

Ограничение скоростного потенциала асимметричной цифровой абонентской линии электрическими характеристиками медных кабелей

Кочеров А.В., заместитель директора ООО «Аналитик-ТС»
andrey@analytic.ru +7 (495) 775-60-11 www.analytic.ru

Вариант статьи опубликован в журнале «Электросвязь» №11 2004

В статье изложена методика расчета скоростного потенциала асимметричных цифровых линий связи (ADSL), реализуемая анализатором систем передачи и кабелей связи AnCom A-7. Методика учитывает ограничения скоростного потенциала оконечного оборудования, неравномерность спектра передатчика, ограниченную чувствительность приемника, затухание сигнала в линии связи, потери на дефектах кабеля, распределение помех в полосе передачи от любых источников (в т.ч. переходные помехи).

Введение

Развитие технологий обработки сигнала, применяемых в оконечном оборудовании асимметричных цифровых абонентских линий (ADSL), позволит в ближайшее время передавать по двухпроводной линии симметричного медного многопарного кабеля потоки со скоростью до 48 Мбит/с [1]. И это при том, что скорость телефонного модема (ITU-T V.90/V.92), работающего по той же паре, достигнув к 1998 году значения 56 кбит/с более не прогрессирует [2]. Чуда, конечно, не случилось и увеличение скорости на три порядка определяется ровно таким же уширением используемой полосы частот:

- V.90/V.92 – до 4 кГц,
- ADSL2++ – до 4,4 МГц.

Если такой прогресс (см. Рисунок 1 и Таблицу 1) имеет место, то хотелось бы получить ответы на вопросы:

- почему при очевидных преимуществах количество подключений, выполняемых посредством традиционных телефонных модемов, продолжает возрастать, многократно превышая число линий ADSL?
- и не происходит ли это из-за недостаточной эксплуатационной надежности этих цифровых линий и чем определяется их надежность?
- и не является ли тому причиной недостаточный уровень обследования абонентской линии, выполняемого перед установкой цифрового оборудования?

В этой связи рассмотрим проблему определения и обеспечения эксплуатационной надежности асимметричных цифровых абонентских линий.



Рисунок 1

Таблица 1

Наименование цифровой линии	ITU-T	Параметры приемопередатчиков для нисходящего (↓) и восходящего (↑) потоков согласно [2]...[6]			
		Максимальная скорость передачи V_{max} , Мбит/с	Полосы частот с перекрытием спектров $f_0 \dots f_1$, кГц		Максимальный уровень сигнала (100 Ом) P_{max} , дБм
ADSL G.dmt	G.992.1	↓ 6,0 ↑ 0,6	↓25,875...1104	↑25,875...138	↓+20,4 ↑+12,5
ADSL G.lite	G.992.2	↓ 1,5 ↑ 0,5	↓25,875...552	↑25,875...138	↓+16,2 ↑+12,5
ADSL2 G.dmt.bis	G.992.3	↓12,0 ↑1,0	↓25,875...1104	↑25,875...138	↓+20,4 ↑+12,5
ADSL2 G.lite.bis	G.992.4	↓ 3,0 ↑1,0	↓25,875...552	↑25,875...138	↓+16,2 ↑+12,5
ADSL2+	G.992.5	↓24,0 ↑1,0	↓25,875...2208	↑25,875...138	↓+20,4 ↑+12,5
ADSL2++	G.992.?	↓48,0 ↑1,0	↓25,875...4416	↑25,875...138	↓+20,4 ↑+12,5

Помехозащищенность и скоростной потенциал ADSL

ADSL-технология [3]...[7], обычно применяемая для подключения компьютеров индивидуальных пользователей и малого бизнеса, является асимметричной (скорость нисходящего потока существенно выше скорости восходящего) и основана на разделении используемой полосы частот $f_0 \dots f_1$ на множество дискретных подканалов (технология DMT – Discrete Multi-Tone modulation).

При установлении соединения приемопередатчики осуществляют измерение используемой пары, причем целью этих измерений является определение максимально возможного количества бит данных (максимальной удельной скорости передачи) K_i , передаваемых в каждом частотном подканале с частотой передачи символов. Ширина подканала Δf задана в [3] (см. G.992.1-7.11.1 Subcarriers) равной 4,3125 кГц. Символьная скорость f_{symb} меньше ширины подканала и согласно [3] (см. G.992.1-7.4.1 Data symbols) составляет 4,0 кГц.

Удельная скорость определяет скорость передачи $V_i = f_{symb} K_i$ в подканале и зависит от защищенности a_i i -го подканала согласно формуле Шеннона для идеального приемника:

$$K_i = [\log_2(a_i + 1)] \quad (1)$$

Здесь: квадратные скобки $[\]$ выделяют целую часть результата; защищенность определяется как $a_i = S_i / N_i$, где S_i - среднеквадратичный уровень сигнала i -ой поднесущей и N_i - среднеквадратичный уровень шума, измеренный с подавлением этой поднесущей в полосе, соответствующей ширине i -го подканала.

Если защищенность выразить в децибелах $A_i = 10 \lg(a_i)$ и представить как разность измеренной помехозащищенности R_i и запаса неидеальности приемника ΔA , также выраженных в децибелах, тогда с учетом (1):

$$A_i = R_i - \Delta A, \text{ дБ} \quad (2)$$

$$a_i = 10^{(R_i - \Delta A)/10}$$

$$K_i = [\lg(10^{(R_i - \Delta A)/10} + 1) / \lg(2)] \approx [0,33(R_i - \Delta A)], \text{ кбит/кГц} \quad (3)$$

Величина запаса неидеальности приемника ΔA определяется способом модуляции и зависит от реализации приемопередатчиков. Рекомендации G.992.x (см. G.992.1-7.13.2. Noise/distortion floor [3] и G.992.3-8.9.2 Noise/distortion floor [5]) требуют, чтобы этот запас для любого подканала составлял бы:

$$\Delta A = 20 \text{ дБ} \quad (4)$$

Скорость передачи V определяется суммой скоростей на каждой поднесущей V_i в рамках полосы частот передачи $f_0 \dots f_1$, которой соответствует диапазон изменения индекса $i = i_0 \dots i_1$. Тогда с учетом (3):

$$V = \sum_{i=i_0}^{i=i_1} f_{symb} K_i \approx 4,0 \sum_{i=i_0}^{i=i_1} [0,33(R_i - \Delta A)], \text{ кбит/с} \quad (5)$$

где:

$$i_0 = [f_0 / \Delta f] \quad (6)$$

$$i_1 = [f_1 / \Delta f] \quad (7)$$

Формула (5) позволяет оценить скоростной потенциал заявленной к установке ADSL-оборудования линии связи, не выполняя собственно установку этого оборудования, а ключевой характеристикой линии, таким образом, является ее частотная характеристика помехозащищенности $R_i = R(i\Delta f)$, $i = i_0 \dots i_1$.

Кроме основного ограничения по помехозащищенности при выполнении практических измерений необходимо учитывать дополнительные причины ограничения скорости:

- реализация конкретных приемопередатчиков,
- конечная чувствительность приемника,
- неравномерность спектра передатчика.

Ограничение скорости возможностями приемопередатчиков состоит в том, что лимитирована удельная скорость, обеспечиваемая модулятором оконечного оборудования $K_i \leq K_{\max}$, что согласно (5) ограничивает скоростной потенциал ADSL-оборудования величиной V_{\max} .

$$V_{\max} = K_{\max} f_{\text{ymb}} (f_1 - f_0) / \Delta f$$

Так для ADSL-оборудования в строгом соответствии с G.992.1 [3] $K_i \leq K_{\max} = 6$ и поэтому $V_{\max} = 6 \times 4,0 \times (1104 - 25,875) / 4,3125 = 6000$ кбит/с.

Рекомендации G.992.3 [5] и G.992.5 [7] определяют величину максимальной удельной скорости $K_i \leq K_{\max} = 8$ и не запрещают ее дальнейшее увеличение (обычно $K_i \leq K_{\max} = 12$), что позволяет достигать значений скорости до 8000 кбит/с и более. Таким образом, после выполнения расчета по (3) перед суммированием по (5) следует ограничить удельную скорость:

$$K_i \leq K_{\max} \tag{8}$$

Ограничение скорости, вызванное конечной чувствительностью, определяемой динамическим диапазоном приемника, может быть учтено анализом частотной характеристики затухания. Пусть:

- динамический диапазон ADSL-приемника составляет 96 дБ (16 разрядов АЦП),
- прием нисходящего потока осуществляется в условиях передачи восходящего в режиме перекрытия спектров,
- сигнал восходящего потока имеет уровень равный +12,5 дБм, пик-фактор этого сигнала составляет 12 дБ, пиковый уровень достигнет +12,5+12 = +24,5 дБм и этот максимальный уровень должен восприниматься приемником без искажений.

Тогда:

- уровень собственных шумов на входе приемника составит + 24,5 – 96 = –71,5 дБм;
- помехозащищенность приемника на максимальной удельной скорости согласно (3) составит $R_i = 3K_{\max} + \Delta A$:

○ для G.992.1 $K_{\max} = 6$, $R_i = 3 \times 6 + 20 = 38$ дБ,

○ для G.992.3 и G.992.5 $K_{\max} = 12$, $R_i = 3 \times 12 + 20 = 56$ дБ;

- уровень входного сигнала не должен опускаться ниже $P_{\min} = -71,5 + R_i$ дБм,
- поэтому критическое затухание сигнала в линии, при котором еще может быть обеспечена работа с максимальной удельной скоростью, составит $A_{\max} = +12,5 - P_{\min}$, то есть:

○ для G.992.1 $A_{\max} = +12,5 - (-71,5 + 38) = 46$ дБ,

○ для G.992.3 и G.992.5 $A_{\max} = +12,5 - (-71,5 + 56) = 28$ дБ;

- увеличение затухания в каждом частотном подканале сверх этого порога на каждые 3 дБ согласно (3) будут приводить к снижению максимальной удельной скорости K_{\max} на 1 кбит/кГц, что и должно быть дополнительно учтено в (8).

Неравномерность спектра сигнала по рекомендации G.992.5 в полосе передачи составляет 11,3 дБ (см. G.992.5-A.1.2 ATU-C downstream transmit spectral mask for overlapped spectrum operation), что проявляется снижением спектральной плотности при переходе от частоты 1104 кГц к 2208 кГц (в области 25,875...1104 кГц спектральная плотность равномерна). Рекомендации ранних выпусков регламентируют равномерную спектральную характеристику в полосе передачи. Неравномерность спектра передаваемого сигнала целесообразно учитывать введением дополнительного эквивалентного затухания, протекание частотной характеристики которого соответствует снижению спектральной плотности относительно максимума, а механизм учета аналогичен описанному выше.

Измерение скоростного потенциала ADSL

Именно на возможности быстрого измерения частотных характеристик помехозащищенности и затухания основана технология определения скоростного потенциала линии, реализованная в анализаторе AnCom A-7 (далее - анализатор). Библиотека измерительных решений, входящая в состав программного обеспечения анализатора, позволяет оценить скоростной потенциал цифровой линии, образованной заявленной парой в многопарном кабеле и ADSL-оборудованием требуемого типа. Кроме того для максимальной скорости анализатор определяет запас помехозащищенности.

При выполнении измерений линии в полосе частот передачи $f_0 \dots f_1$ с применением измерительного многочастотного сигнала (МЧС), являющегося моделью DMT, анализируются помехи от всех возможных источников – тепловые шумы линии, переходные помехи от аналоговой телефонии, сетей питания, помехи от радиостанций, помехи, вызванные микроперерывами связи, и, что самое главное, переходные помехи от ранее установленных xDSL-систем.

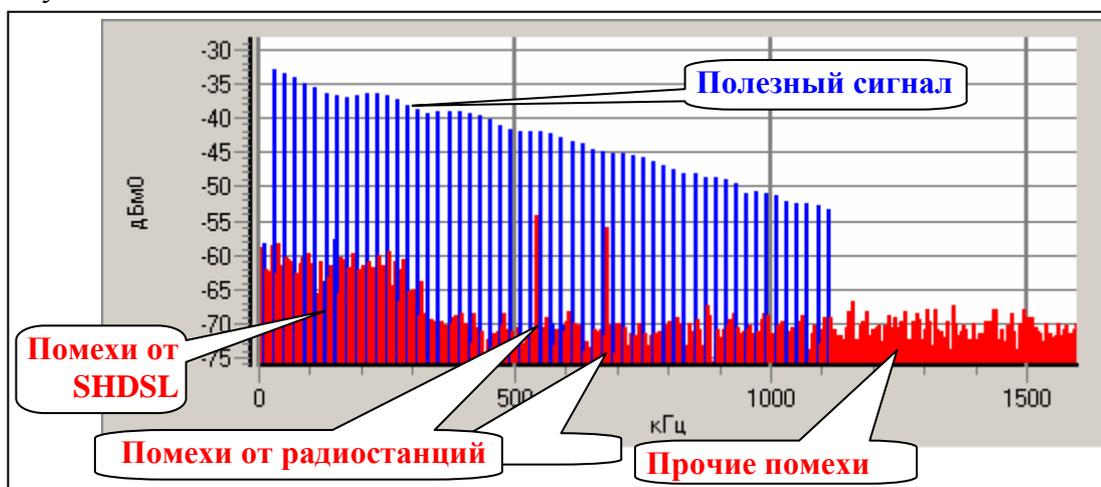


Рисунок 2

Далее спектр помех автоматически сопоставляется со спектром принимаемого полезного сигнала, чем обеспечивается точный учет неравномерности частотной характеристики затухания полезного сигнала в линии, и получается частотная характеристика защищенности $R(f_i)$.

Результаты измерений представляются анализатором как в виде совокупности измеренных спектрограмм (см. Рисунок 2), частотных характеристик рабочего затухания (АЧХ), защищенности (С/Ш) и группового времени прохождения (ГВП), так и единственным параметром – **скоростным потенциалом линии** (Скорость, кбит/с), которая может быть получена на заявленной паре при установке ADSL-оборудования того или иного типа.

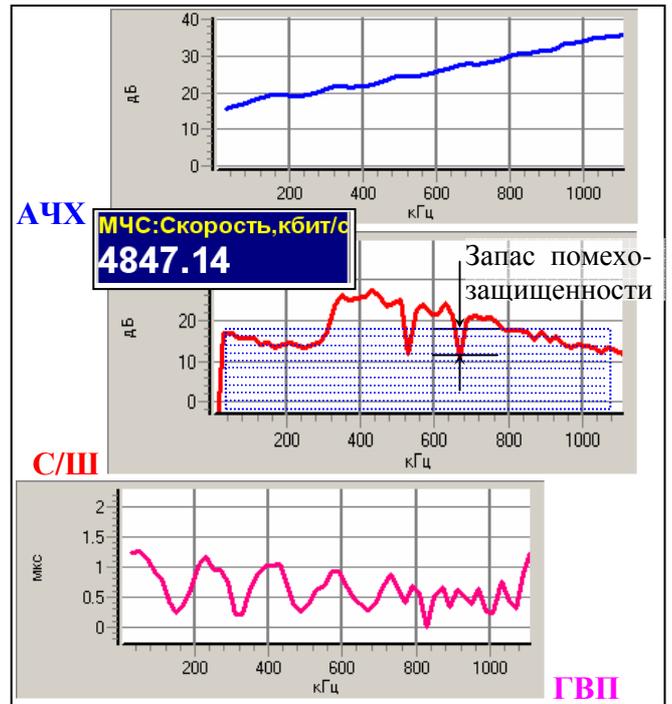


Рисунок 3

Вторым параметром является фактический **запас помехозащищенности** приема при условии работы линии на максимальной скорости и определяемый (см. Рисунок 3) наименьшей в диапазоне частот передачи $f_0 \dots f_1$ разностью частотной характеристики измеренной защищенности и минимальной защищенности, необходимой для обеспечения приема на максимальной скорости $\Delta R = \min_{i=i_0 \dots i_1} (R(f_i) - R_{\min})$. Величина минимальной защищенности согласно (3) составляет $R_{\min} \approx K_{\max} / 0,33 + \Delta A$.

Таблица 2 и Рисунок 4 представляют зависимости от длины кабеля запаса помехозащищенности на максимальной скорости и скоростного потенциала нисходящего потока линии ADSL2+. Измерения проведены в условиях отсутствия переходных помех.

Таблица 2

Длина линии (кабель ТП 0,5 мм) L, км	Затухание на трех частотах, дБ			Параметры цифровой линии ADSL2+ в условиях отсутствия переходных помех	
	300 кГц	1104 кГц	2208 кГц	Запас помехозащищенности на максимальной скорости 24 Мбит/с ΔR , дБ	Скоростной потенциал V, Мбит/с
0,1	1,0	1,7	2,4	22	24,0
0,8	7,7	14,6	20,1	0	24,0
1,3	12,5	23,3	32,2	-15	22,0
1,8	17,7	32,6	46,1	-32	18,5
2,7	26,6	49,0	66,0	-43	12,9
4,4	43,0	78,0	>105,0	<-45	6,4
5,8	57,0	105,0	>105,0	<-45	2,8
8,4	86,0	>105,0	>105,0	<-45	1,4

Приведенные графики иллюстрируют адаптивные свойства DMT-технологии:

- с увеличением длины кабеля запас помехозащищенности на максимальной скорости (то есть по сути запас на краю номинальной полосы частот) катастрофически падает,
- скорость же уменьшается существенно более плавно по той причине, что за счет разделения диапазона частот на множество подканалов приемопередатчики используют каждый подканал для передачи с оптимальной для него скоростью, полностью утилизируя как диапазон частот, так и динамический диапазон.

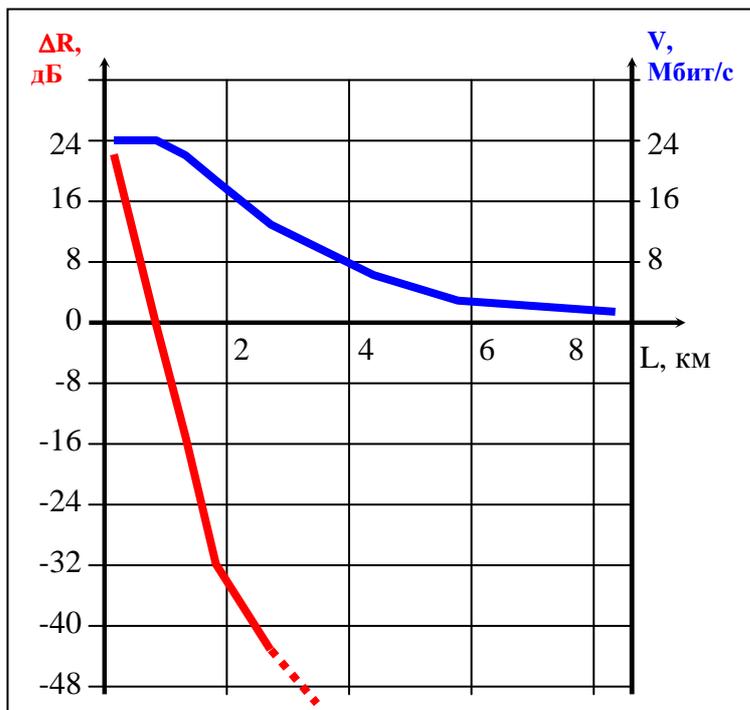


Рисунок 4

Именно недостаточное использование располагаемого динамического диапазона на нижних частотах и его естественный дефицит на верхних является органическим недостатком одноканальных систем (HDSL/SHDSL/SDSL).

Влияние дефектов кабеля на работоспособность ADSL

Отдельно следует остановиться на упомянутой выше характеристике ГВП, отражающей «неодновременность» поступления на вход приемника совокупности частотных подканалов, посланных передатчиком.

Причиной неравномерности ГВП кабельной линии является суммирование на согласованном входе приемника основного сигнала и сигнала (сигналов), поступающего в ту же точку с задержкой. Наличие задержанного сигнала вызвано удлинением пути, который проходит этот сигнал. Чтобы эффект задержки имел место, необходимо наличие в кабеле не менее двух неоднородностей или ненагруженного отвода. Основной сигнал, пройдя с потерями первую неоднородность, частично отразится от второй, распространяясь в обратном направлении, вновь частично отразится от первой и, в конце концов, попадет на вход приемника как задержанный. При суммировании основного и задержанного сигнала возникает интерференционная картина, которую следует представлять как суммирование векторов на фазовой плоскости. Результат суммирования выражается в неравномерности (колебательном характере) частотных характеристик по амплитуде (АЧХ) и фазе (ФЧХ), следовательно, и характеристика ГВП как производная ФЧХ будет иметь колебательный характер.

Рекомендация G.992.1 (см. G.992.1-A.1.2.1 Passband PSD and response) определяет максимально допустимую неравномерность характеристики ГВП передатчика равной 50 мкс. Столь значительный по сравнению с величиной, обратной ширине полосы передачи (для G.992.1 $T = 1/(f_1 - f_0) = 1/(1,104 - 0,026) = 0,93$ мкс), допуск обусловлен именно разделением полосы передачи на каналы малой ширины и, следовательно, повышением продолжительности передачи символа до $T_{symb} = 1/f_{symb} = 1/0,004 = 250$ мкс.

Максимальную неравномерность ГВП кабелей связи, которую автору удавалось наблюдать в полосе частот 10...2000 кГц на реальных кабелях и искусственно создавать, вводя в линию «замокшие» муфты, разбивая пары и подключая отводы, не превышала 7 мкс. Полагая, что допустимая неравномерность ГВП для приемника не превышает нормированной неравномерности передатчика, то есть составляет 50 мкс, можно считать установленным, что многоканальная DMT-технология передачи в отличие от одноканальных (HDSL/SHDSL/SDSL) не чувствительна к неравномерности ГВП кабелей связи.

Однако это не означает, что DMT-технология не чувствительна к дефектам кабеля вообще. Наличие дефектов, вызывая потери, способствует увеличению рабочего затухания, уменьшению помехозащищенности и, следовательно, снижению скорости. Это снижение полностью учитывается анализатором при измерении частотной характеристики помехозащищенности, выполняемом для определения скоростного потенциала линии.

Процедура обследования кабельной линии для ADSL

Измерительная процедура, основанная на контроле частотных характеристик защищенности и затухания, оптимальна для выполнения обследования линии, обычно проводимого поставщиком услуг после получения заявки от потенциального клиента и перед собственно заключением договора о предоставлении услуг, основанных на ADSL.



Рисунок 5

· Практикуемое в этих целях определение возможности цифрового уплотнения пары на основании данных номинальной длины и типа кабеля не в состоянии дать сколько-нибудь полного представления о фактическом характере частотных искажений и спектральном распределении помех. Предлагаемая же методика позволяет произвести обследование (см. Рисунок 5) тем более полное, чем больше времени выделяется для его проведения.

Минимальная продолжительность контроля линии в двух направлениях передачи с протоколированием результатов (см. Рисунок 3) занимает около минуты. Эта процедура может быть дополнена длительным мониторингом скорости и помехозащищенности линии в предполагаемой к использованию полосе частот. Результаты мониторинга (см. Рисунок 6) представляются анализатором как в виде временных диаграмм, так и единственным показателем – процентом секунд, испорченных снижением минимальной в полосе передачи защищенности ниже заданного порога (Мин.Сигн/шум,%).

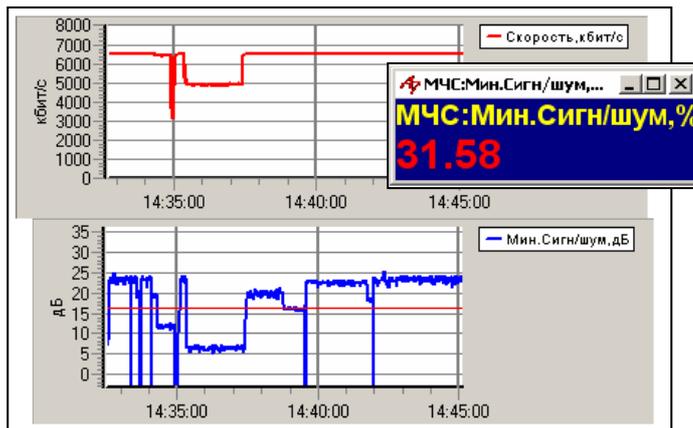


Рисунок 6

Результаты обследования кабельной линии для ADSL

Первое – целесообразность цифрового уплотнения кабеля. Результаты обследования позволяют принять решение о целесообразности удовлетворения заявки потенциального клиента:

- поставщик услуг может получить дополнительный доход за счет оплачиваемого повышения скорости доступа, гарантированного наличием измеренного запаса помехозащищенности;
- отсутствие запаса позволит сэкономить на непредвиденных расходах, вызванных необходимостью проведения мероприятий, обеспечивающих работоспособность цифровой линии на негодном кабеле.

Второе – обеспечение восстановительных работ на кабеле. Если же заявка должна быть выполнена любой ценой и оператор готов к проведению работ на кабеле, то анализатор применительно к этой задаче позволяет провести его паспортизацию в ручном или автоматическом режиме:

- измерением емкости пары и сопротивления шлейфа решить вопрос о соответствии «известных» длины и типа кабеля его фактическому состоянию;
- построением рефлектограмм определить наличие и характер дефектов в кабеле;
- по спектральному составу помех выявить их природу, источники и значимость;
- по данным измерений частотных характеристик рабочего и переходного затухания, затухания асимметрии и несогласованности, импеданса, и помехозащищенности, проведенным до и после выполнения восстановительных работ на кабеле, оценить эффективность этих работ.

Третье – обеспечение соблюдения условий ЭМС в процессе цифровизации. При увеличении количества цифровых линий в многопарном кабеле часты случаи, когда цифровизация еще одной дополнительной пары приводит к потере работоспособности ранее успешно установленных цифровых линий. Причиной этого является исчерпание запаса помехозащищенности линий, вследствие увеличения уровня переходных помех. Если же цифровизация кабеля выполняется оператором связи в соответствии с принятой методикой, основанной на измерении и нормировании запаса помехозащищенности, то контроль грамотно заданного норматива не позволит допустить «сигнального переполнения» кабеля.

Таким образом, анализатор AnCom A-7, позволяя свести множество различных причин, определяющих качество линии к двум предельно понятным показателям – скоростному потенциалу и запасу помехозащищенности ADSL, обеспечивает в то же время поиск причин недостаточности скоростного потенциала или запаса помехозащищенности.

Отличительной особенностью анализатора AnCom A-7 является то, что его программное обеспечение содержит собственно аппарат определения скоростного потенциала, а настройка на тип оконечного xDSL-оборудования осуществляется путем определения критических шаблонов по затуханию, защищенности и удельной скорости, заданием уровня и спектрального положения измерительного МЧС. Это позволяет пользователю легко адаптировать анализатор для решения как известных в настоящее время (с анализатором поставляются измерительные решения для HDSL/SHDSL/SDSL/ADSL/ADSL2/ADSL2+), так и перспективных задач.

Литература

- [1] Г.В.Башилов. Широкополосный доступ по медной паре. Вестник связи. 06/2004
- [2] А.Кочеров, В.Марков, О.Перетьяко. Об ограничении скоростного потенциала V.34-модема электрическими характеристиками канала сети ТфОП. Вестник связи. 04/2002
- [3] ITU-T G.992.1. Asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers. 06/1999
- [4] ITU-T G.992.2. Splitterless asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers. 06/1999
- [5] ITU-T G.992.3. Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2). 07/2002
- [6] ITU-T G.992.4. Splitterless asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (splitterless ADSL2). 07/2002
- [7] ITU-T G.992.5. Asymmetric Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers – Extended bandwidth ADSL2 (ADSL2+). 05/2003