

На правах рукописи

Кочеров Андрей Владимирович

**РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИЗМЕРЕНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК
КАБЕЛЕЙ СВЯЗИ ПРИ ВНЕДРЕНИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕТЕЙ
ШИРОКОПОЛОСНОГО ДОСТУПА**

Специальность 05.12.13 -
«Системы, сети и устройства телекоммуникаций»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 2008

Работа выполнена на кафедре метрологии, стандартизации и измерений в технике связи Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский технический университет связи и информатики» (ГОУВПО «МТУСИ»).

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Хромой Борис Петрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Портнов Эдуард Львович,
кандидат технических наук
Гурин Олег Иванович

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное предприятие
Ленинградский отраслевой научно-исследовательский
институт связи (ФГУП ЛОНИИС)

Защита диссертации состоится «___» _____ 2008 года в _____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 219.001.03 при ГОУВПО «Московский технический университет связи и информатики» по адресу: 111024, Москва, ул. Авиамоторная, д. 8а, ауд. А-455.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2008 года.

Учёный секретарь совета по защите
докторских и кандидатских
диссертаций

Т. П. Косичкина

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Наличие доступа к информации всегда являлось привилегией господствующего класса. Отличительной чертой настоящего времени является доступность информации для каждого члена человеческого сообщества, что составляет одно из условий как технологического, так и общественного прогресса.

Значительные информационные ресурсы оперативно доступны пользователю при условии, что последний подключен к сети Интернет, выход в который изначально (отчасти и по сей день) обеспечивался с применением телефонных сетей общего пользования (ТфОП) путем их вторичного уплотнения. Автор гордится тем, что с начала 90-х годов, когда компьютерные сети корпоративного и общего пользования начали широко развиваться и в России, он, являясь сотрудником компании ООО «Аналитик-ТС» (зарегистрированная торговая марка AnCom), внес свой скромный вклад в этот процесс участием в разработке норм на электрические параметры каналов сети ТфОП. Это стало возможным благодаря опыту, приобретенному автором при разработке семейства помехоустойчивых телефонных модемов AnCom ST, анализаторов телефонных каналов серии AnCom TDA-5 и исследовании вопросов обеспечения измерений и нормирования телефонных каналов.

Разработка норм была инициирована в первой половине 90-х годов Министерством связи, преследовавшим цель обеспечения конкурентоспособности услуг национальных операторов сети ТфОП на открывавшемся в то время для иностранных компаний телекоммуникационном рынке страны. Причем основное внимание уделялось качеству услуг документальной электросвязи, реализуемых с применением устройств передачи данных – модемов.

Скорость доступа, обеспечиваемая телефонным модемом, росла с 1,2 кбит/с в 1980 году (рек. ITU-T V.22) до 33,6 кбит/с в 1998 (рек. ITU-T V.34) и остановилась на значении 56,0 кбит/с в 2000 году (рек. ITU-T V.92), полностью исчерпав скоростной потенциал каналов сети ТфОП.

Тем не менее, как отмечалось в одном из выпущенных Центральным научно-исследовательским институтом связи (ЦНИИС) отчетов о НИР, «установить нормы на каналы связи сети только исходя из требований обеспечения необходимого качества телефонной и документальной электросвязи будет неверным. Необходимо учитывать реальные возможности каналов сети, которая создавалась на протяжении нескольких десятилетий на базе технических средств, при разработке которых даже не ставились задачи обеспечения современных требований телефонной и, тем более, документальной электросвязи. Таким образом, процесс нормирования сводится к поиску разумного компромисса между требованиями к сети, обеспечивающими приемлемое качество телефонной и документальной электросвязи, и возможности сети обеспечить эти требования».

Указанный компромисс был достигнут созданием норм и технических требований к системе автоматизированных измерений нормированных параметров. Такая система была разработана и, получив название AnCom ПАИК, используется на сети с 1997 года по настоящее время. Впоследствии аналогичные нормы не без участия автора были приняты в 2000 году в Казахстане и в 2006 году – в Белоруссии.

Таким образом, функционирование традиционной телефонной сети общего пользования с коммутацией каналов, было обеспечено нормативной базой, которая позволила определить требования к этой сети при ее использовании для предоставления услуг документальной электросвязи. С середины 90-х годов дальнейшее развитие фиксированной связи с использованием

развитой инфраструктуры абонентских кабельных сетей продолжилось с применением цифровых абонентских линий различных типов, получивших собирательное наименование xDSL (x Digital Subscriber Line – цифровая абонентская линия x-типа), которые и обеспечили массовое развитие сетей широкополосного доступа (ШПД).

Революционное увеличение скорости доступа на два порядка во второй половине 90-х годов (8 Мбит/с посредством ADSL по рек. ITU-T G.992.1) и еще на порядок к настоящему времени (до 100 Мбит/с - VDSL2 по рек. ITU-T G.993.2) было обеспечено за счет расширения используемой полосы частот соответственно до 1,1 МГц и до 12 МГц и путем увеличения точности обработки сигнала, выражающемся в росте кратности модуляции с 8 до 15 бит на передаваемый символ.

Такой прогресс был обусловлен как ростом возможностей операционных средств, так и нормированием параметров линейно-кабельных сооружений (ЛКС), что вылилось в разработку ряда международных стандартов, определяющих принципы нормирования цифровых линий, которые частично использованы в отечественных стандартах и правилах. Однако даже совокупность указанных документов не может быть непосредственно применена ни оператором связи при выполнении работ по проектированию и строительству сетей доступа, ни разработчиком соответствующих средств измерений (СИ), чью сторону представляет автор, при создании спецификации такого СИ.

В Белоруссии в 2006 году в кратчайшие сроки ГУП «Гипросвязь» (Минск) были разработаны требования к ЛКС, предназначенным для установки цифровых линий, однако эти документы не затрагивают вопросов обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) цифровых линий в сети ШПД при проектировании, строительстве, эксплуатации и развития сети.

В 2007 году приняты стандарты предприятия ОАО «Укртелеком», разработанные ГП «ОНИИС» (Одесса). Среди прочих вопросов стандарты регламентируют обеспечение ЭМС линий в масштабе сети доступа.

В России нормативные документы, определяющие процесс цифрового уплотнения абонентских линий, были разработаны в ЛОНИИС (Санкт-Петербург) еще в середине 90-х годов, но эти нормы, к сожалению, не могут быть непосредственно применены для проектирования и строительства сетей с использованием современных xDSL. Поэтому можно констатировать, что в настоящее время в России отсутствует развитая нормативная база по вопросам ЭМС xDSL в сетях ШПД. По этой причине СИ, применяемые на сетях и поступающие от зарубежных фирм, используются вместе с теми методиками выполнения измерений (МВИ), которые разработаны их производителями, но идеология нормирования и выполнения измерений практически скрыта.

Таким образом, актуальность настоящей диссертационной работы обусловлена необходимостью создания системы норм, эффективного СИ параметров и характеристик ЛКС сетей ШПД и МВИ, совокупно обеспечивающих устойчивое функционирование сети ШПД в соответствии со статьями 12, 21, 41 и 46 федерального закона «О связи».

Целями работы и задачами исследования являются обобщение имеющихся данных, обоснование выбора системы норм характеристик ЛКС сетей ШПД, формирование технических требований к соответствующим СИ, определение принципов функционирования таких СИ и составление МВИ, обеспечивающей проведение контроля ЛКС при отсутствии негативных влияний со стороны СИ на функционирование работающих фрагментов сети ШПД.

Методы исследования. В работе использованы методы имитационного моделирования, теории передаточных функций, теории цифровой обработки сигналов, спектрального и

корреляционного анализа. Все натурные эксперименты выполнены с использованием анализатора систем передачи и кабелей связи AnCom A-7. Все вычисления выполнены автором самостоятельно с использованием программных средств, созданных, в том числе, в процессе разработки указанного выше СИ.

Научная новизна диссертации заключается в следующем:

1. Разработаны математические модели линий ADSL и SHDSL, объединяющие алгоритмы формирования сигналов передатчика, запас помехозащищенности, скорость и условия передачи, характеризуемые длиной линии и характеристиками взаимовлияний.
2. На основе сформированной математической модели ADSL получены характеристики спектральной плотности мощности (СПМ) интерференционных помех ADSL, учитывающие, в том числе, влияние неоднородностей.
3. Основываясь на нормах и моделях переходных влияний, моделях цифровых линий и их скоростных характеристиках определены формулы для расчета предельно допустимой СПМ помех для ADSL и SHDSL на стационарном и абонентском окончаниях.
4. Обоснована возможность измерения параметров и характеристик ЛКС, применяемых для создания сетей ШПД-xDSL, с использованием универсального многочастотного измерительного сигнала, позволяющего получить характеристики во временной и частотной областях.

Личный вклад автора. Основные результаты, приведенные в диссертационной работе, включая программное обеспечение анализатора систем передачи и кабелей связи AnCom A-7 в части формирования и анализа измерительных сигналов, система норм ЛКС для ШПД-xDSL и МВИ, реализуемые указанным анализатором, получены автором лично.

Практическая ценность диссертации.

1. Проанализированы нормативные документы, определяющие принципы построения и алгоритмы функционирования систем передачи xDSL и требования к ЛКС сетей ШПД.
2. Для цифровых линий ADSL и SHDSL сформулированы математические модели, включающие модели приемопередатчиков, передаточные характеристики и характеристики взаимных влияний.
3. Получены программные модели цифровых линий ADSL и SHDSL, пригодные для реализации средствами малопотребляющих контроллеров, встраиваемых в специализированное СИ.
4. Систематизированы требования, позволяющие указать спектральную плотность предельно допустимых помех на окончании пары в кабеле известных маркоразмера и длины, применяемой для установки приемопередатчиков цифровой линии известного типа в зависимости от требуемого запаса помехозащищенности и предельного количества цифровых линий в кабеле.
5. Обоснована возможность определения параметров и характеристик ЛКС в частотной области (рабочее затухание, импеданс, затухание отражения, переходное затухание) и временной (рефлектометр) области, применяемых для создания сетей ШПД-xDSL, с использованием многочастотного измерительного сигнала.
6. Вся совокупность полученных результатов была использована автором при разработке анализатора систем передачи и кабелей связи AnCom A-7, серийно производимого компанией ООО «Аналитик-ТС» с 2003 года и применение которого в соответствии с МВИ,

разработанной автором и входящей в состав эксплуатационной документации анализатора, определяет дисциплину инсталляции и обеспечивает квалифицированное принятие решения о необходимости проведения ремонтно-восстановительных работ на сети ШПД-xDSL.

7. Материалы диссертации использованы автором для ведения семинаров, проводимых Институтом повышения квалификации МТУСИ, а так же для организации контроля кабельной продукции на предприятии ООО «НПП «Информсистема».

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 10 статьях, среди которых 4 личных.

Апробация работы. Основные положения и результаты исследований докладывались автором на 5 семинарах и конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и 13 приложений. Работа содержит 235 листов, в том числе 55 рисунков, 30 таблиц, 58 страниц приложений. Библиография включает 120 наименований.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Устойчивость функционирования сети ШПД-xDSL достигается разработкой и применением системы норм, определяющих требования к ЛКС, используемым в сетях ШПД-xDSL.
2. Нормы условий ЭМС цифровых линий в сетях ШПД-xDSL учитывают как возможности приемопередатчиков цифровых линий, так и возможности, обеспечиваемые ЛКС.
3. Определение условий соответствия нормам выполняется средством измерений, способным оперативно обеспечивать проведение измерительных работ, эффективность которых определяется гибкостью возможностей диагностики состояния ЛКС и условий ЭМС цифровых линий ШПД, скоростью проведения измерений и разнообразием представляемых характеристик измеряемого объекта.
4. Для обеспечения эффективного функционирования средства измерений применяется универсальный измерительный сигнал, обеспечивающий измерения характеристик отражения, симметрии и передачи во временной и частотной областях.

Краткое содержание работы

Во **Введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задача работы, перечислены основные научные результаты диссертации, определены практическая ценность и область применения результатов, приведены сведения об апробации работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** диссертации приведены общие характеристики приемопередатчиков цифровых линий, позволяющие составить представление об используемых диапазонах частот и уровнях сигналов приемопередатчиков.

На основе анализа отечественных и международных нормативных документов произведен обзор подходов к нормированию абонентских кабельных линий, применяемых для создания цифровых линий и сетей широкополосного абонентского доступа, что позволило определить перечень и диапазоны измерения нормируемых параметров и характеристик ЛКС.

Анализ условий испытаний оконечного оборудования, описанных в рекомендациях ITU-T G.99x.x, и результатов проведенных испытаний оборудования ADSL позволил сформулировать требования к средству измерений, обеспечивающему проведение испытаний оконечного оборудования.

На основе результатов предварительных испытаний образцов кабеля определено, что частотные характеристики (ЧХ) переходного затухания имеют существенную неравномерность,

достигающую 35 дБ, и поэтому при их измерении целесообразно применение широкополосных измерительных сигналов, а при расчете скоростных характеристик сетей доступа следует воспроизводить характеристики переходных влияний как случайные процессы по частоте.

Предложен алгоритм установки абонентской линии, основанный на использовании нормированных скоростных характеристик. Задача расчета норм скорости для типовых цифровых линий определяется таким образом, чтобы обеспечить соблюдение условий ЭМС в сети ШПД-xDSL в момент условного завершения строительства сети, характеризуемый достижением коэффициентом цифрового уплотнения многопарных кабелей выбранного значения.

Алгоритм определяет место измерительной технологии, основанной на нормировании условий ЭМС в сети ШПД-xDSL, обеспечивающем соответствие скорости доступа нормам. Таким образом, средство измерений, применяемое в рамках процедуры установки цифровой линии, должно обеспечивать как контроль условий ЭМС активного оконечного оборудования и ЛКС, так и контроль скоростных характеристик xDSL в сети ШПД.



Рисунок 1 - Алгоритм установки цифровой линии

В соответствии с алгоритмом установки цифровой линии (см. рисунок 1) по заявке пользователя технический отдел оператора определяет скорость линии R_{user} , необходимую для предоставления запрашиваемого вида обслуживания с принятым у оператора уровнем качества. По учетным данным кабельных линий (тип, диаметр жил, длина) определяется норматив скорости R_{norm} . Если необходимая скорость не превышает нормы $R_{user} < R_{norm}$, то устанавливается оборудование цифровой линии и оценивается возможная скорость линии R .

Если скорость R соответствует норме $R \geq R_{norm}$, то цифровая линия вводится в эксплуатацию. В противном случае линия бракуется или производятся измерения, целью которых является получение информации о состоянии ЛКС для квалифицированного принятия решения о планировании и выполнении ремонтно-восстановительных работ.

Таким образом, в первой главе диссертации сформулирована необходимость определения норм условий ЭМС линий в сети ШПД-xDSL и указаны требования к средству измерений условий ЭМС. Требования к СИ соответствуют предложенному алгоритму установки цифровой линии, выполнение которого обеспечивает бесконфликтное в смысле ЭМС цифровых линий развитие сети доступа на основе нормирования скоростных характеристик xDSL. Процесс развития сети

контролируется путем выявления линий, не соответствующих нормам, и обеспечивается обоснованным ограничением скорости доступа.

Во второй главе диссертации определены математические модели цифровых линий ADSL и SHDSL, обеспечивающие расчет скоростных характеристик в зависимости от необходимого запаса помехозащищенности и параметров кабелей связи. В качестве характеристик кабелей связи, определяющих скорость линий, рассматриваются только характеристики передачи двухпроводной линии и частотные характеристики переходных влияний.

Частотные и импульсные характеристики передачи кабелей (ТП, КСП, МКС) рассчитываются по табличным данным из справочников. Передаточные функции переходных влияний воспроизводятся как случайные процессы $W_X(f)$, определяемые согласно (1).

$$|W_X(f)| = W_{X_0}(f) \times |\sin(\Phi(f))| \quad (1)$$

Процессы $W_X(f)$ развиваются над нормами частотных характеристик. Нормы согласно ANSI T1.417-2001 имеют вид (2) и (3), определяются частотой f , количеством взаимодействующих пар $m > 1$, длиной l и опорными значениями для затухания переходных помех на ближнем $NEXT_{norm}(f_0, m_0)$ и защищенности от переходных помех на дальнем конце $ELFEXT_{norm}(f_0, m_0, l_0)$ - $f_0 = 300$ кГц, $l_0 = 1$ км, $m_0 = 2$.

$$NEXT_{norm}(f, m) = NEXT_{norm}(f_0, m_0) - 6 \times \lg(m - 1) - 15 \times \lg(f / f_0) \quad (2)$$

$$ELFEXT_{norm}(f, m, l) = ELFEXT_{norm}(f_0, m_0, l_0) - 6 \times \lg(m - 1) - 20 \times \lg(f / f_0) - 10 \times \lg(l / l_0) \quad (3)$$

Амплитуда случайного процесса $W_{X_0}(f) = 10^{-X_0(f)/20}$ определяется нормой коэффициента передачи $X_{norm}(f)$ согласно (2) для NEXT и (3) для ELFEXT и дополнительно понижается на величины запаса соответствия норме ΔX_0 и затухания всплеска A_X в децибелах:

$$X_0(f) = X_{norm}(f) + \Delta X_0 + A_X.$$

Фаза процесса определяется величиной полупериода всплеска R_X .

$$\Phi(f) = \Phi_0 + 2\pi \int_{F_0}^f \frac{1}{2R_X} df$$

Изменение частоты производится в пределах диапазона частот цифровой линии $f = F_0 \dots F_1$.

Представленные в таблице 1 случайные значения затухания и полупериода всплеска переходного влияния A_X и R_X , а так же начальные значения фазы и запаса соответствия норме Φ_0 , ΔX_0 определены по результатам измерений переходных влияний, произведенных автором с использованием анализаторов систем передачи и кабелей связи AnCom A-7 совместно со специалистами ЛОНИИС (Санкт-Петербург) и ОНИИС (Одесса).

Таблица 1 - Параметры переходных влияний как случайных процессов

Параметр случайного процесса	Обозначение параметра и диапазон разыгрывания		Условие разыгрывания
	NEXT	ELFEXT	
Запас соответствия норме ΔX_0 , дБ	$\Delta NEXT_0 = 0 \dots 14$ Усеч. норм. распределение	$\Delta ELFEXT_0 = 0 \dots 14$ Усеч. норм. распределение	при $f = F_0$
Начальная фаза Φ_0 , рад	$\Phi_0 = 0 \dots \pi$; равномерный закон распределения		
Затухание всплеска A_X , дБ	$A_{NEXT} = 0 \dots 8$ Равномерное распределение	$A_{ELFEXT} = 0 \dots 8$ Равномерное распределение	при $\Phi(f) = k\pi$, $k = 1, 2, 3, \dots$
Полупериод всплеска R_X , кГц	$R_{NEXT} = 400 \dots 1500$ Равномерное распределение	$R_{ELFEXT} = 800 \dots 1500$ Равномерное распределение	

Модель ADSL. На основании анализа рекомендаций ITU-T G.992.x предложена математическая модель цифровых линий ADSL (ADSL, ADSL2, ADSL2+), обеспечивающая расчет скорости передачи. Параметры модели определены расчетным путем и экспериментально.

Скорость ADSL определяется по (4) в «кбит/с» с учетом факта неиспользования для передачи данных канала пилот-сигнала i_p .

$$R_{ADSL} = M \left(\sum_{i=i_0}^{i_p-1} K(i\Delta F) + \sum_{i=i_p+1}^{i_1-1} K(i\Delta F) \right) \quad (4)$$

Канальная кратность модуляции определяется формулой (5) для каждого i -го частотного канала, формируемого передатчиком ADSL с шагом ΔF .

$$\begin{cases} K(i\Delta F) = \left[\frac{SNR(i\Delta F) - \Delta SNR_0 - \Delta SNR}{3} \right] \\ 0 \leq K(i\Delta F) \leq K_{\max} \end{cases} \quad (5)$$

Кратность зависит от фактической канальной помехозащищенности $SNR(i\Delta F)$, запаса «неидеальности приемника» $\Delta SNR_0 = 9,75$ дБ и задаваемой величины запаса помехозащищенности ΔSNR . Фактическая канальная помехозащищенность $SNR(i\Delta F)$ определяется разностью спектральных плотностей мощности (СПМ) сигнала и помех.

$$SNR(i\Delta F) = S(i\Delta F) - N(i\Delta F) \quad (6)$$

Спектр сигнала на входе приемника $S(i\Delta F)$ для нисходящего потока определяется в «дБм/Гц» формулой (7), в которой $S^{Tx}(i\Delta F)$ - спектр передатчика, A^{Tx} - величина возможного дополнительного затухания передатчика (функция Power cut-back) и $|W(i\Delta F)|$ - затухание сигнала в линии в «дБ».

$$S(i\Delta F) = S^{Tx}(i\Delta F) - A^{Tx} - |W(i\Delta F)| \quad (7)$$

Спектральная плотность суммарных помех на входе приемника ADSL в «дБм/Гц» согласно (8) определяется интерференционными помехами $I(i\Delta F)$, собственными помехами приемника N_{RxADSL} и измеренным спектром помех на входе приемника $N_{Rx}(i\Delta F)$.

$$N(i\Delta F) = 10 \lg(10^{I(i\Delta F)/10} + 10^{N_{RxADSL}/10} + 10^{N_{Rx}(i\Delta F)/10}) \quad (8)$$

С применением методов имитационного моделирования определена спектральная модель интерференционных помех ADSL (9).

$$I(i\Delta F) = S^{Tx}(i\Delta F) - 86,0 - A^{Tx} - 16,5 \lg(i\Delta F / f_0) - 19,0 \lg(l_A / 100\%) + 3,0 \sqrt{l_{BT} / l_{BT_0}} \quad (9)$$

Здесь:

l_{BT} - длина отвода,

$l_{BT_0} = 100$ м,

$l_A = \frac{l}{A_0(f_A) / \alpha(f_A)} \times 100\%$ - нормированная по затуханию длина линии,

$A_0(f_A) = 4,5$ дБ – норма затухания на частоте $f_A = 0,8$ кГц,

$\alpha(f_A)$ - коэффициент затухания применяемого кабеля в «дБ/км».

Экспериментально-расчетным путем определена спектральная плотность собственных помех приемника ADSL (10), ограничивающая его чувствительность.

$$N_{RxADSL} = -138,0 \text{ дБм/Гц} \quad (10)$$

При невозможности проведения непосредственных измерений спектра помех $N_{Rx}(f)$ следует считать, что СПМ помех в «дБм/Гц» определяется выражением (11), учитывающим спектр передатчика, ЧХ рабочего затухания пары $|W(f)|$ и частотную характеристику защищенности пары от переходных влияний на дальнем конце $ELFEXT(f, m, l)$, рассматриваемую согласно (1), (3) как случайный процесс по частоте.

$$N_{Rx}(i\Delta F) = S^{Tx}(i\Delta F) - |W(i\Delta F)| - ELFEXT(i\Delta F, m, l) \quad (11)$$

Модель SHDSL. Анализ принципов построения приемопередатчиков SHDSL, приведенных в рекомендации ITU-T G.991.2, позволяет сформировать модель SHDSL. Совокупность данных соответствия скорости передачи длине линии и СПМ помех, а так же опубликованные результаты испытаний SHDSL-оборудования позволяют верифицировать эту модель.

Модель (12)-(15) обеспечивает расчет запаса помехозащищенности SNR_{SHDSL} в зависимости от необходимой скорости R_{SHDSL} . Расчет скорости производится исходя из условия, определяющего работоспособность SHDSL по защищенности сигнала, приведенной к выходу передатчика с учетом АЧХ линии $|W(f)|$ и спектра помех на входе приемника $N(f)$.

$$SNR = 10 \lg \left(\frac{P_{sign}^{Tx}}{P_{noise}^{Tx}} \right) \geq (\Delta SNR_0 + \Delta SNR + 3K) \quad (12)$$

Здесь:

$\Delta SNR_0 = 9,75$ дБ - запас «неидеальности приемника»;

ΔSNR - заданный запас помехозащищенности в «дБ»;

$F_1 = (R_{SHDSL} + 8) / K / 2$ - верхняя граница полосы SHDSL в «кГц»;

$P_{sign}^{Tx} = \int_{F_0}^{F_1} S^{Tx}(f, F_1) df$ - уровень передатчика SHDSL в «мВт», определяемый спектром

передатчика $S^{Tx}(f, F_1)$, интегрируемым в полосе частот, верхняя граница которой F_1

определяется скоростью передачи R_{SHDSL} в «кбит/с» а нижняя $F_0 = 5$ кГц;

$$S^{Tx}(f, F_1) = 10^{-A_{SHDSL}^{Tx}/10} \times \frac{9,9}{135} \times \frac{1}{2F_1} \times \left(\frac{\sin(\pi f / (2F_1))}{\pi f / (2F_1)} \right)^2 \times \frac{1}{1 + (f / F_1)^{2 \times 6}} \times \frac{f^2}{f^2 + F_0^2}$$

- СПМ передатчика в «мВт/Гц»;

K - кратность модуляции, определяемая применяемым способом модуляции SHDSL обычно обозначаемым как 2^{K+1} -ТСПАМ (для 32-ТСПАМ $K = 4$);

$$P_{noise}^{Tx} = \int_{F_0}^{F_1} \frac{N(f)}{|W(f)|} df \quad - \text{уровень помех приемника, приведенных к выходу передатчика,}$$

в «мВт»; СПМ помех на входе приемника определяется собственными помехами приемника $N_{RxSHDSL}$ и измеренным спектром помех на входе приемника $N_{Rx}(f)$.

$$N(f) = 10 \lg(10^{N_{RxSHDSL}/10} + 10^{N_{Rx}(f)/10}) \quad (13)$$

При обработке экспериментальных данных с применением верифицированной модели определена СПМ собственных помех приемника, ограничивающая его чувствительность.

$$N_{RxSHDSL} = -117,0 \text{ дБм/Гц} \quad (14)$$

При невозможности проведения непосредственных измерений спектра $N_{Rx}(f)$ следует считать, что СПМ помех определяется согласно (15) сигналом передатчика и случайным процессом изменения переходного затухания по частоте $NEXT(f, m)$ по (1), (2).

$$N_{Rx}(f) = S^{Tx}(f) - NEXT(f, m) \quad (15)$$

В результате исследований, отраженных во второй главе, получены модели цифровых линий, пригодные как для расчета и нормирования скоростных характеристик, так и для использования при программировании малопотребляющих контроллеров, встраиваемых в специализированное СИ.

Особенностью проведенных исследований является определение закона изменения СПМ интерференционных помех ADSL (9), учитывающего помимо влияния искажения сигнала в линии связи влияние отводов, а также основанное на экспериментальных данных определение СПМ мощности собственных шумов приемников ADSL (10) и SHDSL (14).

Третья глава диссертации посвящена расчету норм скоростных характеристик ADSL и SHDSL. Здесь же представлены нормы характеристик ЛКС для сетей ШПД-хDSL, полученные из рассмотренных литературных источников.

В результате произведенного обзора показателей нормирования современной кабельной продукции по переходным влияниям и характеристик ЛКС для кабельных линий связи, выполненных исправным кабелем, выбраны следующие значения норм переходных влияний:

- четверочные кабели: $NEXT_{norm}(300 \text{ кГц})=68 \text{ дБ}$, $ELFEXT_{norm}(300 \text{ кГц}, 1 \text{ км})=53 \text{ дБ}$,
- кабели - витая пара: $NEXT_{norm}(300 \text{ кГц})=63 \text{ дБ}$, $ELFEXT_{norm}(300 \text{ кГц}, 1 \text{ км})=55 \text{ дБ}$,
- кабели телефонные: $NEXT_{norm}(300 \text{ кГц})=52 \text{ дБ}$, $ELFEXT_{norm}(300 \text{ кГц}, 1 \text{ км})=50 \text{ дБ}$.

Для указанных норм переходных влияний, их вариаций согласно (1)-(3) и на основании моделей (4)-(11) и (12)-(15) осуществлен расчет норм скоростных характеристик цифровых линий ADSL и SHDSL. Основные результаты представлены в графической форме – см. рисунки 2,3,4.

Анализ полученных норм показал, что эффективность применения современного оконечного оборудования цифровых линий будет обеспечена при использовании кабелей связи, характеризующихся следующими показателями:

- SHDSL 128-ТСРАМ - $76 \leq NEXT(300 \text{ кГц}) \leq 80 \text{ дБ}$;
- ADSL2+ - $57 \leq ELFEXT(300 \text{ кГц}, 1 \text{ км}) \leq 62 \text{ дБ}$.

Основываясь на нормах и моделях переходных влияний, моделях цифровых линий и их скоростных характеристиках, определены формулы для расчета предельно допустимой спектральной плотности мощности помех (ПДСПМП) для ADSL и SHDSL. Примеры масок ПДСПМП для наиболее часто встречающихся случаев приведены на рисунки 5,6,7.

При нормировании помех для ADSL шаблон ПДСПМП на окончании пары на абонентской стороне ADSL (ATU-R¹ - прием downstream) $S_{\max}^{ATU-R}(f)$ в «дБм/Гц» определяется выражением (16).

$$S_{\max}^{ATU-R}(f) = 10 \lg \left(10^{S_X^{ATU-R}(f,l,m,D)/10} + 10^{N_{RxADSL}/10} + 10^{I(f)/10} \right) - (\Delta SNR - 6) \quad (16)$$

Здесь

$$S_X^{ATU-R}(f,l,m,D) = S_{\max}^{Tx}(f) - \alpha_D(f) \times l - ELFEXT_{norm}(f,m,l)$$

- СПМ переходных помех в «дБм/Гц»;

$S_{\max}^{Tx}(f)$ - СПМ сигнала передатчика в «дБм/Гц»;

$\alpha_D(f) \times l$ - ЧХ затухания в «дБ», определяемая коэффициентом затухания $\alpha_D(f)$, диаметром жил D и длиной линии l ;

$ELFEXT_{norm}(f,m,l)$ - ЧХ защищенности от переходных помех на дальнем конце по (3);

N_{RxADSL} - собственные помехи приемника по (10);

$I(f)$ - интерференционные помехи в «дБм/Гц», формирующиеся при взаимодействии передатчика ADSL2+ с линией связи и СПМ которых зависит от длины линии l и диаметра жил D согласно (9);

ΔSNR - запас помехозащищенности (SNR Margin) в «дБ».

На станционной стороне (ATU-C²) возможен контроль переходных помех от станционных передатчиков, подключенных к соседним парам. В этом случае следует учитывать переходное затухание и рассчитывать СПМ $S_{\max}^{ATU-C}(f)$ в «дБм/Гц» согласно (17).

$$S_{\max}^{ATU-C}(f) = 10 \lg \left(10^{S_X^{ATU-C}(f,m)/10} + 10^{N_{RxADSL}/10} + 10^{I(f)/10} \right) - (\Delta SNR - 6) \quad (17)$$

Здесь

$S_X^{ATU-C}(f,m) = S_{\max}^{Tx}(f) - NEXT_{norm}(f,m)$ - СПМ переходных помех в «дБм/Гц»;

$NEXT_{norm}(f,m)$ - ЧХ затухания переходных помех по (2);

N_{RxADSL} - собственные помехи приемника по (10).

При нормировании помех для SHDSL шаблон ПДСПМП на входе приемника SHDSL в «дБм/Гц» определяется по (18) следующим образом³.

$$S_{\max}^{STU}(f) = 10 \lg \left(10^{S_X^{STU}(f,l,m,D)/10} + 10^{N_{RxSHDSL}/10} \right) + \Delta SNR_w(f,l_{0,64}) + \Delta SNR_{SHDSL}(l_{0,64}) - (\Delta SNR - 6) \quad (18)$$

¹ ATU-R - ADSL Transceiver Unit at the remote terminal end – приемопередатчик ADSL на удаленной стороне.

² ATU-C - ADSL Transceiver Unit at the central office end – приемопередатчик ADSL на станционной стороне.

³ В силу симметричности линии нормы помех распространяются на оба ее окончания - STU-C (SHDSL Transceiver Unit at the Central Office) и STU-R (SHDSL Transceiver Unit at the Remote End).

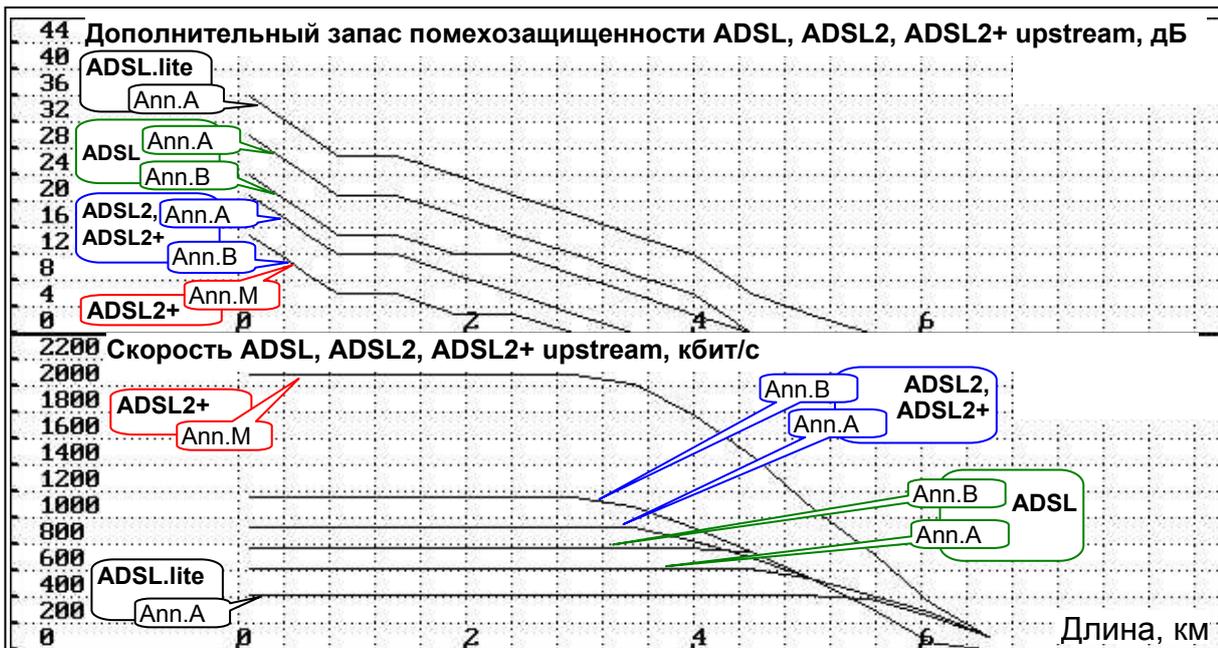


Рисунок 2 - Скоростные характеристики ADSL, ADSL2, ADSL2+ upstream на кабеле с жилами 0,4 мм со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил при $m=10$, $ELFEXT_{norm}(300\text{кГц}, 1\text{км})=50\text{ дБ}$, $SNR\ Margin=6\text{ дБ}$

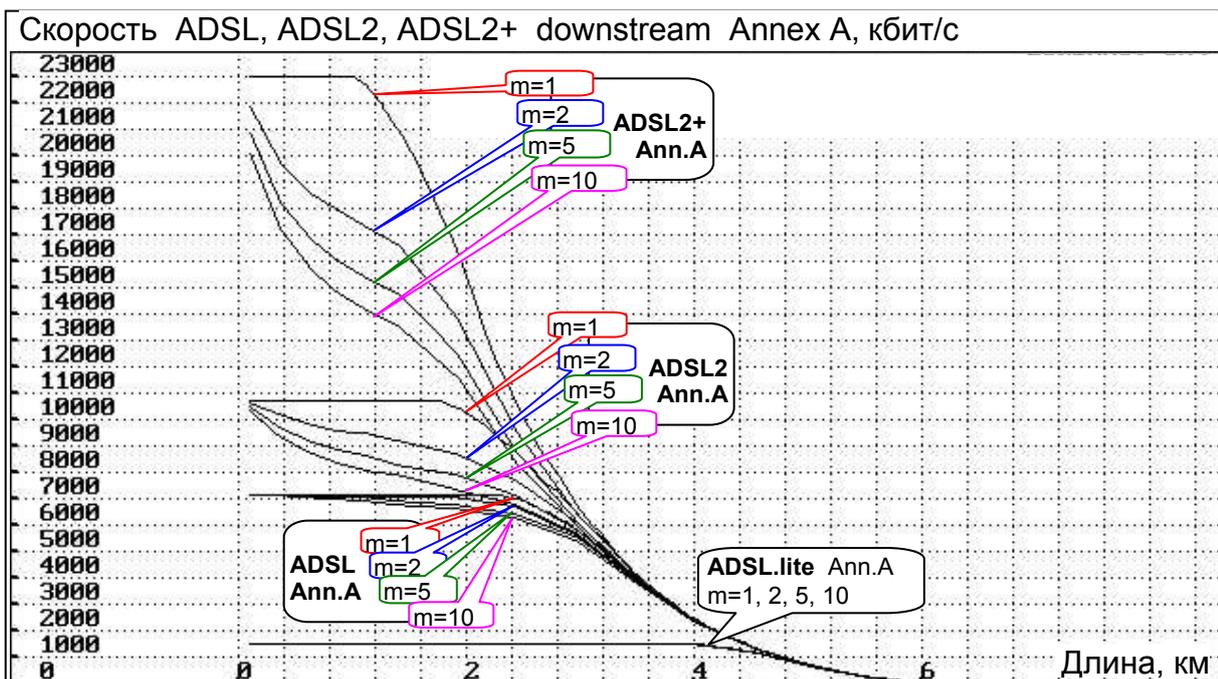


Рисунок 3 - Скоростные характеристики ADSL, ADSL2, ADSL2+ downstream Annex A Non-overlapped mode на кабеле с жилами 0,4 мм со сплошной полиэтиленовой изоляцией жил при различном количестве цифровых линий $m=1, 2, 5, 10$, $ELFEXT_{norm}(300\text{кГц}, 1\text{км})=50\text{ дБ}$, $SNR\ Margin=6\text{ дБ}$

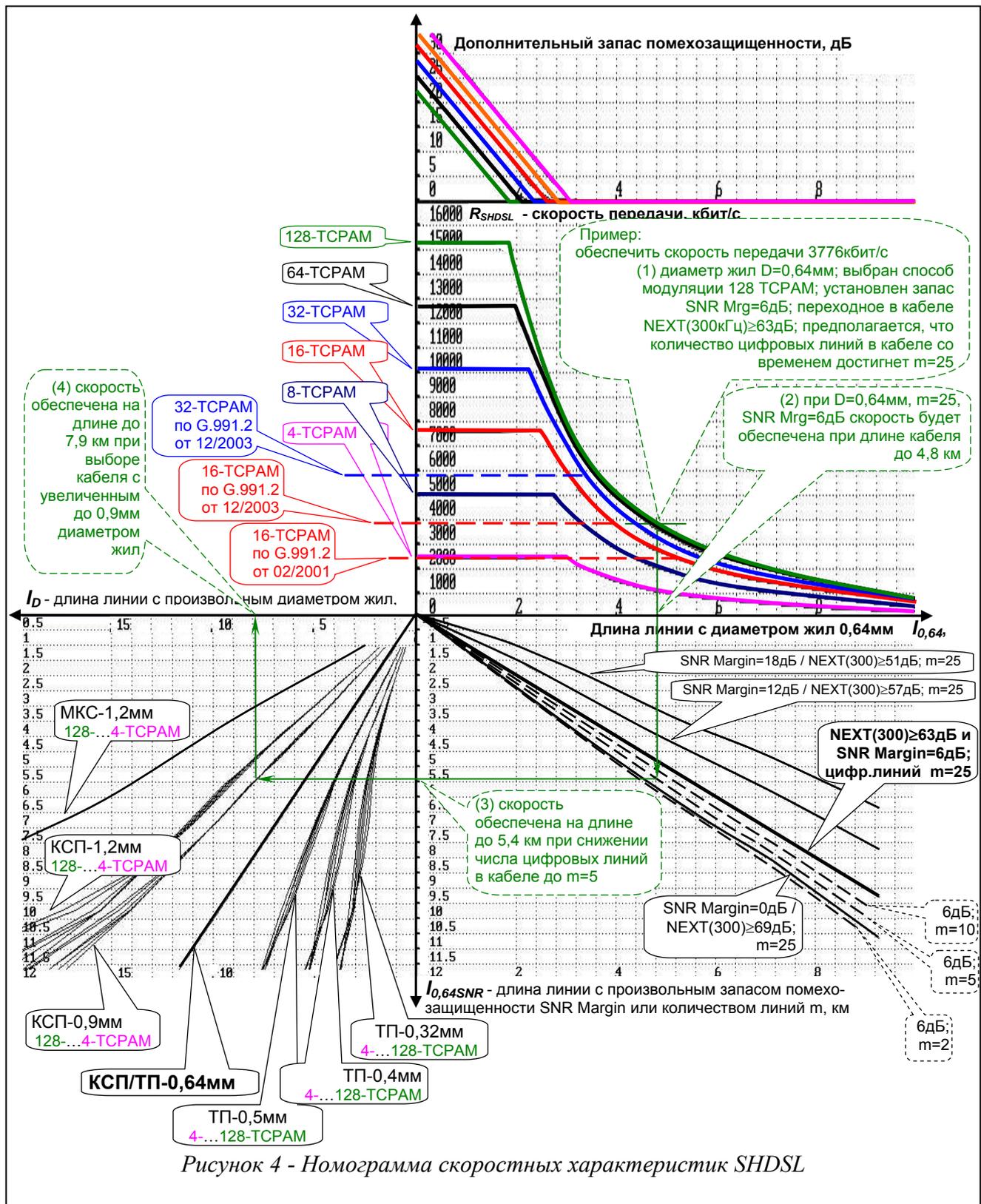


Рисунок 4 - Номограмма скоростных характеристик SHDSL

ПДСПМП ADSL2+ станционная сторона, дБм/Гц

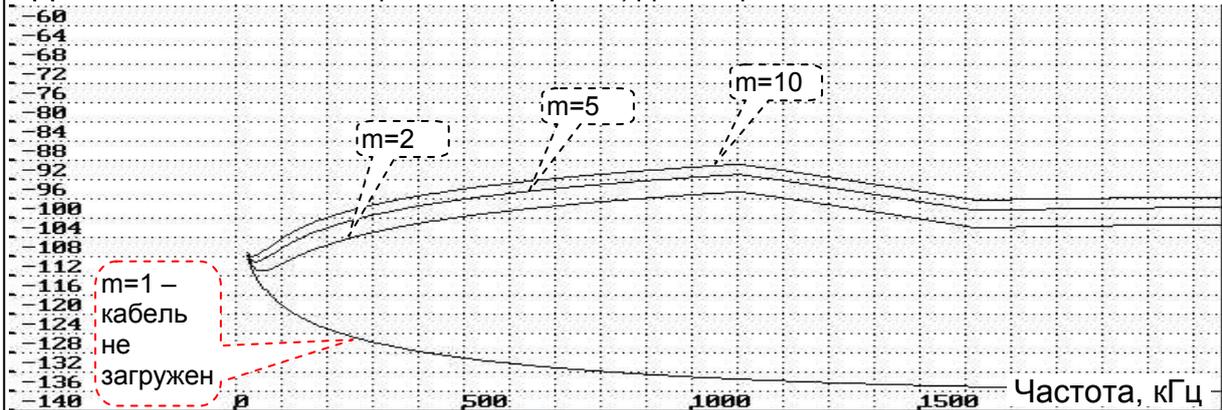


Рисунок 5 - Предельно допустимый спектр помех на **станционном окончании пары** для ADSL2+ на кабеле с жилами 0,4 мм со сплошной полиэтиленовой изоляцией при $m=1, 2, 5, 10$, $NEXT_{norm}(300кГц)=52$ дБ, $SNR\ Margin=6$ дБ

ПДСПМП ADSL2+ абонентская сторона, дБм/Гц

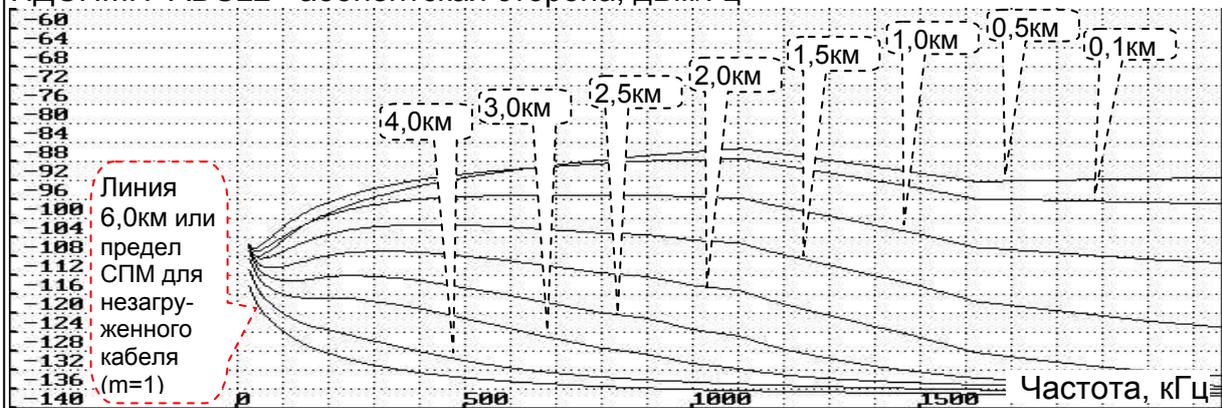


Рисунок 6 - Предельно допустимый спектр помех на **абонентском окончании пары** для ADSL2+ на кабеле с жилами 0,4 мм со сплошной полиэтиленовой изоляцией при $m=10$, $ELFEXT_{norm}(300кГц; 1км)=50$ дБ, $SNR\ Margin=6$ дБ

ПДСПМП SHDSL 32-TCPAM, дБм/Гц

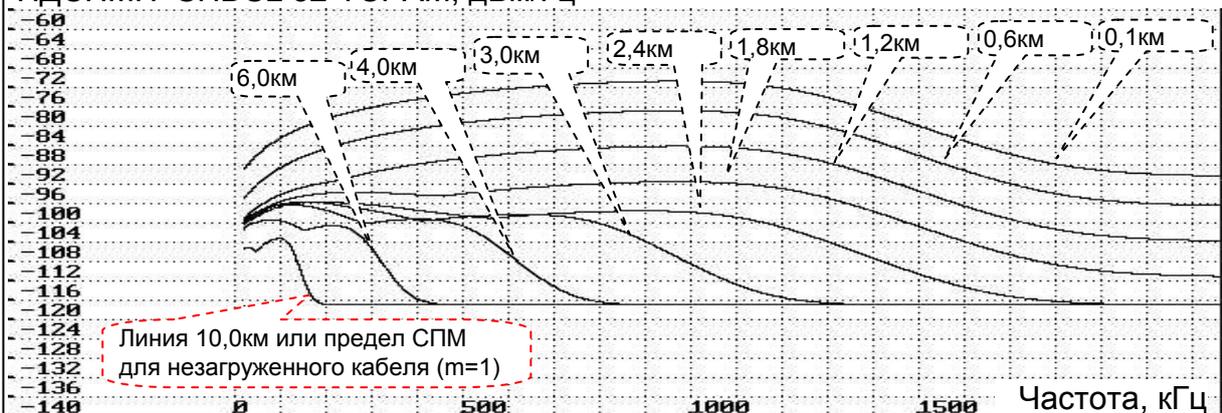


Рисунок 7 - Предельно допустимый спектр помех на **окончании пары** для SHDSL 32-TCPAM на кабеле с жилами 0,64 мм со сплошной полиэтиленовой изоляцией при $m=10$, $NEXT_{norm}(300кГц)=63$ дБ, $SNR\ Margin=6$ дБ

Здесь

$S_X^{STU}(f, l, m, D) = S^{Tx}(f, F_1) - NEXT_{norm}(f, m)$ - спектр переходных помех от m пар;

$$\begin{cases} \Delta SNR_w(f, l_{0,64}) = (\alpha_{0,64mm}(F_1) - \alpha_{0,64mm}(f)) \times l_{0,64} - 10 \\ \Delta SNR_w(f, l_{0,64}) \geq 0 \end{cases} \quad \text{- ЧХ взвешенного запаса}$$

помехозащищенности, допускающая наличие помех в области частот $f < F_1$, в которой при интегрировании спектра помех в ходе расчета по формуле (12) низкочастотные помехи тем менее значимы, чем меньше рабочее затухание на низких частотах по отношению к затуханию на частоте предела спектра сигнала F_1 ;

$$F_1 = \frac{R_{SHDSL}(l_{0,64}) + 8}{2K} \quad \text{- верхняя граница полосы, согласно норме } R_{SHDSL}(l_{0,64}) \text{ по (12);}$$

$\Delta SNR_{SHDSL}(l_{0,64})$ - дополнительный запас помехозащищенности на коротких линиях;

$$l_{0,64} \approx l \times \frac{\alpha_D(300kHz)}{\alpha_{0,64mm}(300kHz)} \quad \text{- эквивалентная длина линии при диаметре жил равном 0,64 мм;}$$

l - длина линии с произвольным диаметром жил;

ΔSNR - запас помехозащищенности (SNR Margin) в «дБ».

При нормировании характеристик ЛКС, как это ни покажется странным, но не представляется целесообразным определять шаблоны частотных характеристик рабочего затухания линии (АЧХ), причиной чего является то, что АЧХ зависит от длины линии. Нормированию подлежит ЧХ погонного затухания или погонное затухание на измерительной частоте, в качестве которой целесообразно выбрать наиболее часто применяемое в рекомендациях ITU-T G.99x.x значение $f_0 = 300$ кГц.

Анализ рекомендации ITU-T L.19 позволил определить требования к ЧХ затухания асимметрии и затухания отражения пар, применяемых для установки цифровых линий. Соответственно - не менее 40 дБ и не менее 16 дБ в полосе частот цифровой линии. Норма неравномерности ЧХ ГВП (количественная характеристика неоднородностей) - не более 4 мкс.

Отличительной чертой предлагаемого способа нормирования ПДСМПП является отказ от фиксированных масок в пользу оперативно рассчитываемых шаблонов, что позволяет обеспечить формирование требований к помехам в строгом соответствии с возможностями оборудования (см. рисунки 5, 6, 7). Детальный учет СПМ интерференционных помех и собственных помех приемника в значительной степени облегчает работу технического персонала, не вынуждая его обеспечивать подавление помех на окончаниях пар незагруженного цифровыми линиями кабеля до уровня минус 140 дБм/Гц, каковое качество все равно не может быть утилизировано приемопередатчиками.

Анализ измерительных сигналов, проведенный в **четвертой главе**, показал, что перечисленные в первой главе задачи анализа ЛКС, применяемых для создания сетей ШПД с использованием цифровых линий, приведенные во второй главе математические модели цифровых линий и нормирование ЛКС ШПД-xDSL, определенное в третьей главе, могут быть реализованы с применением универсального, параметрически настраиваемого многочастотного измерительного сигнала (МЧС) с программируемыми спектральными свойствами.

Формирование МЧС может быть осуществлено или путем непосредственного расчета его волновой формы во временной области как суммы гармоник, или путем выполнения быстрого дискретного преобразования Фурье его образа, синтезируемого в частотной области. При использовании 16-ти разрядных ЦАП-АЦП диапазон представления рефлектограмм и АЧХ составит 96 дБ в отсутствие помех и будет понижаться при снижении эффективной разрядности ЦАП или АЦП на 6 дБ при уменьшении разрядности на 1.

Использование непрерывных по мощности сигналов для построения рефлектометра обеспечивает локализацию неоднородностей в кабелях связи с представлением рефлектограмм в традиционной форме с динамическим диапазоном, ограниченным исключительно разрядностью преобразователей (практически достигнут динамический диапазон равный 80 дБ при 14-разрядных ЦАП-АЦП), и гарантирует отсутствие переходных влияний на сеть ШПД-xDSL со стороны СИ.

Применение универсального многочастотного измерительного сигнала позволяет выполнять исследование ЛКС одновременно в частотной и временной областях с использованием низкобюджетных и малопотребляющих цифрового процессора обработки сигнала (DSP), преобразователей ЦАП-АЦП и контроллера без поддержки плавающей арифметики.

Сравнительно малый уровень измерительного сигнала предопределяет возможность разработки низковольтной системы питания прибора, что позволяет снизить электропотребление и увеличить длительность автономной работы СИ при питании от встроенных аккумуляторов.

Совокупность указанных свойств позволяет компании ООО «Аналитик-ТС» серийно производить компактный, быстродействующий и широкополосный анализатор AnCom A-7, обеспечив его существенное ценовое превосходство на российском рынке по отношению к аналогичным СИ ведущих зарубежных фирм – см. таблицу 2.

Таблица 2 - Анализаторы условий ЭМС xDSL

Свойство анализатора		RB6000DSL Radiodetection, Великобритания	ELQ2+ Elektronika, Венгрия	ALT-2000, ATEN, Италия	AnCom A-7, Аналитик-ТС, Россия
					
Диапазон частот, кГц		до 2200	до 2200	до 2000	до 4096
Сопротивление и емкость		Да	Да	Да	Да
Измерение уровня		Да	Да	Да	Да
АЧХ рабочего затухания		Да	Да	Да	Да
АЧХ переходн. Затухания		Да	Да	Да	Да
ЧХ несогласованности		Да	Да	Да	Да
ЧХ асимметрии		Да	Да	Да	Да
Измерение спектра		Да	Да	Да	Да
Рефлектометр		Да	Да	Да	Да
Сигнал/Шум		Да	Да	Да	Да
Анализ импульсных шумов		Да	Да	Да	Да
Анализ перерывов связи		Да	Да	Да	Да
Скорость ADSL...ADSL2+		Нет	Да	Да	Да
Скорость одним прибором		Нет	Нет	Да	Да
Скорость SHDSL		Нет	Нет	Нет	Да
Цена с учетом опций ЭМС xDSL, по состоянию на апрель 2007 года по каталогу «СвязьКомплект» www.skomplekt.com	Руб- лей	264000	298080	273670	150000
	%	100,0	112,9	103,7	56,8

Основные результаты работы сформулированы в заключении диссертации:

1. Разработаны математические модели цифровых абонентских линий ADSL и SHDSL, обеспечивающие расчет их скоростных характеристик как в зависимости от вторичных параметров кабелей связи и воспроизводимых переходных влияний и помех, так и в зависимости от непосредственно измеренных характеристик передачи и фактических помех. Особенностью разработанной модели ADSL является учет спектральных характеристик интерференционных помех, воспроизводимых в зависимости от длины линии и наличия неоднородностей. Модели ADSL и SHDSL учитывают собственные помехи приемников.
2. Произведен анализ нормативных документов, определяющих требования к ЛКС сетей широкополосного доступа, и проведены измерения частотных характеристик переходных влияний. На основе полученных данных определены: спецификация средства измерений, предназначенного для проведения контроля условий ЭМС цифровых линий в сетях ШПД-xDSL, и статистические модели частотных характеристик переходных влияний.
3. С использованием моделей цифровых линий и моделей переходных влияний рассчитаны нормы скоростных характеристик цифровых линий ADSL и SHDSL для типовых случаев применения.
4. Определены формулы для расчета предельно допустимой спектральной плотности мощности помех для SHDSL и ADSL на стационарном и абонентском окончаниях. Полученные формулы позволяют обеспечить нормирование помех в зависимости от длины кабеля, необходимой скорости передачи и заданного запаса помехозащищенности цифровой линии. Представлены результаты расчета для типовых случаев.
5. Обоснована возможность и представлены преимущества определения параметров ЛКС сетей ШПД-xDSL с применением многочастотного измерительного сигнала.
6. Совокупность полученных результатов, включая модели цифровых линий и многочастотный измерительный сигнал с программируемыми спектральными свойствами, была использована при разработке программного обеспечения анализатора систем передачи и кабелей связи AnCom A-7, основанного на применении малобюджетных сигнального процессора, контроллера и преобразователей ЦАП-АЦП.
7. Реализуемый анализатором AnCom A-7 диапазон представления рефлектограмм и частотных характеристик затухания составляет не менее 80 дБ при длительности выполнения элементарного измерения от 0,4 до 2 с. Использование анализатора не оказывает негативного влияния на работу действующей сети ШПД-xDSL в условиях падения переходного затухания до 30 дБ; при этом динамический диапазон рефлектометра составляет не менее 50 дБ.
8. Примененные методы позволили компании ООО «Аналитик-ТС» серийно производить анализатор AnCom A-7, обеспечив его существенное ценовое преимущество, составляющее не более 57% относительно цены аналогичных СИ ведущих зарубежных фирм.
9. Использование широкополосных измерительных сигналов, обеспечило возможность дополнительного применения анализатора AnCom A-7 для контроля оборудования, каналов и трактов высокочастотной связи по линиям электропередач (ВЧ ЛЭП) в отрасли «Электроэнергетика», паспортизации каналов ТЧ и сертификации оконечного оборудования xDSL в отрасли «Связь».
10. Продемонстрированный в работе подход к построению средств измерений с использованием широкополосных измерительных сигналов и поддержкой адаптивного нормирования сетей ШПД-xDSL средствами встроенного программного обеспечения может быть применен при разработке перспективных СИ, например, СИ для обслуживания сети ШПД-VDSL2.

Публикации по теме диссертации

1. Кочеров А.В. Ограничение скоростного потенциала асимметричной цифровой абонентской линии электрическими характеристиками медных кабелей // Электросвязь. - 2004. - №11. - с.18-21.
2. Кочеров А.В., Тарасов Н.И. Оценка скоростного потенциала ADSL по сопротивлению шлейфа и емкости пары // Вестник связи. – 2005. - №4. - с.131-134.
3. Тарасов Н.И., Кочеров А.В. Эксплуатационная надежность цифровых абонентских линий // Вестник связи. – 2005. - №6. - с.70-74.
4. Балашов В.А., Копийка О.В., Кочеров А.В., Ляховецкий Л.М. Применение моделирования в задачах разработки норм проектирования и эксплуатации сети цифрового абонентского доступа // Вестник связи. – 2005. - №12. - с.23-26.
5. Кочеров А.В. Анализатор систем передачи и кабелей связи AnCom A-7 – неочевидные возможности // Электросвязь. – 2006. - №2. - с.46-50.
6. Джиган В.И., Кочеров А.В. Рефлектометр на основе непрерывного сигнала для тестирования кабелей цифровых абонентских линий (xDSL) // Электросвязь. – 2006. - №3. - с.40-43.
7. Кочеров А.В. Нормирование ADSL - физический уровень // Вестник связи. – 2007. - №6. - с.29-40.
8. Кочеров А.В., Тарасов Н.И. Развертывание асимметричных цифровых абонентских линий в Украине // Сети и телекоммуникации. – 2007. - №7-8. - с.58-63.
9. Кочеров А.В., Хвостов Д.В. ADSL2+ и VDSL2. Нормирование и управление эксплуатационной надежностью сети ШПД // Вестник связи. – 2008. - №4. - с.12-21.
10. Кочеров А.В. Расчет скоростного потенциала SHDSL // Электросвязь. – 2008. - №6. - с.61-63.
11. Тарасов Н.И., Кочеров А.В. Значение методов контроля линий, используемых для построения сетей цифрового абонентского доступа. Сборник докладов Международного семинара метрологов отрасли связи «Проблемы и направления развития метрологической деятельности в отрасли связи». Одесса, 2005, с.10-12.
12. Кочеров А.В. Нормирование сетей широкополосного абонентского доступа. Физический уровень. Сборник докладов Международной конференции по операторским решениям «Triple Play, IP-TV – от теории к практике». Киев, 2007, с.32.
13. Кочеров А.В. Эксплуатационная надежность ADSL2+/VDSL2 – нормирование и управление. Сборник докладов семинара-совещания «Развитие широкополосного доступа на сетях электросвязи России». Москва, 2008, с.18-22.

Подписано в печать 19.07.2008 г. Формат 60x84/16. Объем 1,5 усл.п.л.
Тираж 100 экз.

ООО «Аналитик-ТС». Москва, Волоколамское шоссе, 73