

Эксплуатационная надежность цифровых абонентских линий

Тарасов Н.И., ведущий научный сотрудник лаборатории цифровых систем передачи
Одесского НИИС, к.т.н., +38(0482)22-19-71, tarasov@oniis.odessa.ua

Кочеров А.В., главный метролог ООО «Аналитик-ТС»,
+7(095)775-60-11, andrey@analytic.ru

Вариант статьи опубликован в журнале «Вестник связи» №6 2005

В статье представлены методы измерения объективных показателей качества работы цифровых абонентских линий:

- запас помехозащищенности для одноканальных систем (PAM, CAP, 2B1Q),
- скоростной потенциал и запас помехозащищенности для многоканальных систем (DMT).

Построены характеристики помехозащищенности приемопередатчиков, учитывающие:

- тип приемопередатчиков,
- значение необходимой скорости передачи,
- длину линии в кабеле известного типа,
- модель помех.

Показано как нормирование величины запаса помехозащищенности может быть использовано для обеспечения эксплуатационной надежности цифровых абонентских линий.

Введение

Основная проблема, которая встает при выборе способа оценки сложной системы ограниченным числом параметров, заключается в изучении природы явления, выявлении скрытых связей и статистических закономерностей. Применительно к поставленной задаче значение запаса помехозащищенности xDSL-линий на требуемой скорости $\Delta R(V)$ представляется обобщенным показателем, который:

- может быть получен для каждой пары, заявленной для установки цифровой линии,
- включает все известные свойства приемопередатчиков,
- отражает характеристики кабельной линии (включая наличие неоднородностей),
- содержит сведения о спектре помех в полосе частот приемопередатчиков.

Любой другой подход (оценка запаса по длине линии, затуханию или сопротивлению шлейфа) предполагает внесение в модель априорной информации, а его надежность обеспечивается только внесением дополнительного запаса, величина которого зависит от изученности статистических закономерностей сочетания искажений частотных характеристик и спектров помех. Авторы не располагают какими-либо достоверными сведениями на эту тему, поэтому единственно возможным путем в этом случае является проведение оценки возможной скорости в условиях действия максимальных помех. Как было показано в [1], реальная скорость может быть в 5 и более раз выше такой оценки. Выполнение измерений столь грубым методом практически лишено смысла, поскольку тех же результатов можно добиться не выезжая на линию, а используя лишь паспортные данные.

Оператор, планирующий предоставление услуг, основанных на xDSL, преследует две взаимоисключающие цели - повышение скорости и обеспечение эксплуатационной надежности устанавливаемых и уже установленных цифровых линий. Задачей настоящей статьи является разработка методов измерения запаса помехозащищенности цифровых линий на необходимой скорости. Нормированием запаса должна обеспечиваться надежность линии.

Одноканальные симметричные цифровые линии

Спектры сигналов современных одноканальных систем (HDSL, SHDSL) не имеют явно выраженного энергетического максимума и поэтому критическим является минимальное значение частотной характеристики защищенности в полосе приема:

$$\Delta R_{DSL} = \min_{f=f_0 \dots f_1} (R(f) - (R_{\min} + \Delta A)), \text{ дБ} \quad (1)$$

Частотная характеристика помехозащищенности $R(f)$, дБ линии измеряется как разность спектров полезного сигнала и помех и должна быть рассмотрена в полосе частот $f_0 \dots f_1$, определяемой способом модуляции (2B1Q, PAM, CAP,...) и необходимой скоростью передачи V .

Помехозащищенность идеального приемника вычисляется по формуле Шеннона $R_{\min} = 10 \lg(2^K - 1)$, дБ и зависит только от кратности модуляции приемопередатчика $K = V / (f_1 - f_0)$. Запас неидеальности приемника ΔA , дБ определяется экспериментально [2].

Параметры (1) применительно к различным одноканальным технологиям организации цифровых линий имеют значения, приведенные в Таблице 1.

Таблица 1. Параметры одноканальных приемопередатчиков xDSL

Одноканальная передача по одной паре		Максим. уровень (135 Ом) P_{\max} , дБм	K	V , кбит/с	R_{\min} , дБ	ΔA , дБ	f_0 , кГц	f_1 , кГц
HDSL	2B1Q (G.991.1)	+13,5	2	784\1168\2320	4,8	18	0	$\approx V / (2K)$
	CAP (G.991.1 Annex B)	+15,5	6	2320	18,0	15	33	420
SHDSL	16-TCPAM (G.991.2)	+13,5	3	192...2312, шаг=8	8,5	15	0	$(V + 8) / (2K)$
	16-TCPAM (G.991.2 Annex F)		3	2320...3840, шаг=8				
	32-TCPAM (G.991.2 Annex F)		4	768...5696, шаг=8	11,8			

В гипотетическом случае, когда протекание частотной характеристики рабочего затухания и огибающая спектра шумов не зависят от частоты, минимум защищенности будет близок к среднему в диапазоне частот значению. Такая ситуация имеет место, например, в каналах ТЧ. Но это совершенно нетипично для многопарных кабелей по следующим причинам.

Рабочее затухание, определяющее форму спектра полезного сигнала на входе приемника, возрастает с увеличением частоты, но на фоне этого генерального возрастания имеет место неравномерность колебательного характера, вызванная тем, что на входе приемника с основным сигналом суммируются его же задержанные и искаженные копии, отраженные от неоднородностей линии.

Спектр помех, тоже является результатом взаимодействия и суммирования нескольких сигналов и прежде всего переходных помех от цифровых систем на соседних парах. Протекание частотных характеристик переходного затухания может иметь вовсе немонотонный характер - неравномерность может составлять около 20 дБ в характерных для xDSL полосах частот.

Следовательно, и разность спектров принимаемого полезного сигнала и помех – частотная характеристика помехозащищенности – может быть крайне неравномерной, что снижает информативность результатов измерения и нормирования рабочего затухания и помехозащищенности на фиксированной частоте.

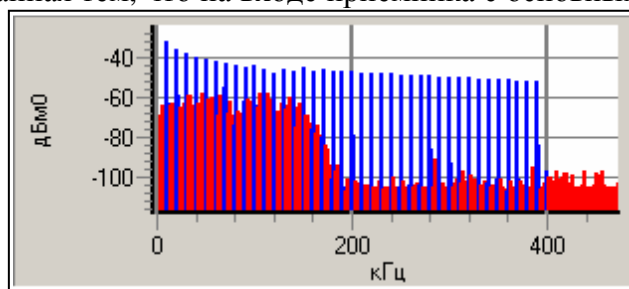


Рисунок 1. Спектр сигнала и помех

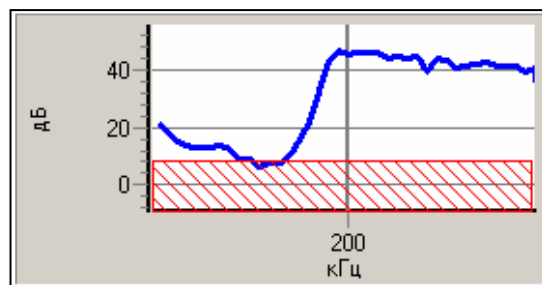


Рисунок 2. Частотная характеристика защищенности

Пример. Рисунок 1 представляет спектр сигнала на входе приемника, состоящий из многочастотного сигнала, моделирующего полезный сигнал SHDSL (скорость 2304 кбит/с,

полоса 0...385 кГц), и спектра помех из соседней пары от SHDSL на меньшей скорости (960 кбит/с, полоса 0...161 кГц). На Рисунке 2 показана частотная характеристика защищенности принимаемого сигнала, достигающая минимальных значений не на максимальной частоте спектра (при максимальном затухании), как этого можно было бы ожидать, а в области частот 100...140 кГц. И именно в этой области нарушается шаблон минимальной помехозащищенности приемника $R_{\min} = 8,5$ дБ, что делает работу цифровой линии невозможной.

Асимметричные цифровые линии на основе многоканальной технологии

Как было показано в [3], скоростной потенциал V_{DMT} цифровой линии, основанной на применяемой в ADSL многоканальной технологии (DMT), определяется формулами:

$$V_{DMT} = f_{\text{symp}} \sum_{i=i_0}^{i=i_1} K_i \quad (2)$$

$$K_i = [0,33(R(f_i) - \Delta A)] \quad (3)$$

$$K_i \leq K_{\max} \quad (4)$$

Параметры приемопередатчиков ADSL приведены в Таблице 2; использованы обозначения:

- K_i - удельная скорость в i -м частотном подканале, (кбит/с)/кГц;
- f_{symp} - скорость передачи символов в каждом подканале (4 кГц);
- K_{\max} - ограничение оборудования, (кбит/с)/кГц;
- $f_i = i\Delta f$ - несущая i -го частотного подканала, кГц;
- $R(f_i)$ - измеренная частотная характеристика защищенности линии связи, дБ;
- $i = i_0 \dots i_1$ - диапазон индекса дискретных частот ($i_0 = [f_0 / \Delta f]$, $i_1 = [f_1 / \Delta f]$);
- $f_0 \dots f_1$ - используемая полоса передачи, кГц;
- Δf , кГц - ширина полосы подканала (4,3125 кГц);
- ΔA , дБ - запас неидеальности приемника (15 дБ).

Таблица 2. Параметры приемопередатчиков ADSL

Наименование цифровой линии		ADSL G.dmt	ADSL G.lite	ADSL2 G.dmt.bis	ADSL2 G.lite.bis	ADSL2+	
ITU-T		G.992.1	G.992.2	G.992.3	G.992.4	G.992.5	
Up-stream	P_{\max} , дБм	+12,5	+12,5	+12,5	+12,5	+12,5	
	$f_0 \dots f_1$, кГц	25,875...138	25,875...138	25,875...138	25,875...138	25,875...138	
	K_{\max}	6	5	9	9	9	
	V_{\max} , кбит/с	608	512	928	928	928	
Down-stream	P_{\max} , дБм	+20,4	+16,2	+20,4	+16,2	+20,4	
	K_{\max}	≥ 6	≥ 4	≥ 12	≥ 7	≥ 12	
	$f_0 \dots f_1$, кГц	Overlapped spectrum	25,875... 1104	25,875... 552	25,875... 1104	25,875... 552	25,875... 2208
		Non-overlapped spectrum	138... 1104	138... 552	138... 1104	138... 552	138... 2208
	V_{\max} , кбит/с	Overlapped spectrum	≥ 5984	≥ 1952	≥ 12000	≥ 3392	≥ 24288
		Non-overlapped spectrum	≥ 5376	≥ 1536	≥ 10752	≥ 2688	≥ 23040

Показатель скоростного потенциала цифровой линии V_{DMT} , соответствующий условиям работы DMT-оборудования на пределе помехозащищенности, достаточно нагляден сам по себе.

Но более интересен запас помехозащищенности линии ΔR_{DMT} на необходимой скорости $V \leq V_{DMT}$. Для его определения в (3) вместо ΔA следует ввести $\Delta A + \Delta R_{DMT}$, то есть:

$$V = f_{symb} \sum_{i=i_0}^{i=i_i} K_i \quad (5)$$

$$K_i = [0,33(R(f_i) - (\Delta A + \Delta R_{DMT}))] \quad (6)$$

Аналитическое решение (4)...(6) не представляется возможным, однако его нетрудно получить выполнением численных расчетов.

Характеристики помехозащищенности цифровых линий

На Рисунках 3, 4 представлены характеристики помехозащищенности кабельных участков разной длины. Характеристики получены с использованием выражений (1) и (4)...(6) при максимально допустимом для указанных приемопередатчиков уровне выходного сигнала и двух моделях помех [1] на входе приемника, которые условно можно считать граничными случаями:

- модель AWGN-140 соответствует идеальному случаю, характеризуется равномерным спектральным распределением шума с плотностью минус 140 дБм/Гц;
- модель ETSI B определяет помехи, характерные для переходов от HDSL-систем при переходном затухании между парами на частоте 300 кГц около 56...60 дБ (спектральная плотность помех равна минус 100 дБм/Гц в полосе до 300 кГц, убывает до минус 115 дБм/Гц к частоте 711 кГц, по достижении которой более не изменяется).

Расчеты произведены для кабеля ТП 0,4 мм и следующих типов оконечного оборудования:

- HDSL, +13,5 дБм, One-pair, 2B1Q;
- SHDSL, +13,5 дБм, One-pair, 16-TCPAM при $V < 2320$ кбит/с, 32-TCPAM при $V > 2320$ кбит/с;
- ADSL2, +20,4 дБм, DMT, Downstream, Non-overlapped spectrum.

Представленные характеристики показывают, что в отсутствие помех (Рисунок 3 - модель AWGN-140) различие в скорости между рассмотренными приемопередатчиками в пределах их общих скоростных возможностей не столь существенно как в случае наличия помех (Рисунок 4 - модель ETSI B). В последнем случае проявляется преимущество ADSL над SHDSL и HDSL.

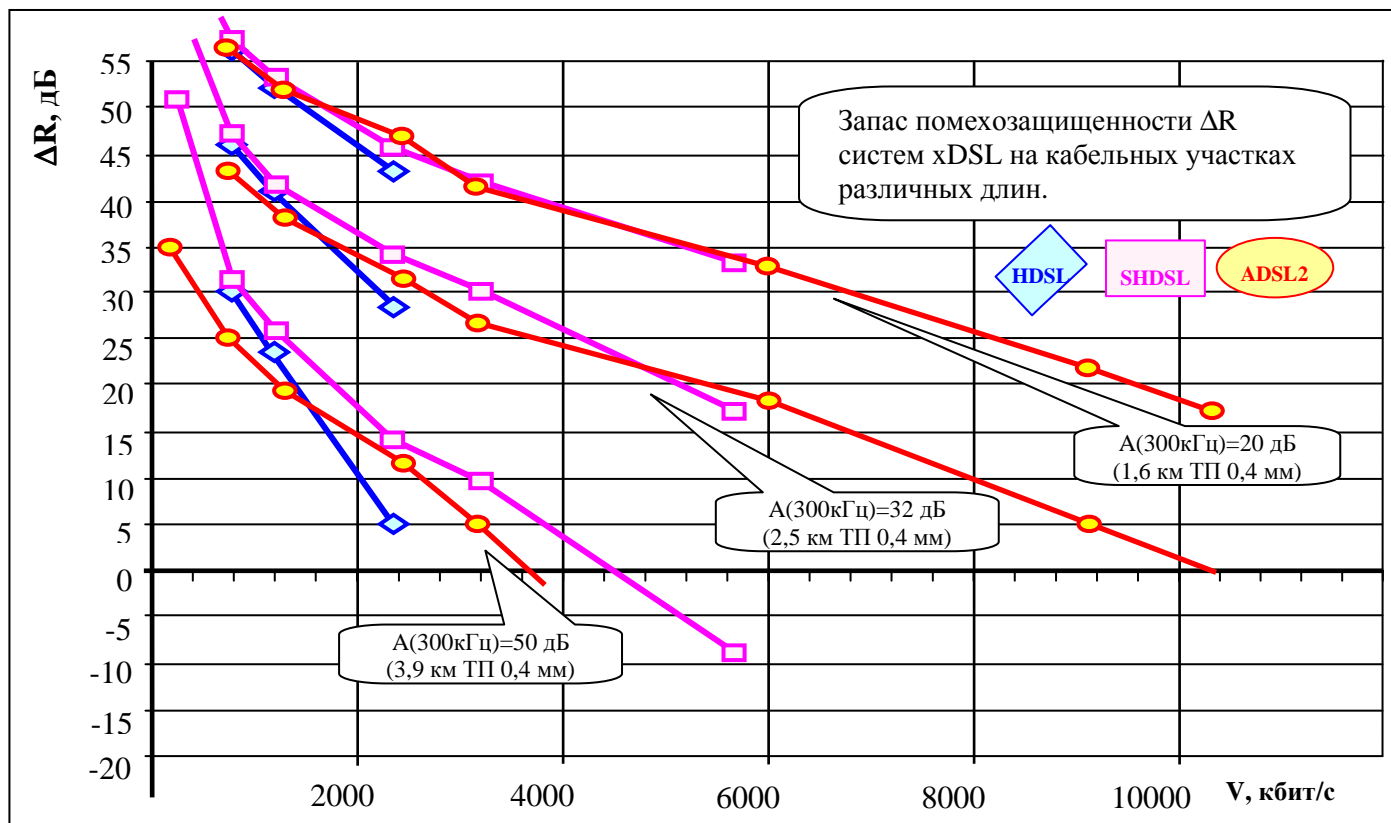


Рисунок 3. Запас помехозащищенности xDSL при условно отсутствующих помехах

Причиной преимущества ADSL является недоиспользование одноканальными системами располагаемого динамического диапазона на нижних частотах при его естественном дефиците на верхних – см. (1). Многоканальные технологии (ADSL), адаптивно утилизируя весь доступный динамический диапазон - см. (4)...(6), лишены этого недостатка, благодаря чему и обеспечивают более высокую скорость передачи.

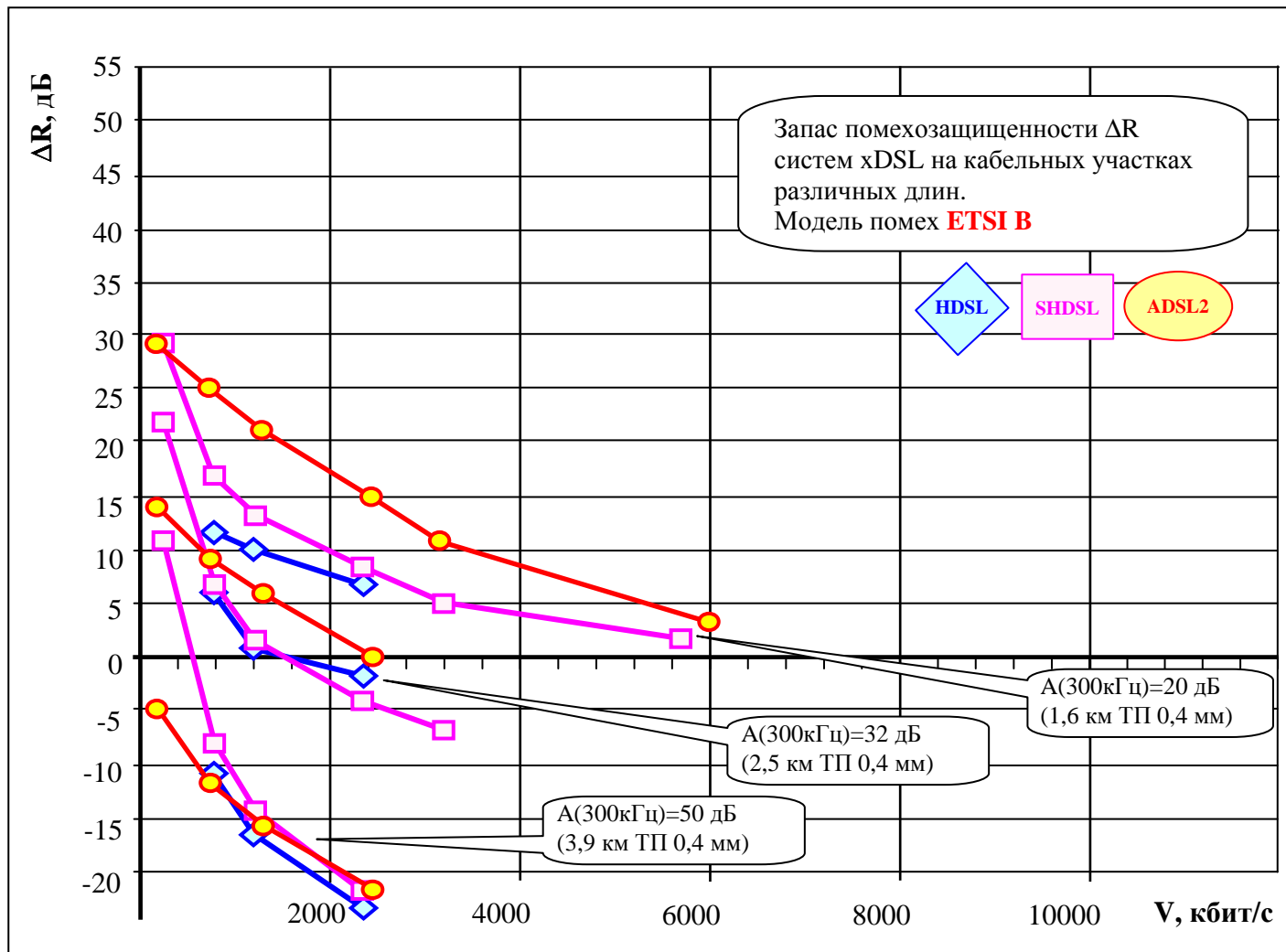


Рисунок 4. Запас помехозащищенности xDSL при условно предельных помехах

Исключение составляет случай работы линии на низкой скорости в условиях помех (Рисунок 4). При этом запас помехозащищенности SHDSL существенно выше запаса ADSL, что особенно проявляется на линии с максимальной из трех рассмотренных длиной. Величины запасов на такой линии в большинстве случаев отрицательные, что само по себе исключает возможность работы, однако при $V < 384$ кбит/с устойчивая работа SHDSL возможна. Объяснение этого заключается в том, что при столь низких скоростях верхняя граница полосы частот, используемой SHDSL, не превосходит 64 кГц (Таблица 1) и условия передачи в этой полосе существенно лучше, чем в полосе ADSL, начинающейся в случае применения рассматриваемого режима без перекрытия спектров (ADSL non-overlapped) со 138 кГц.

Анализ характеристик помехозащищенности ADSL (Рисунки 3 и 4) показывает, что их наклон существенно зависит от затухания и незначительно - от помеховой обстановки. Такое упрощение позволяет использовать для оценки запаса помехозащищенности следующую простую формулу:

$$\Delta R_{DMT}(V) = A(300kHz) \times (V_{DMT} - V) / 6000, \text{ дБ} \quad (7)$$

Обеспечение эксплуатационной надежности цифровых линий

Современные приемопередатчики xDSL имеют функции адаптации по скорости и понижению мощности передатчика (например, Power Backoff для SHDSL) до уровня, при котором гарантируется устойчивая работа xDSL-линии и создается минимум переходных помех. Наличие этих функций снижает, но не устраняет остроту проблем, возникающих из-за недостаточного переходного затухания кабеля.

В процессе наращивания ресурсов сетей xDSL-доступа, следует исходить из того, что:

- цифровизация любой последующей пары многопарного кабеля не должна приводить к критическому снижению запаса помехозащищенности эксплуатируемых xDSL-линий;
- выбор нормативного значения запаса помехозащищенности xDSL-линии должен учитывать не только возможную деградацию характеристик кабеля из-за климатических воздействий, естественного старения и т.д., но так же процесс последующего введения в кабель дополнительных xDSL-линий.

Специализированные измерительные приборы на основе данных измерения частотных характеристик пары способны определить запас помехозащищенности $\Delta R(V)$, причем:

- для одноканальных систем (G.991.x - HDSL\SHDSL и т.п.) запас на выбранной из ряда возможных значений скорости $\Delta R_{DSL}(V)$ измеряется непосредственно по (1), а
- для DMT-систем (ADSL G.992.x и т.п.) запас на необходимой скорости $\Delta R_{DMT}(V)$ вычисляется по (7) с учетом скоростного потенциала линии V_{DMT} , определенного по (2)...(4).

В настоящее время можно рекомендовать следующие значения запасов помехозащищенности ΔR_{min} проектируемых xDSL-линий:

- 6 дБ при уплотнении однопарных кабелей или цифровых малопарных кабелей, то есть кабелей с нормированным переходным затуханием (не менее 62 дБ) в диапазоне рабочих частот цифровой линии;
- 10 дБ при уплотнении пары в пучке, уже имеющем хотя бы одну цифровую линию;
- 15 дБ при уплотнении пары в пучке, в котором еще нет цифровых линий.

Ответ на вопрос о возможности цифрового уплотнения заявленной пары на требуемой скорости V должен быть получен сопоставлением величины измеренного запаса с нормативом $\Delta R(V) > \Delta R_{min}$. Наличие нормированного запаса помехозащищенности линии на требуемой скорости передачи должно обеспечить устойчивость ее работы при последующем введении в многопарный кабель дополнительных цифровых линий.

Литература

1. А.В.Кочеров, Н.И.Тарасов. Оценка скоростного потенциала ADSL. Вестник связи. 04/2005
2. Ю.А.Парфенов, Л.И.Кайзер, О.Н.Чернова, М.А.Кузнецов. Отбор цепей в кабельных линиях для xDSL. Вестник связи. 08/2003
3. А.В.Кочеров. Ограничение скоростного потенциала асимметричной цифровой абонентской линии электрическими характеристиками медных кабелей. Электросвязь. 11/2004