая длина участка регенерации для совокупности ЦСП-1 и ЦСП-2 - максимальной. Как показывают численные результаты, выигрыш l_{p2} может достигать от 4,5 до 18% для соответствующей комбинации V_1 , V_2 и значения кода Z .

Следует отметить, что данный эффект наблюдается только при совместной работе ЦСП-1 и ЦСП-2, для которых отношение скоростей передачи удовлетворяет условию: $V_2/V_1 < 5$. В противном случае ($V_2/V_1 \geq 5$) длина участка регенерации ЦСП-2 близка к максимальной и практически не зависит от уменьшения p_{c1} .

В третьей главе осуществлена постановка задачи исследования и проведен анализ ЦСП с CAP(QAM) линейными сигналами. В результате исследования:

1) Произведен анализ ожидаемой защищенности регенератора от собственных шумов, в ходе которого было получено расчетное соотношение для ожидаемой помехозащищенности [6, 13, 22, 23]:

$$A_3^{(ш)} = p_c - 10\lg(D_{шy}) - 10\lg(f_c) - a_{ж} + 20\lg(a_{ж}) + 98,1 - 10\lg(W_1), \quad (10)$$

где f_c – символьная частота модулирующего сигнала, в МГц; $a_{ж}$ – затухание ЛС на частоте f_c , в дБ; W_1 – поправочный коэффициент, зависящий от $a_{ж}$ и $b = f_0/f_c$ и определяемый методами численного интегрирования; f_0 – несущая частота линейного сигнала.

2) Произведен анализ спектральных характеристик CAP(QAM) линейных сигналов [6, 13].

3) Произведен анализ ожидаемой защищенности регенератора ЦСП от помех, обусловленных ПВ от однотипных ЦСП с одно- или двухполосной передачей, в ходе которого были получены расчетные выражения для ожидаемой помехозащищенности регенератора от ПВ на БК и ДК соответственно [6, 13, 22, 23]:

$$A_3^{(6к)} = A_6(f_1) - 15\lg(f_c/f_1) - 10\lg(C_n) - 18,8 - (a_{ж} \sqrt{1+b}) + 20\lg(a_{ж}) - 10\lg(W_2), \quad (11)$$

где W_2 – поправочный коэффициент, зависящий от $a_{ж}$ и b и определяемый методами численного интегрирования;

$$A_3^{(ш)} = -10\lg(C_n) - 6 - 10\lg\left\{ (f_c/f_1)^{1,5} \text{dec}[-0,1A_6(f_1)W_3 + 4C_n(f_c/f_1)^m (I_p/I_1) \text{dec}[-0,1A_{шн}(f_1, I_1)]W_4] \right\}, \quad (12)$$

где W_3 и W_4 – поправочные коэффициенты, зависящие от b и определяемые методами численного интегрирования.

4) Показано, что в случае двухполосной дуплексной передачи предельная длина участка определяется высокочастотным направлением, а для обеспечения отсутствия помехи от ПВ на БК, выбор несущей должен осуществляться из условия: $f_0 \geq 3f_c$, $b \geq 3$.

5) Произведен анализ ожидаемой защищенности от суммарной помехи (3) для следующих вариантов построения сети, использующих параллельное включение M однотипных ЦСП:

а) вариант 1 - однокабельное построение с четырехпроводными ЦСП и однополосной полудуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = M$, $N_2 = (M-1)$;

б) вариант 2 - двухкабельное построение с четырехпроводными ЦСП и однополосной полудуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = 0$, $N_2 = (M-1)$;

в) вариант 3 - однокабельное построение с четырехпроводными ЦСП и однополосной дуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = (2M-1)$, $N_2 = (2M-1)$;

г) вариант 4 - однокабельное построение с двухпроводными ЦСП и однополосной дуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = (M-1)$, $N_2 = (M-1)$.

д) вариант 5 - однокабельное построение с четырехпроводными ЦСП и двухполосной дуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = 0$, $N_2 = (M-1)$, $b = 3$, $f_c = f \sqrt{2n}$;

е) вариант 6 - однокабельное построение с двухпроводными ЦСП и двухполосной дуплексной передачей по каждой паре, для которого $N_1 = 0, N_2 = (2M-1)$, $b = 3$, $f_c = f_n/4n$;

б) Произведены численные расчеты предельной длины участка регенерации для указанных вариантов сети связи с использованием ЦСП, которые обеспечивают скорости передачи от 256 до 2320 кбит/с, используют CAP(QAM) сигналы с Z , равным 4, 8, 16, 32 и 64 и работают по различным типам кабельных линий. В результате анализа полученных результатов были сформулированы выводы [3, 11, 12]:

- для однополосных вариантов построения использование CAP(QAM) сигналов не позволяет получить выигрыш по предельной длине участка регенерации по сравнению с использованием АИМ сигналов (для одинаковых информационных скоростей передачи и линейных сигналов с равными Z);

- для двухполосных вариантов построения предельная длина участка определяется защищенностью высокочастотного направления от собственных шумов и ПВ на ДК. Такое построение позволяет обеспечить практическую независимость длины участка от числа параллельно работающих ЦСП;

- двухполосная передача CAP(QAM) сигналов при работе на кабеле одной ЦСП проигрывает однополосной передаче АИМ сигналов, однако при совместной работе нескольких однотипных систем передачи на многопарных кабелях ее использование более эффективно.

В четвертой главе произведена постановка задачи исследования по разработке вариантов параметрического синтеза ЦСП и методик их анализа, в качестве основных направлений которого были рассмотрены:

- 1) использование альтернативных методов коррекции межсимвольных искажений: предсказание передаваемого сигнала и построение регенератора с решающей обратной связью (РОС).

- 2) использование методов помехоустойчивого кодирования.

В результате исследования:

- 1) Произведен анализ ожидаемой помехозащищенности регенератора от собственных шумов и получены расчетные соотношения при использовании: а) только предсказаний ($A_{зпр}$); б) только РОС ($A_{зрос}$); в) совместно предсказаний и РОС ($A_{зрос.зпр}$):

$$A_{зпр}^{(m)} = p_c + 101,2 - \lg\{C_n\} - 10 \lg(f_c) - a_{лс} + 20 \lg(K_{0пр}) + 20 \lg(a_{лс}) - 10 \lg(L_1), \quad (13)$$

где L_1 – поправочный коэффициент, зависящий от $a_{лс}$ и определяемый методами численного интегрирования; $K_{0пр} = \varphi(l_{кор})$ – масштабный множитель коэффициента передачи блока предсказаний, зависящий от $l_{кор}$; $l_{кор}$ – отрезок регенерационного участка, неравномерность которого корректируется с помощью блока предсказаний;

$$A_{зрос}^{(m)} = p_c + 95,1 - \lg\{C_n\} - 10 \lg(f_c) - a_{лс} + 20 \lg(a_{лс}) - 10 \lg(Y_1), \quad (14)$$

где Y_1 – поправочный коэффициент, зависящий от $a_{лс}$ и определяемый методами численного интегрирования;

$$A_{2, \text{рос-мр}}^{(м)} = p_c + 95,1 - \lg\{C_n\} - 10 \lg\{f_c\} - a_{лс} + 20 \lg\{K_{\text{отр}}\} + 20 \lg\{a_{лс}\} - 10 \lg\{Y_1\}, \quad (15)$$

где Y_1 – поправочный коэффициент, зависящий от $a_{лс}$ и определяемый методами численного интегрирования.

2) Произведен анализ ожидаемой помехозащищенности указанных выше регенераторов от ПВ. Показано, что при использовании предсказаний не оказывает влияния на ожидаемые защищенности регенератора от ПВ на БК и ДК, расчетные соотношения для которых соответствуют ранее полученным (6) и (7). Более эффективно использование РОС, соответствующие расчетные соотношения для которого имеют вид:

$$A_{3, \text{рос}}^{(бк)} = A_6(f_1) + 15 \lg\{f_c/f_1\} - 10 \lg\{C_n\} - 18,8 - a_{лс} + 20 \lg\{0,23a_{лс}\} - 10 \lg\{Y_2\}, \quad (16)$$

где Y_2 – поправочный коэффициент, зависящий от $a_{лс}$ и определяемый методами численного интегрирования.

$$A_{3, \text{рос}}^{(лк)} = -10 \lg\{C_n\} - 6 - 10 \lg\{f_c/f_1\}^{1,5} Y_3 \text{dec}[-0,1A_6(f_1)] + (f_c/f_1)^m (l_p/l_1) Y_4 \text{dec}[-0,1A_{3, \text{лс}}(f_1, l_1)], \quad (17)$$

где Y_3 и Y_4 – постоянные поправочные коэффициенты, определяемые методами численного интегрирования.

При совместном использовании РОС и предсказаний соотношения для ожидаемых защищенностей регенератора от ПВ на БК и ДК соответствуют (16) и (17).

3) Произведен анализ ожидаемой защищенности от суммарной помехи (3) для двух- и однокабельных однополосных вариантов сети, использующих параллельное включение M однотипных двух- и четырехпроводных ЦСП с АИМ линейным сигналом и перечисленные методы коррекции МСИ.

4) Произведен анализ ожидаемой защищенности от суммарной помехи регенератора ЦСП с АИМ линейным сигналом при использовании одного из методов помехоустойчивого кодирования – технологии ТС-РАМ, при которой трехразрядная комбинация исходного цифрового потока заменяется на четырехразрядную с введением проверочного символа. Показано, что для данного случая расчетные соотношения для составляющих ожидаемой защищенности определяются по (4), (6) и (7) соответственно, с учетом того, что символьная частота АИМ линейного сигнала увеличивается в 4/3 раза, а выражение (3) принимает вид:

$$A_{3\Sigma} = -10 \lg\{\text{dec}(A_{3\text{м}}) + \sum_{i=1}^{N_1} \text{dec}(A_3^{(бк)}) + \sum_{i=1}^{N_2} \text{dec}(A_3^{(лк)})\} + E, \quad (18)$$

где E – кодовое усиление помехоустойчивого кодирования, в дБ.

5) Произведен анализ ожидаемой защищенности от суммарной помехи (18) для двух- и однокабельных однополосных вариантов сети, использующих параллельное

включение M однотипных двух- и четырехпроводных ЦСП с АИМ сигналом использующих помехоустойчивое кодирование с разными значениями E .

б) Произведены численные расчеты предельной длины участка регенерации для указанных вариантов сети связи и ЦСП, которые обеспечивают скорости передачи от 256 до 2320 кбит/с, используют АИМ сигналы с Z , равным 4, 8, 16, 32 и 64 и работают по различным типам кабельных линий для вариантов: а) ЦСП используют только альтернативные методы коррекции МСИ; б) ЦСП используют только методы помехоустойчивого кодирования, обеспечивающие кодовое усиление 1, 2, 3, и 5 дБ для значений избыточности 21/20, 11/10, 23/20, 6/5, 4/3.

В результате анализ полученных результатов были сформулированы выводы:

1) Все методы альтернативной коррекции МСИ позволяют получить выигрыш в предельной длине участка регенерации, в частности:

- использование предсказаний позволяет улучшить ожидаемую защищенность от собственных шумов. Выигрыш в предельной длине участка регенерации при этом наблюдается только для двухкабельного варианта сети и четырехпроводной ЦСП с полудуплексной передачей и однокабельного варианта сети и двухпроводной ЦСП с дуплексной передачей при работе 1 системы. Его величина составляет около 6-7%, при этом оптимальная величина отрезка регенерационного участка, неравномерность которого корректируется с помощью блока предсказаний, составляет $l_{\text{кор}} = 0,4l_p$.

- использование РОС позволяет улучшить ожидаемую защищенность как от собственных шумов, так и ПВ на БК и ДК. Выигрыш в предельной длине участка регенерации составляет от 40 до 50% в зависимости от варианта сети, скорости передачи и типа кабельной линии.

- совместное использование РОС и предсказаний по сравнению с РОС незначительно увеличивает помехозащищенность от собственных шумов и обеспечивает выигрыш в длине участка 1-2% только для двухкабельного варианта сети и четырехпроводной ЦСП с полудуплексной передачей и однокабельного варианта сети и двухпроводной ЦСП с дуплексной передачей при работе 1 системы. Его величина составляет около 1-2%, при $l_{\text{кор}} = 0,2l_p$.

2) Применение помехоустойчивого кодирования в зависимости от выбранного метода и вводимой избыточности может как давать выигрыш в предельной длине участка, так и не давать. В частности, известная помехокорректирующая технология кодирования ТС-РАМ имеет значительную избыточность 4/3, что приводит к снижению суммарной помехозащищенности на 7 дБ в широком диапазоне исходных скоростей передачи и типов линий связи, в то время как обеспечиваемое кодовое усиление составляет только порядка 5 дБ.

Следовательно, в данном случае следует использовать более эффективные технологии помехокорректирующего кодирования. Например, для значений кодового усиления 1, 2, 3 и 5 дБ максимальные значения избыточности K_k должны составлять не более 1,05; 1,1; 1,15 и 1,2 соответственно.

В пятой главе произведена разработка новых вариантов структурного синтеза ЦСП и методики их анализа. Были рассмотрены:

1) Структура ЦСП с двухполосной дуплексной передачей по одной паре и использованием различных типов линейных сигналов для разных направлений: для НЧ направления передачи – АИМ линейный сигнал, а для ВЧ – CAP(QAM) [19, 20, 23, 27]. Показано, что для такого варианта, предельная длина участка определяется

ВЧ направлением передачи, а составляющие защищенности (3) определяются соответственно по (10) и (12) с учетом соответствующего b , обеспечивающего частотное разделение направлений. Произведен анализ ожидаемой защищенности от суммарной помехи (3) для параллельной работы по одному кабелю M однотипных ЦСП: двухпроводных ($N_1=0$, $N_2=(M-1)$, $b=1+2n_2/n_1$, $f_{c1}=f_T/n_1$, $f_{c2}=f_T/2n_2$) и четырехпроводных ($N_1=0$, $N_2=(2M-1)$, $b=1+2n_2/n_1$, $f_{c1}=f_T/2n_1$, $f_{c2}=f_T/4n_2$), где n_1 и n_2 – количество разрядов исходного цифрового потока, передаваемых одним символом АИМ и CAP(QAM) линейных сигналов, соответственно.

2) Использование адаптивной компенсации помехи от ПВ на БК «своей» второй пары четырехпроводной ЦСП [1]. Произведен анализ ожидаемой защищенности от суммарной помехи (3) для параллельного включения M однотипных ЦСП с АИМ сигналом: с однополосной полудуплексной передачей ($N_1=(M-1)$, $N_2=(2M-1)$, $f_c=f_T/n$); с однополосной дуплексной передачей ($N_1=2(M-1)$, $N_2=2(M-1)$, $f_c=f_T/2n$). При этом составляющие (3) определяются соответственно по (4), (6) и (7).

3) Использование для четырехпроводных ЦСП дополнительной, так называемой фантомной, цепи (ФЦ) [21, 22, 24–26, 28–30]. Произведен анализ ожидаемой помехозащищенности (3) для работы четырехпроводной ЦСП по одночетверчному кабелю для следующих вариантов передачи по ФЦ:

а) Использование ФЦ для однополосной дуплексной передачи однотипных АИМ линейных сигналов, при котором осуществляется разделение исходного цифрового потока на 3 подпотока, два из которых в однополосном дуплексном режиме передаются по парам кабеля, а третий – по ФЦ ($N_1=1$, $N_2=1$, $f_c=f_T/3n$) [21, 22, 24, 28]. При этом составляющие (3) определяются соответственно по (4), (6) и (7).

б) Использование ФЦ для двухполосной дуплексной передачи разнотипных линейных сигналов, при котором осуществляется разделение исходного цифрового потока на 3 подпотока, два из которых в двухполосном дуплексном режиме передаются по физическим парам, а третий – по ФЦ [21, 22, 25, 29]. При этом для низкочастотного направления используется АИМ, а для высокочастотного – CAP(QAM) линейный сигнал ($N_1=0$, $N_2=1$, $b=1+2n_2/n_1$, $f_{c1}=f_T/6n_1$). При этом составляющие (3) определяются соответственно по (10) и (12).

в) Использование ФЦ для полудуплексной передачи сигнала, при котором в одном из направлений исходный цифровой поток делится на два подпотока и передается в полудуплексном режиме по двум физическим парам, а в другом – полный цифровой поток передается в полудуплексном режиме по ФЦ ($N_1=0$, $N_2=0$) [21, 22, 26, 30]. При этом составляющая защищенности от собственных шумов в (3) определяется по (4).

4) Произведены численные расчеты предельной длины участка регенерации для однокабельной сети с использованием перечисленных построений ЦСП для различных скоростей передачи и параметров кабелей. В результате анализа полученных результатов были сформулированы выводы:

1) Использование двухполосной дуплексной передачи и различных типов линейных сигналов позволяет обеспечить независимость предельной длины участка от M , а по сравнению с ЦСП с CAP(QAM) линейными сигналами и двухполосной пе-

редачей – удешевить ЦСП за счет упрощения структуры НЧ направления передачи, причем при выборе определенных типов линейных сигналов (значений n_1 и n_2) в разных направлениях передачи можно дополнительно увеличить длину участка.

б) Адаптивная компенсация ПВ на БК позволяет обеспечить максимально возможную длину участка при работе на кабеле одной четырехпроводной ЦСП, а при параллельной работе на кабеле нескольких однотипных ЦСП – уменьшить число источников помех от ПВ на БК и, тем самым, дополнительно увеличить предельную длину участка на 5-10% по сравнению с четырехпроводными ЦСП без компенсации.

в) Использование ФЦ наиболее целесообразно при работе одной четырехпроводной ЦСП по одночетверочному кабелю. Для всех случаев они позволяют увеличить пропускную способность четырехпроводной кабельной линии связи и предельную длину участка регенерации по сравнению с использованием традиционных, соответствующих по построению четырехпроводных ЦСП за счет дополнительного снижения символьной частоты линейного сигнала. ФЦ с однополосной дуплексной передачей наиболее предпочтительно использовать совместно с адаптивной компенсацией ПВ на БК между основными парами. Это позволяет обеспечить выигрыш около 80% по предельной длине участка в сравнении, например, с адаптивной компенсацией ПВ на БК без использования ФЦ. Однако при этом следует учитывать неизбежное усложнение структуры ЦСП – наличие дополнительного комплекта приемно-передающего оборудования для третьего подпотока.

г) ФЦ с полудуплексной передачей позволяет получить результаты для предельной длины участка регенерации, практически сопоставимые с результатами ЦСП с адаптивной компенсацией без ФЦ. При этом дополнительно обеспечивается значительное упрощение структуры ЦСП (три комплекта передающего и приемного оборудования) и отсутствие сложных алгоритмов обработки сигнала (адаптивной эхокомпенсации и компенсации ПВ на БК)

В шестой главе указываются формы внедрения результатов диссертации, основными из которых являются:

1. Разработанные методики расчета и программное обеспечение, позволяющие значительно сократить сроки и стоимость проектно-конструкторских работ, и уже на предварительном этапе проектирования осуществить обоснованный выбор построения проектируемой ЦСП или сети связи.

2. Предложенное значительное число вариантов структурной и параметрической оптимизации, которые, будучи защищенными 8 заявками на патент, увеличивают подмножество «нехудших» вариантов построения проектируемой ЦСП или сети и тем самым расширяют возможности выбора наиболее эффективного варианта.

3. Использование результатов диссертации при разработке, испытаниях, сертификации и серийном производстве двух изделий, выпускаемых в Республике Беларусь: предприятие «Микст» (г. Минск), малоканальная цифровая система передачи МТ-12DSL и цифрового модема МТ-Е1.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертационная работа представляет комплексное научное исследование, посвященное решению важной научно-технической задачи анализа и оптимизации ЦСП для кабельной сети абонентского доступа («последней мили»). Эта задача является составной частью глобальной задачи цифровизации мировой телекоммуникационной инфраструктуры. В результате выполнения работы получены следующие результаты:

1) Впервые разработаны математические модели прохождения линейных сигналов, шумов и переходных помех по трактам ЦСП с технологией передачи xDSL, и на их основе впервые разработаны методики расчета предельно допустимой длины участка регенерации для систем, использующих многоуровневые амплитудно-импульсные и квадратурные (АИМ и CAP(QAM)) линейные сигналы, при этом модели и методики пригодны для различных типов кабельных линий, скоростей передачи и вариантов организации абонентского доступа [1, 3].

2) На основе разработанного программного обеспечения и произведенных расчетов предельно допустимой длины участка регенерации впервые научно обоснованы оптимальные параметры линейных сигналов и отдельных блоков ЦСП, зависящие от вида модуляции, скорости передачи, числа параллельно работающих ЦСП и других условий [1-4, 9].

3) Впервые предложены новые структуры построения ЦСП для сети абонентского доступа, отличающиеся использованием разных типов линейных сигналов для двух направлений передачи, адаптивной компенсации ПВ на БК от «своей» второй пары четырехпроводной ЦСП, а также использованием фантомной цепи [19-22].

4) Для предложенных структур построений ЦСП впервые разработаны методики расчета предельно допустимой длины участка регенерации и произведено сравнение их показателей качества с известными вариантами построения [19-22].

5) Показано, что по совокупности показателей не существует одного «абсолютно лучшего» варианта построения ЦСП, технологии передачи и схемы организации связи [1, 3, 9, 12].

6) Обоснованные в диссертации рекомендации и таблицы расчетных данных целесообразно использовать для практического применения, в частности, в задачах выбора оптимального варианта среди альтернативных «абсолютно не худших» вариантов с учетом конкретных предпочтений проектировщика или пользователя (оператора) сети связи. Ряд из них использован при проектировании и серийном производстве аппаратуры связи на предприятии «Микст» г. Минск: системы связи цифровой малокабельной MT-12DSL и модема MT-E1 [2, 3].

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в научно-технических журналах

1. Кириллов В. И., Белко А. И. Расчет длины регенерационного участка для ЦСП по технологиям HDSL и SDSL // Электросвязь (Москва). - 2001. - №10. - С. 20-23.
2. Кириллов В. И., Белко А. И. Эффективность технологий линейного кодирования для цифровых систем передачи абонентских линий// Электросвязь (Москва). - 2002. - №11. - С. 15-18.
3. Кириллов В. И., Белко А. И. Эффективность использования CAP(QAM) технологии для ЦСП проводного и беспроводного абонентского доступа// Электросвязь (Москва). - 2003.-№10. – С. 32-36.
4. Кириллов В. И., Белко А. И. Двухпроводные ЦСП для сети абонентского доступа// Доклады БГУИР. – 2004. - №2(6). – С. 66-77.

Статьи в сборниках материалов конференций

5. Кириллов В. И., Белко А. И. Методы построения цифровой первичной сети для «последней мили»// Материалы 3 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №2(6)/1. - 1998. - С. 31-34.
6. Кириллов В. И., Белко А. И. Сравнительный анализ методов построения цифровой первичной сети для “последней мили”// Материалы международной научно-технической конференции «Новые информационные технологии в науке и производстве». - Мн., 1998. - С.101-104.
7. Кириллов В. И., Белко А. И. Анализ эффективности абонентских цифровых систем передачи по технологии XDSL// Материалы 5 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №1(6)/1. - 2000. - С. 72-75.
8. Кириллов В.И., Белко А.И., Жаденов О.А. Сравнительный анализ технологий построения цифровых абонентских сетей// Материалы VI Международной НТК «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - № 1(11)/1, Мн.: 2001. - С. 52-54.
9. Кириллов В. И., Белко А. И. Эффективность методов линейного кодирования в цифровых системах передачи абонентских линий// Материалы 6 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №1(11)/1. - 2001. - С. 55-58.
10. Кириллов В. И., Белко А. И. Помехозащищенность цифровых систем передачи по технологии MDLS// Материалы 6 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №1(11)/1. - 2001. - С. 59-61.
11. Кириллов В. И., Белко А. И. Математическая модель цифровой системы передачи абонентского доступа по технологии CAP(QAM)// Материалы 7 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №2(14)/1. - 2002. - С. 52-54.
12. Кириллов В. И., Белко А. И. Сравнительный анализ цифровых систем передачи абонентского доступа по технологии CAP(QAM)// Материалы 7 международ-

ной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии - №2(14)/1. - 2002. - С. 55-57.

13. Кириллов В. И., Белко А. И., Сяница В.Н., Жаденов О.А. Алгоритм математического моделирования кодов и сигналов в цифровых системах передачи по технологии xDSL// Материалы 7 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №2(14)/1. - 2002. - С. 58-60.

14. Кириллов В. И., Белко А. И., Сяница В.Н., Жаденов О.А. Анализ результатов имитационного моделирования линейных сигналов в цифровых системах передачи по технологии xDSL// Материалы 7 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №2(14)/1. - 2002. - С. 61-63.

15. Кириллов В. И., Белко А. И., Дубин В.А., Соборова И.Г., Супрун А.Н., Жаденов О.А. Основные факторы, определяющие эффективность работы цифровых систем передачи по медным кабелям// Материалы 7 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №2(14)/1. - 2002. - С. 46-48.

16. Кириллов В. И., Белко А. И., Дубин В.А., Соборова И.Г., Супрун А.Н., Жаденов О.А. Влияние системных ограничений на предельную длину регенерационного участка ЦСП// Материалы 7 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №2(14)/1. - 2002. - С. 49-51.

17. Кириллов В. И., Белко А. И., Сяница В.Н., Жаденов О.А. Математическое моделирование цифровых систем передачи для «последней мили»// Материалы 1 международной научно-технической конференции «Информационные системы и технологии (IST'2002)». – Мн., 2002.- №1(1)/1. – С. 261-267.

18. Кириллов В. И., Белко А. И., Малашкевич Д.Ф. Экспериментальное исследование высокоскоростных фантомных цепей на проводных линиях связи// Материалы 8 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №1(15)/3. - 2003. - С. 27-29.

19. Кириллов В. И., Белко А. И., Соборова И.Г., Сухвал Ю.А. Оптимизация структуры двухпроводных ЦСП по технологии xDSL// Материалы 8 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №1(15)/3. - 2003. - С. 30-32.

20. Кириллов В. И., Белко А. И. Сравнительный анализ эффективности двухпроводных ЦСП по технологии xDSL// Материалы 8 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №1(15)/3. - 2003. - С. 33-35.

21. Кириллов В. И., Белко А. И. Варианты построения четырехпроводных ЦСП по технологии xDSL // Материалы 8 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №1(15)/3. - 2003. - С. 36-38.

22. Кириллов В. И., Белко А. И. Сравнительный анализ эффективности вариантов построения четырехпроводных ЦСП по технологии xDSL // Материалы 8 международной научно-технической конференции «Современные средства связи»/ Известия Белорусской инженерной академии. - №1(15)/3. - 2003. - С. 39-41.

Патенты и заявки на изобретения

23. Заявка на патент Республики Беларусь. Двухпроводная цифровая система передачи / Кириллов В.И., Белко А.И., Дубин В.А., Соборова И.Г. - № а20020972; заявл. 02.12.2002.

24. Заявка на патент Республики Беларусь. Четырехпроводная цифровая система передачи / Кириллов В.И., Белко А.И., Дубин В.А., Соборова И.Г. - № а20021031; заявл. 16.12.2002.

25. Заявка на патент Республики Беларусь. Цифровая система передачи для четырехпроводной линии связи / Кириллов В.И., Белко А.И., Соборова И.Г. - № а20030239; заявл. 10.03.2003.

26. Заявка на патент Республики Беларусь. Устройство преобразования сигналов для четырехпроводной цифровой системы передачи / Кириллов В.И., Белко А.И., Соборова И.Г., Сухвал Ю.А., Савчук Н.Н. - № а20030992; заявл. 31.10.2003.

27. Заявка на патент Российской Федерации. Двухпроводная цифровая система передачи / Кириллов В.И., Белко А.И., Дубин В.А., Соборова И.Г. - № 2002133006/09(034863); заявл. 06.12.2002.

28. Заявка на патент Российской Федерации. Четырехпроводная цифровая система передачи / Кириллов В.И., Белко А.И., Дубин В.А., Соборова И.Г. - № 2002135210/09(036963); заявл. 24.12.2002.

29. Заявка на патент Российской Федерации. Цифровая система передачи для четырехпроводной линии связи / Кириллов В.И., Белко А.И., Соборова И.Г. - № 2003107796/09(008258); заявл. 21.03.2003.

30. Заявка на патент Российской Федерации. Устройство преобразования сигналов для четырехпроводной цифровой системы передачи / Кириллов В.И., Белко А.И., Соборова И.Г., Сухвал Ю.А., Савчук Н.Н. - № 2003132605; заявл. 06.11.2003.



Библиотека

Бялко Андрэй Іванавіч

АНАЛІЗ І СТРУКТУРНА-ПАРАМЕТРЫЧНЫ СІНТЭЗ ЛІЧБАВЫХ СІСТЭМ АБАНЕНЦКАГА ДОСТУПУ

Ключавыя словы: лічбавая сістэма перадачы, кабельная сетка, абаненцкі доступ, лінейны сігнал, эфектыўнасць перадачы, гранічная даўжыня ўчастку рэгенерацыі, структурна-параметрычны сінтэз лічбавых сістэм перадачы.

Прадмет даследавання: лічбавыя сістэмы перадачы для кабельнай сеткі абаненцкага доступу.

Мэта работы: распрацоўка метадык аналізу існуючых тыпаў лічбавых сістэм перадачы для кабельнай сеткі абаненцкага доступу, распрацоўка варыянтаў іх структурна-параметрычнага сінтэзу, распрацоўка практычных парад па выкарыстанню лічбавых сістэм перадачы па тэхналогіі xDSL для розных варыянтаў пабудовы сеткі абаненцкага доступу.

Метад даследавання: метады спектральнага аналізу лінейных сістэм, тэорыя многаканальнай лічбавай сувязі, тэорыя кабельных ліній сувязі, эксперыментальная праверка тэарэтычных вынікаў даследавання пры сертыфікацыі і эксплуатацыі лічбавых сістэм перадачы па тэхналогіі xDSL.

Вынікі работы: распрацаваны метадыкі разліку гранічнай даўжыні ўчастку рэгенерацыі для існуючых тыпаў лічбавых сістэм перадачы па тэхналогіі xDSL. З дапамогай атрыманых метадык праведзен параўнальны аналіз эфектыўнасці сістэм перадачы, выкарыстоўваючых лінейныя сігналы з амплітудна-імпульснай і квадратурнай мадуляцыяй для існуючых варыянтаў пабудовы кабельнай сеткі абаненцкага доступу. Распрацаваны варыянты структурна-параметрычнага сінтэзу лічбавых сістэм перадачы і метадыкі іх аналізу. Вызначаны гранічныя магчымасці лічбавых тэхналогій перадачы xDSL, выкарыстоўваючыхся на кабельнай сеткі абаненцкага доступу. Выпрацаваны рэкамендацыі па іх практычнаму выкарыстанню для існуючых варыянтаў пабудовы сеткі доступу.

Вынікі дысертацыі могуць быць выкарыстаны ў галіне многаканальнай электрычнай сувязі.

Белко Андрей Иванович

АНАЛИЗ И СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА

Ключевые слова: цифровая система передачи, кабельная сеть, абонентский доступ, линейный сигнал, эффективность передачи, предельная длина участка регенерации, структурно-параметрический синтез цифровых систем передачи.

Предмет исследования: цифровые системы передачи для кабельной сети абонентского доступа.

Цель работы: разработка методик анализа существующих типов цифровых систем передачи для кабельной сети абонентского доступа, разработка вариантов структурно-параметрического синтеза цифровых систем передачи, разработка практических рекомендаций по применению цифровых систем передачи по технологии xDSL для существующих вариантов построения абонентской сети доступа.

Метод исследования: методы спектрального анализа линейных систем, теория многоканальной цифровой связи, теория кабельных линий связи, экспериментальная проверка теоретических результатов исследования при сертификации и эксплуатации цифровых систем передачи по технологии xDSL.

Результаты работы: разработаны методики расчета предельной длины участка регенерации для существующих типов цифровых систем передачи по технологии xDSL. С помощью полученных методик произведен сравнительный анализ эффективности систем передачи, использующих линейные сигналы с амплитудно-импульсной и квадратурной модуляцией для существующих вариантов построения кабельной абонентской сети доступа. Разработаны варианты структурно-параметрического синтеза цифровых систем передачи и методики их анализа. Определены предельные возможности различных цифровых технологий передачи, использующихся на кабельной сети абонентского доступа. Выработаны рекомендации по их практическому применению.

Результаты диссертации могут быть использованы в области многоканальной электросвязи.

SUMMARY

Belko Andrey Ivanovich

**THE ANALYSIS AND STRUCTURAL-PARAMETRICAL SYNTHESIS
OF SUBSCRIBER ACCESS DIGITAL SYSTEMS**

Keywords: digital transmission system, cable network, subscriber access, line signal, efficiency of transmission, regenerator section limit length, structural-parametrical synthesis of digital transmission systems.

Subject of investigation is digital transmission systems for a subscriber access cable network.

Goal of the work is a development of the analysis methods of existing types of digital transmission systems for a subscriber access cable network, variants of digital transmission systems structural-parametrical synthesis development, the practical guidelines on various types of the digital transmission systems for different variants build-up of the subscriber access network application in view of concrete service conditions development.

Method of investigation is linear systems spectrum analysis methods, a theory of the multichannel digital communications, a theory of cable lines, an experimental check of research theoretical result at certification and maintenance of digital transmission systems with xDSL technology.

Results of the work: methodologies of a regenerator section limit length calculation for existing types of xDSL digital transmission systems are designed. With the help of the obtained methodologies the comparative analysis of the operating efficiency of transmission systems with pulse-amplitude and quadrature modulation line signals for existing variants of the cable subscriber access network. The variants of digital transmission systems structural-parametrical synthesis and their analysis methodologies are designed. The extreme possibility of xDSL digital transmission technologies for a subscriber access cable network are defined. The guidelines on existing types of transmission systems practical application for different variants of the access network build-up are worked out.

The results of a thesis can be used in the field of multichannel telecommunication.

Белко Андрей Иванович

**АНАЛИЗ И СТРУКТУРНО-ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ СИНТЕЗ
ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА**

Специальность 05.12.13 – Системы, сети и устройства телекоммуникаций

Автореферат диссертации

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 20.07.2004

Бумага офсетная.

Уч.-изд. л. 1,4.

Печать ризографическая.

Тираж 80 экз.

Формат 60x84 1/16.

Усл. печ. л. 1,63.

Заказ 464.

Издатель и полиграфическое исполнение: Учреждение образования

«Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»

Лицензия на осуществление издательской деятельности №02330/0056964 от 01.04.2004.

Лицензия на осуществление полиграфической деятельности №02330/0133108 от 30.04.2004.

220013, Минск, П. Бровки, 6