



Расчет и контроль кабелей для цифровых линий SHDSL

УДК 621.317.33/.35

А.В. КОЧЕРОВ, главный метролог ООО “Аналитик-ТС”, кандидат технических наук, **В.А. УШАКОВ**, заместитель директора по развитию ООО “АДС”, **В.И. РУДЕНКО**, начальник лаборатории ООО “НПП “Информсистема”, **Б.В. МЕТЕЛЕВ**, начальник отдела подбора и развития персонала МРФ “Юг” ОАО “Ростелеком”

Особенности национальной эксплуатации

Технологии xDSL уже второй десяток лет позиционируются в России как временные. Даже термин такой есть — “заплаточное решение”. Предполагается, что рано или поздно на смену меди придет оптика. Но в ходе организации видеотрансляции на участках избирательных комиссиях было продемонстрировано, что доступ в значительном числе случаев может быть обеспечен практически только посредством SHDSL — полный дуплекс, модуляция до 128-ТСРАМ, линейная скорость до 15360 кбит/с по одной паре. Распределение потока по нескольким парам позволяет создавать системы со скоростью до $(1...8) \times 15360 = 15360...122880$ кбит/с при частичном или полном использовании парной емкости существующих кабельных линий связи, на которых чаще всего встречаются кабели четверочной скрутки типов КСПП, ЗКП и МКС.

Помимо использования однородных кабельных линий связь зачастую организуется по разнородным направляющим системам, включающим в том числе участки воздушных линий и кабели с грузонесущим тросом. Системы на основе SHDSL обеспечивают устойчивую работу и в этих условиях, преодолевая порой весьма существенную неравномерность частотных характеристик передачи, однако наличие перекрестных помех до сего дня

является существеннейшим препятствием для приемопередатчиков SHDSL. Кроме того, конечно, не следует забывать про затухание, вносимое кабелем, и наличие собственных помех на входе приемника. Как будет показано ниже, значение скорости 122880 кбит/с, обеспечиваемое 8-парной линией, возможно лишь на соответствующих нормам кабелях при длине регенерационного участка не более 1 км.

Несмотря на широкую распространенность, вопросу обеспечения эксплуатационной надежности создаваемых линий SHDSL по сей день не уделяется должного внимания. Так, в стандартах организаций обычно отсутствуют нормы проектирования и количественные критерии, на основании которых цифровая линия вводится в эксплуатацию. Следует заметить, что отсутствие норм и соответствующей производственной дисциплины приводит к чрезмерному росту эксплуатационных издержек. И именно в такой методической необеспеченности заключаются особенности национальной эксплуатации. Туман неизученности этих особенностей призвана рассеять данная статья.

Цена вопроса

При создании цифровых линий важнейшим вопросом является поиск оптимальной длины регенерационного участка. Ответ часто ищется экспериментально. Под оптимальностью понимается ми-

нимизация соотношения цена/качество Q , определяемого отношением суммы понесенных затрат к произведению скорости передачи на общую длину линии:

$$Q = \frac{C+T+G+B+E}{R(L) \times L_0} = \frac{(C+T)+n \times (g+b+e)}{R(L) \times (n+1) \times L}, \quad (1)$$

где:

$C = c \times L_0$ — стоимость кабеля и работ по его прокладке;

$T = t \times 2$ — стоимость двух полукомплектов оконечного оборудования;

$G = g \times n$ — стоимость регенераторов;

$B = b \times n$ — затраты на строительные-монтажные и измерительные работы;

$E = e \times n$ — затраты за первый год эксплуатации линии;

$n = L_0 / L - 1$ — количество регенераторов в линии;

$R(L)$ — скорость передачи цифровой линии в зависимости от длины участка;

L_0 — общая длина кабельной линии;

L — длина регенерационного участка.

Когда число регенераторов $n \gg 1$, стоимостью полукомплектов можно пренебречь ($T \ll G$), а если кабельная линия уже находится в эксплуатации ($C = 0$), то легко видеть, что:

$$Q \approx \frac{g+b+e}{R(L) \times L}. \quad (2)$$



Таблица 1

Традиционные способы оптимизации проекта линии SHDSL

Действия	Обоснование	Примечания
Увеличение длины регенерационного участка L в целях экономии при закупке и монтаже оборудования	По предельным техническим характеристикам приемопередатчиков	В процессе и после реализации проекта оператор не имеет сведений о расчетном и фактическом запасе помехозащищенности запущенной в эксплуатацию линии
	По характеристикам приемопередатчиков в условиях отсутствия в кабеле иных цифровых линий, т. е. без учета переходных влияний	
	С учетом норм затухания переходных помех, выбранных “не для того кабеля”	
	По фактическим характеристикам линий предыдущих поколений	
Борьба за снижение цены регенератора g	“Бюджетные” системы передачи тоже работают	Не способствуют росту технического уровня проектного решения.
Отказ от выполнения измерительных работ — снижение b	Зачем что-либо измерять, если во многих случаях линия при вводе в эксплуатацию вполне работоспособна	Потенциально повышают последующие эксплуатационные затраты e на обеспечение устойчивости линии

То есть затраты снижаются как с ростом скорости линии $R(L)$, так и с увеличением длины регенерационного участка L , но возрастают при увеличении:

g — цены одного регенератора;
 b — стоимости монтажных и измерительных работ при установке регенератора;

e — эксплуатационных затрат в расчете на один регенератор.

Как известно, и будет численно показано ниже, увеличение длины L при выбранной скорости R приводит к необходимости обеспечения высокого качества кабеля связи, что практически затруднительно, если используется уже существующая кабельная линия. Поэтому, минимизируя соотношение Q , следует обеспечить хотя бы неувеличение числителя в (2). Любая экономия полезна, но цену экономии необходимо знать и понимать — см. табл. 1. Надо сказать, что линии SHDSL обычно монтируются не специализированными организациями, а силами специалистов оператора связи, поэтому необоснованная экономия при выборе проектного решения, монтаже и пуско-наладке, приводит к росту последующих эксплуатационных расходов, извлекаемых из того же кармана.

Величина эксплуатационных затрат e может быть сведена к нулю, если после проектирования с использованием нормативов и контроля кабельных участков до монтажа оборудования цифро-

вая линия устойчиво работает на необходимой скорости передачи. Осталось определиться с тем, что такое “устойчивость”, “нормативы” и “контроль”, к чему и приступим.

Устойчивость цифровой линии и цена устойчивости

Идея модуляции k -ТСПАМ состоит в том, чтобы в соответствии с группой бит переносимого цифрового потока формировать однозначно определяемую этой битовой комбинацией величину напряжения, выбираемую из k : возможных

значений. Формирование нового значения амплитуды напряжения производится с тактовой частотой. Чем выше тактовая частота и чем большее количество бит переносится за такт, тем выше скорость. Верхняя граница полосы частот спектра формируемого сигнала определяется половиной тактовой частоты. При увеличении затухания или росте уровня помех тактовая частота понижается для обеспечения устойчивой работы линии. Подробные сведения об устройстве приемопередатчиков SHDSL изложены в справочнике [1].

Корнинг

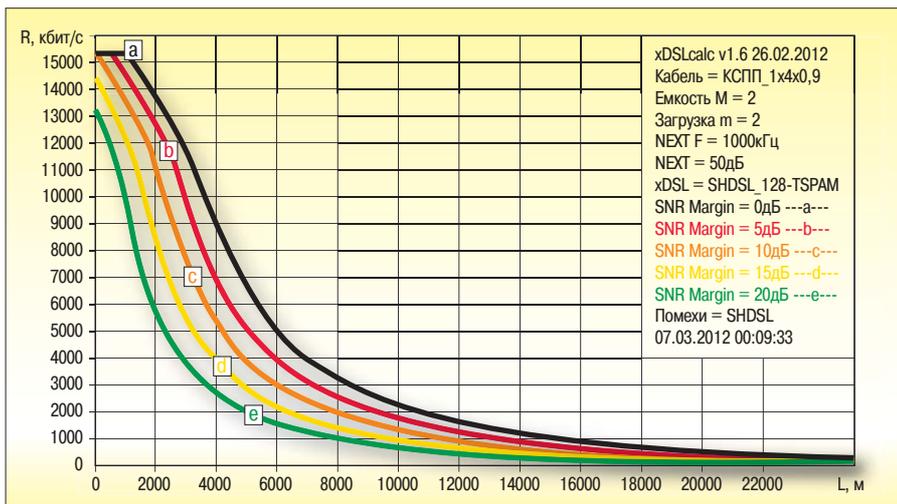


Рис. 1. Скорость SHDSL 128-TSPAM в каждой паре “четверки” для кабеля КСПП-1х4х0,9 при загрузке двух пар в “четверке” в зависимости от задаваемой величины запаса помехозащитности

Устойчивость цифровых линий характеризуется величиной запаса помехозащитности SNR Margin, которую часто называют “Качеством сигнала”. Устойчивость легко обеспечивается при увеличении “Качества сигнала”, т. е. запаса помехозащитности SNR Margin, так как после установки соединения его переустановка с понижением скорости произойдет только тогда, когда из-за деградации характеристик кабеля величина запаса будет полностью исчерпана.



Рис. 2. Контроль соответствия переходного затухания нормам рекомендации МСЭ-T L.19 выполняется не на единственной частоте и даже не на нескольких дискретных частотах, а с шагом не более 20 кГц. Это обусловлено существенной неравномерностью протекания частотной характеристики NEXT(f). Неравномерность можно охарактеризовать максимальной амплитудой отклонения от среднего значения равной 10 дБ. Таким образом расстояние между нормой и средним значением, определяющим соотношение сигнал/шум и, следовательно, скорость линии, составит тоже не менее 10 дБ

Однако увеличение запаса существенно понижает эффективность реализации проекта цифровой линии — см. рис. 1. Например: при длине участка $L = 4000$ м на кабеле КСПП-1х4х0,9 и увеличении “Качества сигнала” с вполне достаточного уровня равного 5 дБ до 10 дБ, скорость R снижается с 6976 до 5312 кбит/с, т. е. на 24 %. Таким образом, согласно (1) или (2), затраты на реализацию проекта будут расти со скоростью 4,8 % на каждый децибел увеличения запаса устойчивости. Представленные в статье скоростные характеристики построены с помощью программы xDSLcalc.

Вторым параметром, определяющим экономические показатели создаваемой цифровой линии согласно (2), является зависимость характеристики $R(L)$ от качества кабеля. Он характеризуется коэффициентом затухания $\alpha(f)$ и затуханием переходных помех на ближнем конце $NEXT(f)$.

Коэффициент затухания зависит от типа изоляции кабеля, диаметра токопроводящих жил и для исправного кабеля практически стабилен. Частотные зависимости переходного затухания определяются уровнем технических требований и технологической дисциплины не только при производстве кабеля, но и при монтаже и эксплуатации кабельных линий. В программе xDSLcalc пользователем

могут быть введены характеристики любых кабелей, в состав дистрибутива входят характеристики кабелей: ТПП [1], КСПП [2], МКС, ЗКП [3], ТЦП [4].

Контроль кабеля и нормы

Сводка норм переходного затухания представлена в табл. 2. Интерес к измерению кабелей связи (см. рис. 2) при инсталляции линий SHDSL часто возникает лишь тогда, когда “нарезка” кабеля на регенерационные участки выполнена чрезмерно оптимистично, в результате чего линия не работает на требуемой скорости, причины чего подробно освещены выше (см. табл. 1). Этот список можно дополнить:

на линии имеют место помехи от сторонних источников, спектральная плотность мощности которых превышает уровень минус 120 дБм/Гц, соответствующий уровню собственных помех приемника SHDSL;

параметры кабеля не соответствуют нормам.

Оператор связи, конечно, может использовать в качестве норм и те характеристики, которые определены его опытом. Здесь важно выполнить расчеты и выяснить возможные обстоятельства до того, как приступить к закупкам оборудования и работам на линии.

Нормы и эффективность соответствия норме

При выборе норм следует иметь в виду, что затраты на создание цифровой линии при прокладке нового кабеля (1) или при использовании уже имеющегося (2) будут снижаться при росте качества кабеля не менее чем на 4,5 % на каждый децибел повышения затухания переходных помех. Этот показатель легко определить, воспользовавшись результатами расчетов скоростных характеристик (рис. 3). Например:

для длины регенерационного участка на кабеле КСПП-1х4х0,9 равной 4000 м при увеличении NEXT(1000 кГц) на 10 дБ с 40 до 50 дБ скорость возрастет с 3904 до 7104 кбит/с;

Нормы переходного затухания

Нормативные документы	Данные нормативного документа		Пересчет нормы на частоту F=1000 кГц, NEXТ(F=1000 кГц), дБ
	F, кГц	Норма NEXТ(F), дБ	
Рекомендация МСЭ-T L.19	150	56	
Многopарные медные сетевые кабели, обеспечивающие одновременную работу нескольких служб, таких как POTS, ISDN и xDSL	1024	52	52
	2048	44	
ГОСТ Р 53538-2009	160	60	
	1100	55	55
	2200	50	
ТУ на современные кабели, на примере ТУ 3571-008-12154334-2006 для кабелей ТЦП производства компании "НПП "Информсистема"	160	77	
	1024	65	65
	2048	60	
Рекомендуемые нормы для исправных кабелей различных типов, находящихся в эксплуатации	КСПП	-	50
	ЗКП	-	50
	МКС	-	50

так как приведенные затраты обратно пропорциональны скорости, см. (1) и (2), и если принять затраты на некачественном кабеле (переходное затухание составляет лишь 40 дБ) равными 100 %, то при использовании кабеля с качеством 50 дБ приведенные затраты составят $3904/7104 \times 100 \% = 55 \%$;

таким образом, снижение затрат при росте качества на 10 дБ составит $100 - 55 = 45 \%$, что и позволяет оценить рост экономических показателей проекта за счет обеспечения качества кабеля величиной не менее $45/10 = 4,5 \%$ на децибел.

Но всякому росту препятствует насыщение. Так, дальнейшее ужесточение требований к кабелю по переходному затуханию после достижения уровня 70 дБ на частоте 1000 кГц во всяком случае применительно к SHDSL не дает прибавки скорости.

Помимо переходного затухания скорость передачи определяется типом кабеля (см. рис. 4), на котором результаты расчета по xDSLcalc совмещены с данными линейных испытаний цифровых систем передачи семейства MC04-DSL, основанных на приемопередатчиках SHDSL и серийно выпускаемых компанией ООО "АДС".

Анализ представленных расчетных характеристик, соотношенных с данными линейных испытаний, по-

казывает, что длина регенерационного участка на заданной скорости существенным образом зависит:

от задания запаса помехозащитности (рис. 1),

от качества кабеля, выражаемого нормой переходного затухания (рис. 3) и коэффициентом затухания, характерным для каждого типа кабеля связи (рис. 4).

Данные линейных испытаний, наложенные на расчетные характеристики (см. рис. 4), свидетельствуют о близости расчета и эксперимента при выборе $NEXТ(F=1000 \text{ кГц})=60 \text{ дБ}$ в законе изменения затухания переходных помех, заимствованном из стандарта ANSI T1.417-2001:

$$NEXТ(f) = NEXТ(F) - 15 \times \lg\left(\frac{f}{F}\right). \quad (3)$$

Если же учесть, что протекание фактических характеристик $NEXТ(f)$ существенно неравномерно, а отклонение от среднего обычно не превышает 10 дБ (см. рис. 2), то можно считать, что норма переходного затухания для использованных в ходе испытаний кабельных линий составляла $NEXТ(F=1000 \text{ кГц})=50 \text{ дБ}$. Оценка величины переходного затухания по данным косвенных измерений не может быть использована непосредственно для нормирования кабелей, но замечательно иллюстрирует соответствие расчетной

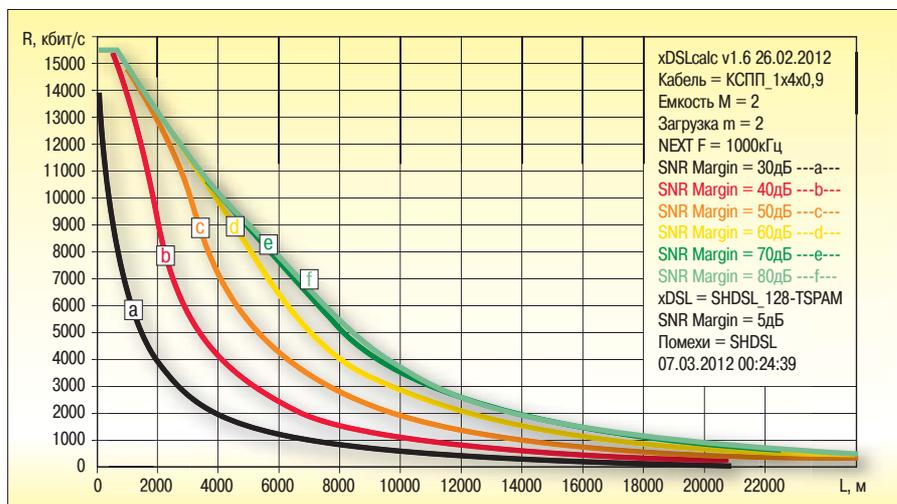


Рис. 3. Скорость SHDSL 128-TSPAM для КСПП-1x4x0,9 в зависимости от нормы переходного затухания, т. е. от показателя качества кабеля

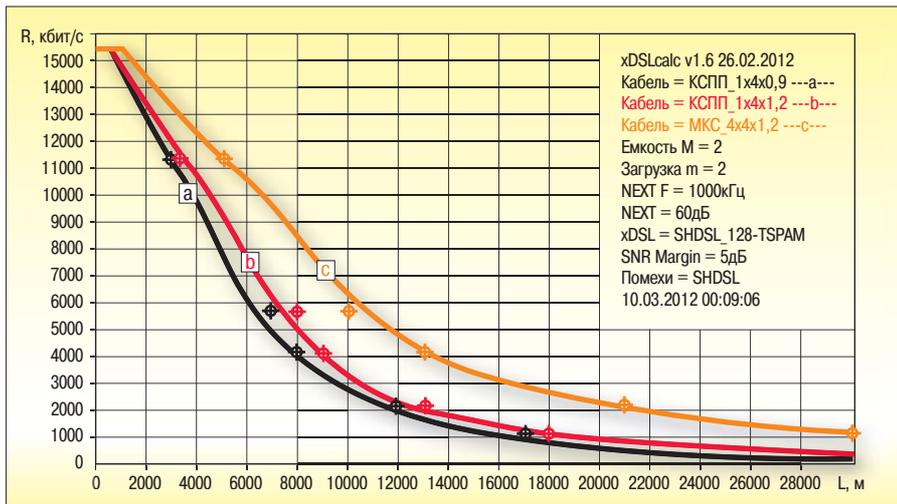


Рис. 4. Скорость SHDSL 128-TSPAM для ряда кабелей при норме NEXT(1000 кГц)=60 дБ и экспериментальные точки, полученные при линейных испытаниях системы передачи MC04-DSL

модели, реализованной программой xDSLcalc, экспериментальным данным.

Практический опыт установки цифровых линий свидетельствует о том, что реализуемая на исправном кабеле скорость может суще-

ственно изменяться от участка к участку, несмотря на то, что длины участков равны. Минимальная скорость может опускаться до 20 — 40 % от максимально достигнутого значения (100 %). Причиной такой “недостачи” обычно является

именно падение переходного затухания до уровня около 30 дБ на частоте 1000 кГц (рис. 3). Линия, конечно, может и просто не работать, но тогда причина будет заключаться в повреждении кабеля.

Чтобы планомерно вести проектные, монтажные и пусконаладочные работы на линии, следует контролировать кабельные участки, накапливая статистику, обработка которой позволяет выработать норму с учетом следующих соображений:

норма не должна быть чрезмерно велика, чтобы не привести к увеличению затрат на борьбу с ее нарушениями из-за непрогнозируемого роста параметра $b + e$ в выражении (2);

норма не должна быть чрезмерно низка, чтобы уменьшение произведения $R(L) \times L$ не привело бы к росту затрат согласно (2);

компромиссное значение нормы до ее уточнения может быть определено равным $NEXT(F=1000 \text{ кГц})=50 \text{ дБ}$ при законе изменения (3) — см. табл. 2.

Таблица 3

Этапы реализации проекта установки цифровой линии SHDSL

Задача этапа	Метод реализации	Примечания
1 Определить тип используемого кабеля и его параметры	Изучение данных учета	При наличии данных
2 Определить линейную скорость передачи R , необходимую для решения задачи	Системный анализ	Учесть перспективы развития
3 Задать норму переходного затухания NEXT(F=1000 кГц)	Учесть данные табл. 2	Использовать стандарты организации
4 Определить длину регенерационного участка L	Посредством программы xDSLcalc	По данным рис. 1, 3, 4
5 Сформировать проектные условия, определить число регенераторов	Применить результаты расчета длины регенерационного участка к данным кабельной трассы	Уточнить значения L по участкам с учетом местности
6 Выполнить паспортизацию каждого участка по традиционным показателям исправности и дополнительно измерить фактические величины: рабочего и переходного затухания, запаса помехозащищенности на требуемой скорости	Измерительные технологии xDSL\ГодностьПары и SHDSL_128-TSPAM, поддерживаемые анализатором AnCom A-7	После выполнения подготовительных работ на линии до подключения регенераторов
7 При обнаружении повреждения кабельного участка выполнить необходимые восстановительные работы на участке		Повторить с п. 6
8 При обнаружении несоответствия нормам переходного затухания или скорости проектным условиям установить на участке дополнительный регенератор		Повторить с п. 6
9 При полном соответствии параметров проектным условиям приступить к установке линейного оборудования		Документировать результаты
10 Свести данные измерений и результаты пусконаладки в расширенный паспорт линии в целях накопления опыта и последующей коррекции норм переходного затухания		результаты

Рабочий план

Определить фактическую скорость цифровой линии экспериментально сравнительно просто — для этого необходимо подключить соответствующие измерительные приборы вместо регенераторов (можно использовать и сами регенераторы, правда, перед этим следует выполнить монтаж всего оборудования на линии). А вот определить экспериментально (в полевых условиях, а не в лаборатории) предельную длину на заданной скорости практически невозможно. Для этого нужно много копать и резать, но это долго, и что делать с обрезками кабеля? Именно в этом случае использование представленных скоростных характеристик и программы xDSLcalc позволяет выполнить определение предельной длины участка для обеспечения необходимой скорости.

Но часто кабель уже поделен на участки. Например, многие ли-

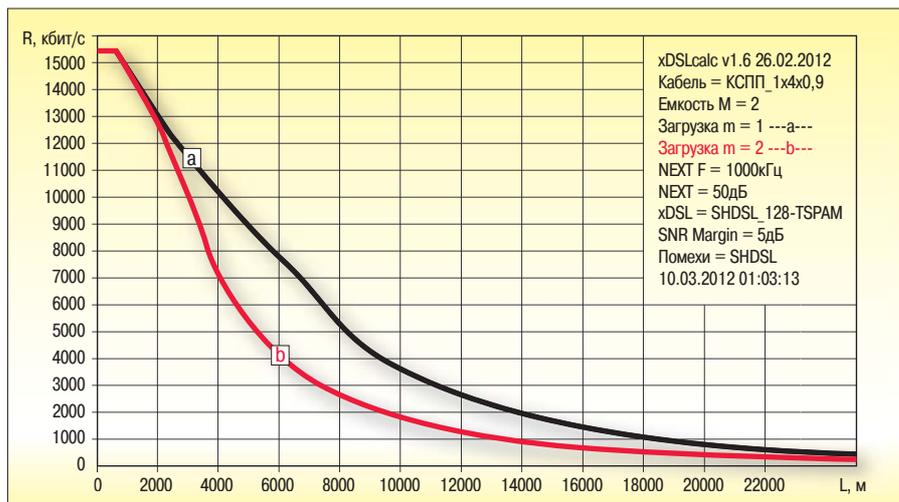


Рис. 5. Скорость SHDSL 128-TSPAM для случаев загрузки только одной пары и обеих пар в “четверке” КСПП-1x4x0,9 при норме NEXT(1000 кГц)=50 дБ

нии, выполненные кабелем КСПП, были “нарезаны” под ИКМ-30С примерно по 4000 м. В этом случае программа xDSLcalc позволяет, оперируя четырьмя взаимосвязанными параметрами для кабеля известного типа — длина участка, скорость, запас помехозащитен-

ности и норма переходного затухания, квалифицированно “переливать” ресурсы этих параметров из одного в другой.

Таким образом, программа xDSLcalc открывает новые возможности моделирования линий SHDSL и их скоростной загрузки,

Связтстрой деталь

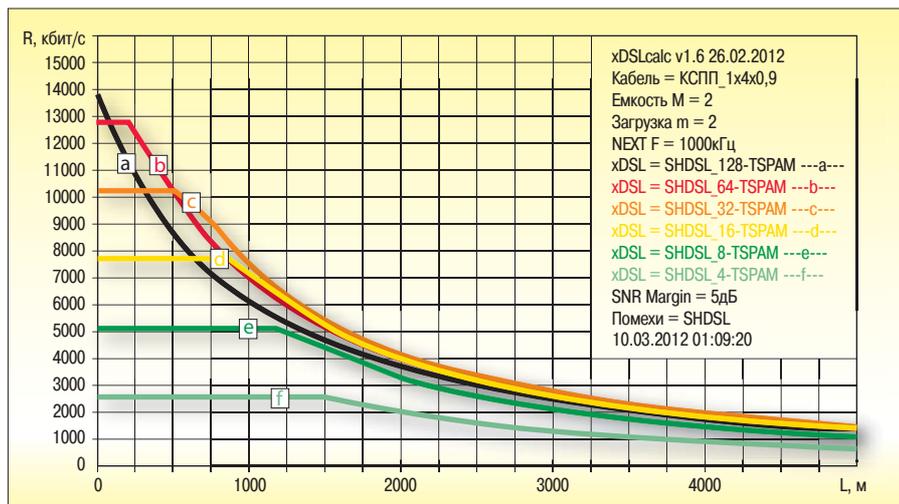


Рис. 6. Скорость SHDSL для показателя модуляции от 4 до 128 при аварийном NEXT(1000 кГц)=30 дБ

что позволяет ввести расчет в перечень этапов реализации проекта — см. табл. 3.

Для иллюстрации значимости выполнения расчетов можно привести два представленных далее примера.

Падение скорости при полной загрузке “четверки”

В практике установки SHDSL часты случаи, когда оборудование вначале включается в однопарном варианте использования кабеля “четверочной” скрутки, а через некоторое время кабель “доуплотняется” подключением второй пары в “четверке”. При этом вопреки ожиданиям удвоение скорости не наступает по причине недостаточного переходного затухания, и рис. 5 показывает, что даже на соответствующем нормам по NEXT кабеле (см. табл. 2) такое падение скорости, начиная с длины участка от 7 км, может быть более чем двукратным. То есть установка дополнительного оборудования или выполнение дополнительных монтажных работ в этом случае не имеют никакого технического смысла и, следовательно, вредны экономически. На участках с длиной до 4 км скорость тоже падает, но лишь до 69 % от исходной, поэтому “доуплотнение” четверки повысит скорость не менее чем на 38 %, но не на 100 %, как того хотелось бы.

Скоростные характеристики SHDSL при низком качестве кабеля

Если линия состоит из нескольких регенерационных участков, то скорость наихудшего из них будет ограничивать скорость всей линии. Причина снижения скорости может заключаться в существенном падении переходного затухания. Если проведение восстановительных работ затруднительно, а установка на аварийном участке дополнительного регенератора невозможна, то повысить скорость можно изменением показателя модуляции.

Скорость на аварийном кабеле отражает рис. 6, демонстрирующий возможность повышения скорости при упрощении модуляции. Так, для длины выше 550 м наилучшие показатели будут при типе модуляции 32-ТСПАМ.

Тип модуляции 32-ТСПАМ представляется наиболее эффективным, так как демонстрирует наилучшие показатели на аварийных кабелях (рис. 6). На качественных кабелях с длиной от 3000 м скорость 32-ТСПАМ лишь незначительно уступает 64- и 128-ТСПАМ.

Выводы

Представленный материал позволяет систематизировать проектирование и реализацию проектов цифровых линий SHDSL на основе

расчета их характеристик с использованием программы xDSLcalc.

Приведенные примеры скоростных характеристик подтверждены результатами линейных испытаний оборудования MC04-DSL (модем MC04-DSL2.bisM) и количественно демонстрируют влияние на скорость передачи типа кабеля, его загрузки, запаса помехозащитности и переходного затухания. Примеры не исчерпывают возможностей программы xDSLcalc, которая позволяет:

использовать модели любых кабелей и известных цифровых линий (SHDSL, ADSL, ADSL2, ADSL2+, VDSL2);

моделировать любую нагрузку мало- и многопарных кабелей цифровыми линиями.

Показано, что затраты на создание линии SHDSL и при прокладке нового кабеля, и при использовании имеющейся кабельной линии снижаются не менее чем на 4,5 % на каждый децибел обеспеченного роста затухания переходных помех (NEXT).

Представлены этапы реализации проекта установки цифровых линий SHDSL направленно обеспечивающие учет, контроль и снижение влияния переходных помех (NEXT), как при проектировании, так и оперативно в процессе реализации проекта.

Материал статьи относится к системам SHDSL, однако ничто не мешает распространить изложенный подход на цифровые линии иных типов и назначения — на ADSL2+ и VDSL2. Расчет и контроль этих линий обеспечены программой xDSLcalc.

Литература

1. Технологии широкополосного доступа xDSL. Справочник под общей редакцией В.А. Балашова – Москва: Эко-Трендз, 2009.
2. Ю.А. Парфенов. Кабели электросвязи. – Москва: Эко-Трендз, 2003.
3. А.С. Воронцов и др. Коаксиальные и высокочастотные симметричные кабели связи – Москва: Радио и Связь, 1994.
4. ТУ 3571-008-12154334-2006. Кабели малопарные высокочастотные для цифровых сетей абонентского доступа. Компания “НПП “Информсистема”.