

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ЦИФРОВЫХ АБОНЕНТСКИХ ЛИНИЙ,
ПОСТРОЕННЫХ ПО ADSL-ТЕХНОЛОГИИ**

**THE SIMULATION OF CHARACTERISTICS OF DIGITAL SUBSCRIBER LINES BUILD ON
THE BASIS OF ADSL TRANSMISSION TECHNIQUE**

Аннотация. В статье даны модель цифровых абонентских линий, построенных с применением технологии передачи ADSL, и результаты моделирования зависимости скорости передачи по различным абонентским линиям от длины и величины шумов.

Summary. The article is devoted to simulation of digital subscriber lines build on the basis of ADSL transmission technique. The simulation results of transmission rate dependence on communication range and noise values using different loops are given in the article.

В связи со стремительным развитием технологий xDSL и появлением на отечественном рынке большого количества оборудования связи, использующего эти технологии, проблема оценки характеристик цифрового абонентского доступа xDSL с учетом характеристик реальных линий местных сетей приобретает особую остроту. За рубежом объективной оценке характеристик xDSL-оборудования уделяется большое внимание.

В результате исследований специалистов в области xDSL-доступа в рекомендациях ITU-T G.99x [1-12], которые регламентируют характеристики оборудования xDSL, приведены скорости передачи информации по цифровым абонентским линиям при работе по зарубежным эталонным абонентским линиям (АЛ) с типовыми шумами. В Украине также проводятся исследования характеристик xDSL-доступа: результаты тестирования xDSL-оборудования публикуются в периодической печати (см, например, [13]).

Однако характеристики отечественных АЛ отличаются от зарубежных, поэтому применять результаты зарубежных исследований для оценки характеристик xDSL-оборудования при использовании отечественных телефонных кабелей нецелесообразно. Исследования характеристик xDSL-оборудования на отечественных телефонных кабелях носят несистематический и неметодический характер, в публикациях о результатах тестирования xDSL-оборудования отсутствуют сведения об условиях тестирования (например, об уровне помех в абонентской линии), что не позволяет сделать выводы о реальных возможностях оборудования.

Целью настоящей статьи является моделирование цифровых абонентских линий, построенных на базе технологии ADSL (как самой распространенной и перспективной на сегодняшний день), позволяющее получить зависимость скорости передачи по ADSL-линии от типа телефонного кабеля, длины абонентской линии и уровня помех на входе приемника.

1. Методика моделирования. В результате анализа характеристик и алгоритмов функционирования ADSL была разработана математическая модель, включающая параметры, определяющие ее помехозащищенность (рис. 1). Модель ADSL включает: блок формирования спектра группового сигнала; DMT-модулятор и соответственно демодулятор; передающий и приемный фильтры с передаточными функциями (ПФ) $P(\omega)$ и $F(\omega)$ соответственно; канал связи с ПФ $H(\omega)$ и источник белого шума со спектральной плотностью мощности шума N_0 . В модель не включены алгоритмы кодирования кодом Рида-Соломона и треллисное кодирование, которые присутствуют в системе передачи ADSL. Это связано с тем, что учет этих алгоритмов повлек бы за собой значительное усложнение модели, что нежелательно, а кроме этого, выигрыш от 3 до 5 дБ, обеспечиваемый этими алгоритмами, практически не связан с частотными характеристиками линии передачи и может быть дополнительно учтен в результатах моделирования.

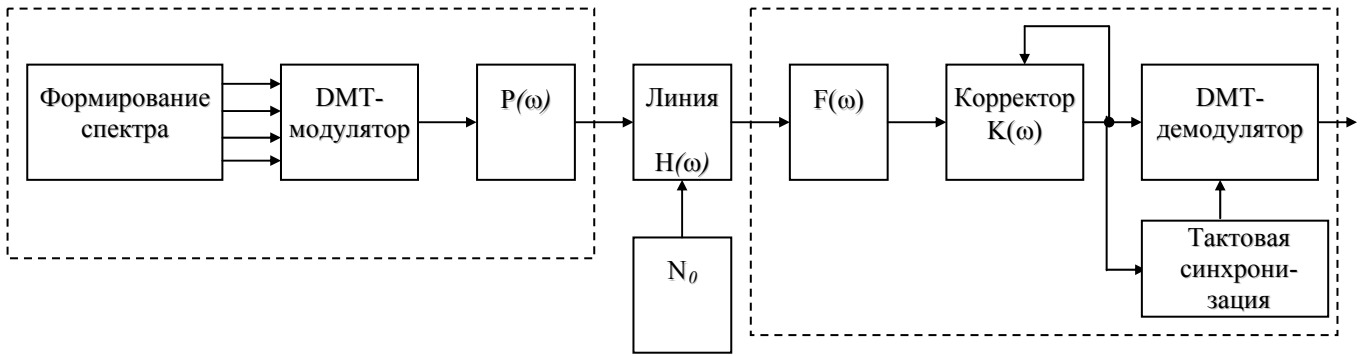


Рисунок 1 – Модель ADSL

Дальность связи по ADSL и достижимая при этом скорость передачи информации определяются прежде всего защищенностью принимаемого сигнала от аддитивных помех, а также требуемой вероятностью ошибки, которая регламентируется рекомендациями ITU, равной 10^{-7} .

Воспользовавшись приведенной математической моделью, осуществим моделирование характеристик ADSL для различных АЛ, задаваемых соответствующими ПФ. В качестве мешающего фактора будем учитывать только белый аддитивный гауссовский шум, действующий в линии передачи.

Напомним, что в соответствии с рекомендацией G.992.1 в ADSL в нисходящем направлении передачи (от сети к пользователю) используются ортогональные несущие $\{\sin k\omega_0 t, \cos k\omega_0 t\}$, $k = 6, 7, 8, \dots, 255$, $\omega_0 = 2\pi \cdot 4,3125 \cdot 10^3$ рад/с, занимающие полосу частот 25,875 – 1104 кГц. Число несущих и количество передаваемых на каждой несущей бит информации задается адаптивно в зависимости от характеристик канала связи, что определяет как скорость передачи, так и занимаемую полосу частот канала. Максимальное количество $b(i)$ передаваемых в течение посылки на i -й несущей бит информации связано с отношением сигнал/шум $SNR(i)$ на частоте i -й несущей и вероятностью ошибки p на выходе приемника соотношением [14, 15]

$$b(i) = \text{floor} \left\{ \log_2 \left(1 + \frac{3 SNR(i)}{h^2} \right) \right\}, \quad (1)$$

где $\text{floor}\{x\}$ – операция отбрасывания дробной части числа x , а h – это отношение “полурасстояния” между ближайшими точками сигнального созвездия к среднеквадратическому отклонению гауссовского шума в i -м канале модема.

Величину h будем вычислять по формуле

$$h = Q^{-1} \left(\frac{p}{K \beta} \right), \quad (2)$$

где $Q^{-1}(x)$ – функция, обратная $Q(x)$, $Q(x) = \int_x^{\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{y^2}{2}} dy$; p – вероятность ошибки; K – коэффициент размножения ошибок, а β – коэффициент, получающийся в результате усреднения по $b(i)$ выражения

$$\frac{4(1 - 2^{-b(i)/2})}{b(i)}. \quad (3)$$

Согласно рекомендациям ITU G.992.1 и G.992.2, $b(i)$ в системе ADSL может принимать значения от 2 до 15 бит. При $b(i)=2$ выражение (3) оказывается равным 1, а при $b(i) = 15$, оно приблизительно равно 0,27, так что $\beta \approx (1+0,27)/2 = 0,635$. Коэффициент размножения ошибок K с учетом того, что в системе используется 3-отводный скремблер, равен приблизительно 2,75. Таким образом,

$$h \approx Q^{-1} \left(\frac{p}{1,7} \right). \quad (4)$$

Для расчета суммарной скорости передачи данных сложим полученные значения $b(i)$ для всех используемых в системе несущих и умножим полученную сумму на 4000 Гц – частоту информационных кадров ADSL [3]:

$$R = 4000 \cdot \sum_{i=6}^n b(i), \quad (5)$$

где n – число используемых несущих.

Однако надо учесть, что в ADSL-системе скорость передачи информации должна быть кратна 32 кбит/с, поэтому правую часть формулы (5) требуется округлить в нижнюю сторону до ближайшего кратного 32 кбит/с:

$$R = 32 \cdot \text{floor} \left\{ \frac{4000 \cdot \sum_{i=6}^n b(i)}{32000} \right\}. \quad (6)$$

В рассмотренной методике моделирования из мешающих факторов принимается во внимание лишь собственный тепловой шум кабеля, представляющий собой аддитивный гауссовский шум со спектральной плотностью мощности минус 140 дБм/Гц [3]. Номинальная спектральная плотность мощности передаваемого в нисходящем направлении группового сигнала PSD_{down} равна минус 40 дБм/Гц [3]. Тогда отношение мощности сигнала к мощности шума

$$SNR(i) = 10^{0,1(-40 - A(i) + 140)} = 10^{0,1(100 - A(i))},$$

где $A(i)$ – затухание на частоте i -й несущей, которое определяется частотной характеристикой абонентского кабеля (коэффициентом затухания и длиной кабеля). Зная отношение сигнал/шум на входе демодулятора и задавшись требуемой вероятностью ошибки $p = 10^{-7}$, по формуле (6) можно определить максимальное количество передаваемых в течение посылки на i -й несущей бит информации $b(i)$ [14, 15], а затем и суммарную скорость передачи по конкретной АЛ.

Однако в случае изменения во времени передаточной функции канала связи или помеховой обстановки вероятность ошибки может превысить требуемую. Для предотвращения этого в ADSL предусмотрен запас по отношению сигнал/шум (SNR margin), равный 6 дБ. Иначе говоря, расчет $b(i)$ проводится при мощности помех на 6 дБ большей, чем в действительности, или, что то же самое при уменьшенной на 6 дБ мощности передаваемого сигнала. Поэтому для вычислений требуется установить

$$SNR(i) = 10^{0,1(-40 - A(i) + 140 - 6)} = 10^{0,1(94 - A(i))}.$$

Следует отметить, что рассмотренная методика относится к тому идеализированному случаю, когда на линию передачи не действуют внешние помехи, такие как взаимные переходы между парами, импульсные или сосредоточенные по спектру помехи.

Для практических целей полезными могут оказаться расчеты скорости передачи информации, проведенные при различных уровнях спектральной плотности мощности помехи на входе приемника ADSL [16, 17].

Результаты расчетов при различных уровнях спектральной плотности мощности помехи на входе приемника даны в виде графиков на рис. 2 – 5.

СП ADSL2, регламентированная в [5], характеризуется такой же, как и в ADSL, маской мощности передаваемого сигнала. Поэтому результаты, представленные на рис. 2-5, справедливы и для ADSL2.

2. Потенциальные характеристики ADSL2+. Основным отличием СП ADSL2+ от ADSL является увеличение максимальной частоты в 2 раза и, соответственно, почти двукратное увеличение полосы частот передаваемого в нисходящем направлении сигнала, что позволяет достигать значительно большей скорости передачи информации в нисходящем направлении.

Методика моделирования полностью совпадает с рассмотренной выше методикой для СП ADSL. Необходимая для расчетов маска мощности взята из [7].

Полученные графики зависимости скорости передачи информации в нисходящем направлении от длины АЛ при различных мощностях помех на входе приемника ADSL2+ изображены на рис. 6 – 9.

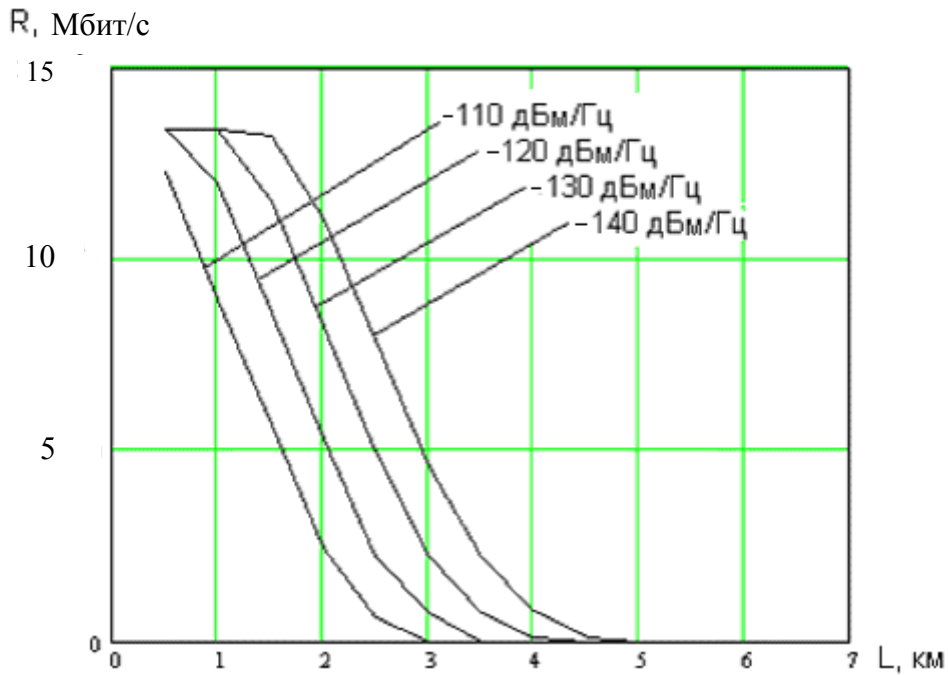


Рисунок 2 – Зависимость от длины АЛ скоростей передачи информации, достижимых на АЛ кабеля ТПП 0,32 мм при различной спектральной плотности мощности шумов на входе приемника ADSL

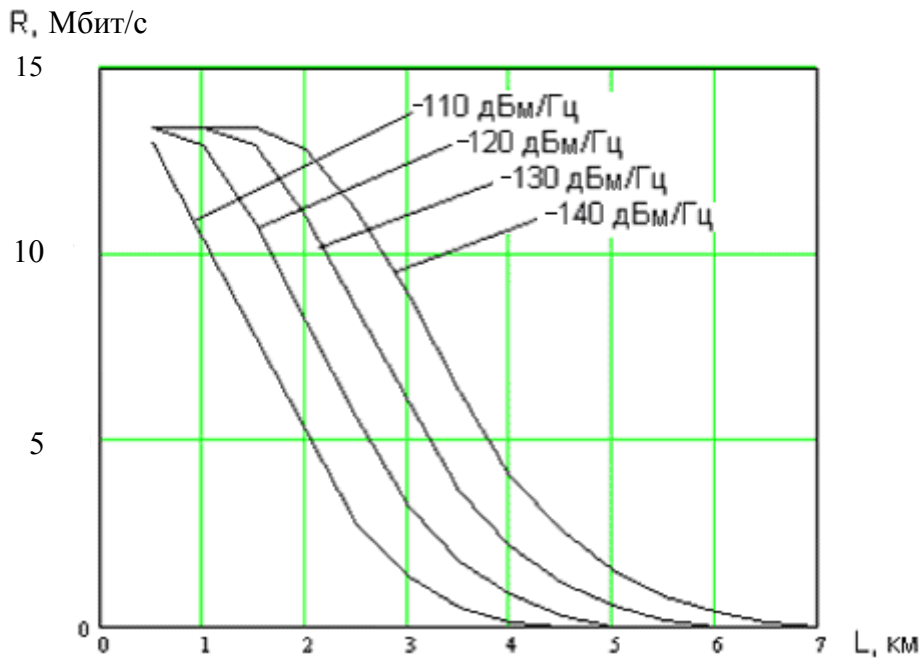


Рисунок 3 – Зависимость от длины АЛ скоростей передачи информации, достижимых на АЛ кабеля ТПП 0,4 мм при различной спектральной плотности мощности шумов на входе приемника ADSL

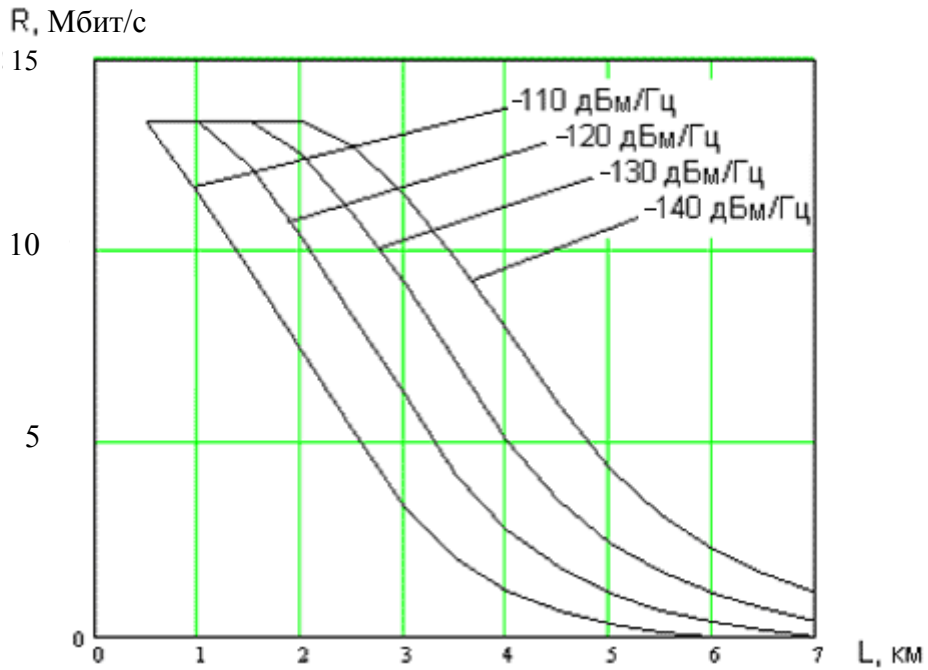


Рисунок 4 – Зависимость от длины АЛ скоростей передачи информации, достижимых на АЛ кабеля ТПП 0,5 мм при различной спектральной плотности мощности шумов на входе приемника ADSL

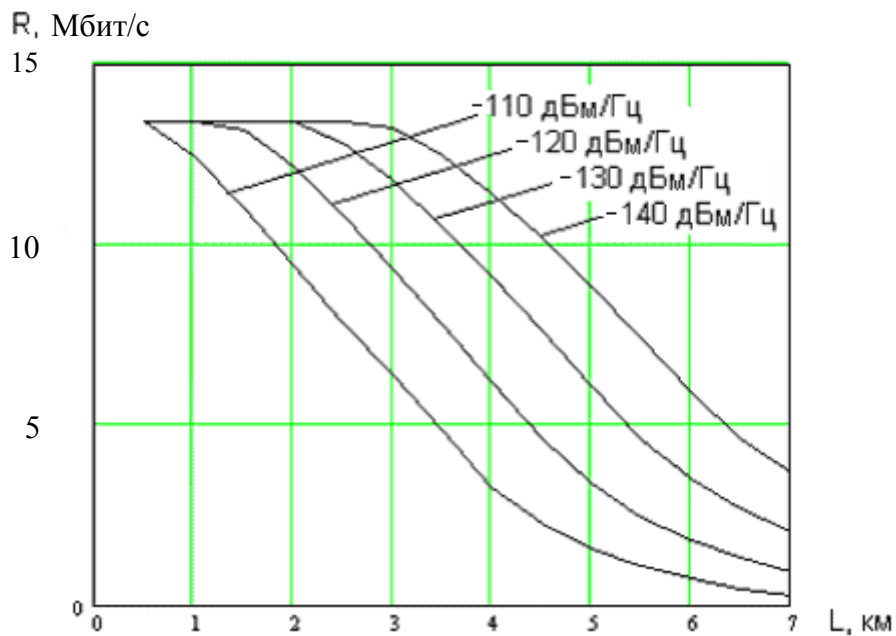


Рисунок 5 – Зависимость от длины АЛ скоростей передачи информации, достижимых на АЛ кабеля ТПП 0,64 мм при различной спектральной плотности мощности шумов на входе приемника ADSL

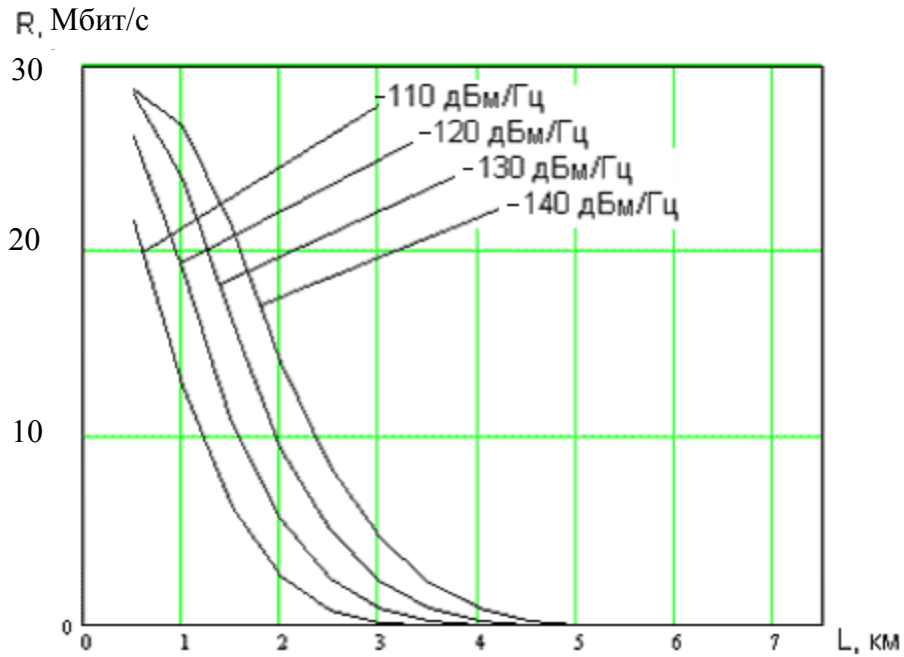


Рисунок 6 – Зависимость от длины АЛ скоростей передачи информации, достижимых на АЛ кабеля ТПП 0,32 мм при различной спектральной плотности мощности шумов на входе приемника ADSL2+

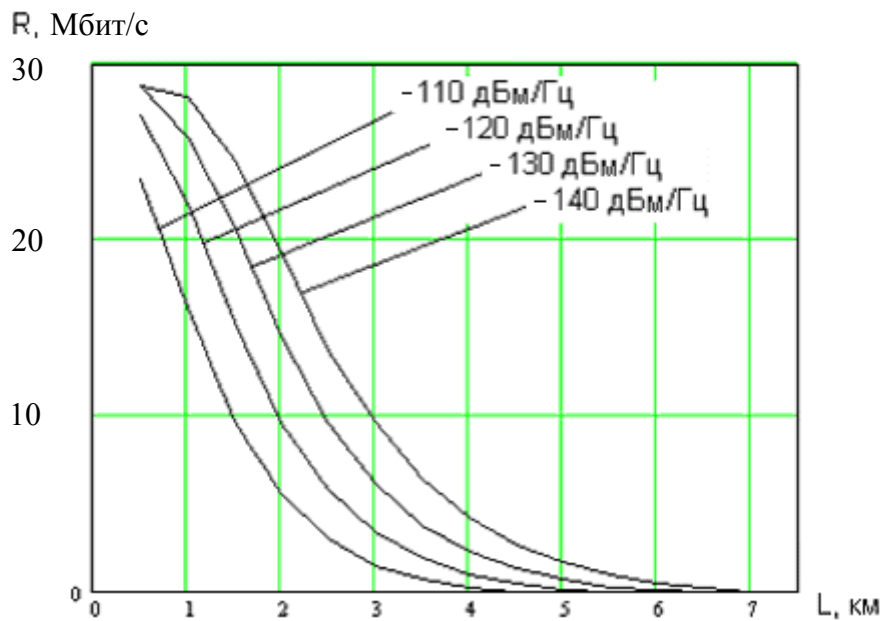


Рисунок 7 – Зависимость от длины АЛ скоростей передачи информации, достижимых на АЛ кабеля ТПП 0,4 мм при различной спектральной плотности мощности шумов на входе приемника ADSL2+

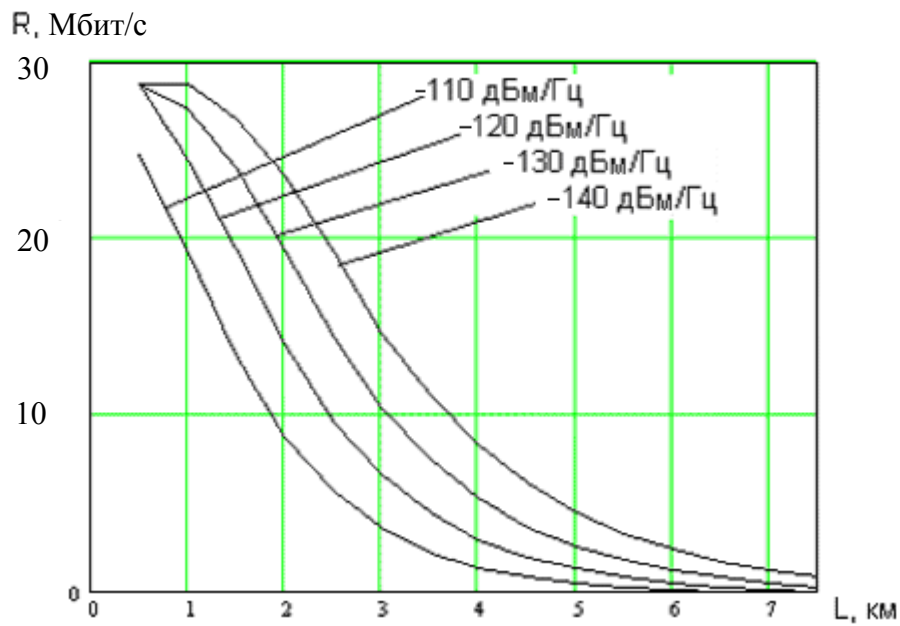


Рисунок 8 – Зависимость от длины АЛ скоростей передачи информации, достижимых на АЛ кабеля ТПП 0,5 мм при различной спектральной плотности мощности шумов на входе приемника ADSL2+

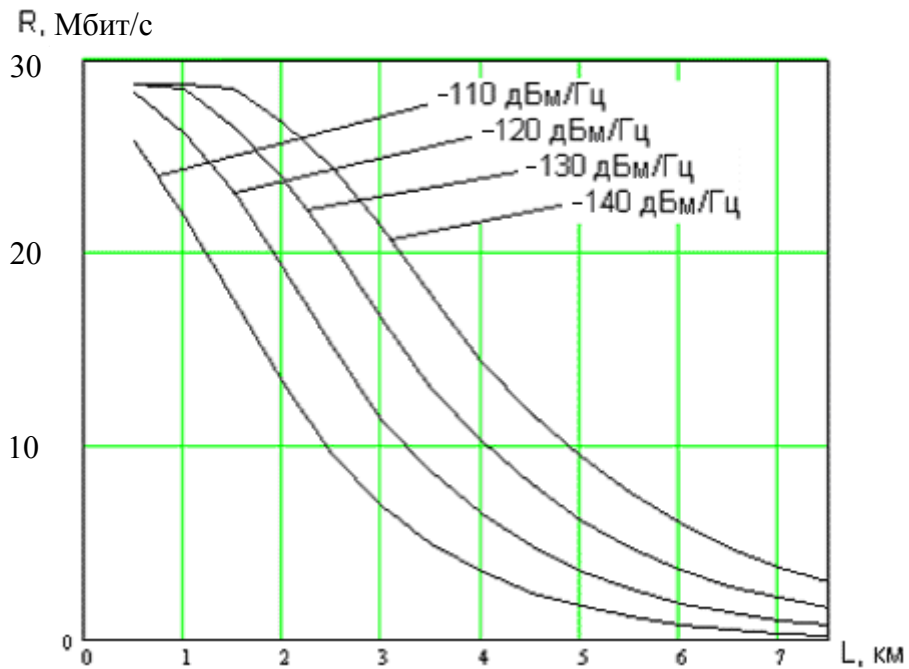


Рисунок 9 – Зависимость от длины АЛ скоростей передачи информации, достижимых на АЛ кабеля ТПП 0,64 мм при различной спектральной плотности мощности шумов на входе приемника ADSL2+

Отметим, что результаты расчетов демонстрируют значительные преимущества аппаратуры связи ADSL 2+ по скорости передачи по отношению к ADSL при длинах абонентских линий менее 2 км. Этот факт имеет вполне строгое физическое объяснение: при длинах абонентских линий более 2 км преимущества расширения полосы частот передаваемого сигнала полностью нивелируются высоким затуханием линий. Полученные графики позволяют оценивать возможности различных типов ADSL-оборудования и предельно достижимые характеристики цифровых абонентских линий, построенных на отечественных телефонных кабелях типа ТПП с применением этого оборудования.

Литература

1. Рекомендация ITU-T G.991.1 High bit rate Digital Subscriber Line (HDSL) transceivers (Приемопередатчики высокоскоростной цифровой абонентской линии (HDSL)).
2. Рекомендация ITU-T G.991.2 Single-pair High-speed Digital Subscriber Line (SHDSL) transceivers (Приемопередатчики однопарной высокоскоростной цифровой абонентской линии (HDSL)).
3. Рекомендация ITU-T G.992.1 Asymmetrical digital subscriber line (ADSL) transceivers (Приёмопередатчики асимметричной цифровой абонентской линии (ADSL)).
4. Рекомендация ITU-T G.992.2 Splitterless asymmetric digital subscriber line (ADSL) transceivers (Приёмопередатчики асимметричной цифровой абонентской линии без сплиттера).
5. Рекомендация ITU-T G.992.3 Asymmetric digital subscriber line transceivers 2 (ADSL2) (Приемопередатчики асимметричной цифровой абонентской линии 2).
6. Рекомендация ITU-T G.992.4 Splitterless Asymmetric Digital Subscriber Line transceivers 2 (Приемопередатчики асимметричной цифровой абонентской линии без сплиттера 2).
7. Рекомендация ITU-T G.992.5 Asymmetrical Digital Subscriber Line (ADSL) transceivers - Extended bandwidth ADSL2 (ADSL2+) (Приемопередатчики асимметричной цифровой абонентской линии – Расширенная полоса частот ADSL2).
8. Рекомендация ITU-T G.993.1 Very high speed Digital Subscriber Line transceivers (Приемопередатчики сверхвысокоскоростной цифровой абонентской линии).
9. Рекомендация ITU-T G.994.1 Handshake procedures for Digital Subscriber Line (DSL) transceivers (Процедуры «рукопожатия» для приемопередатчиков цифровых абонентских линий).
10. Рекомендация ITU-T G.995.1 Overview of Digital Subscriber Line (DSL) Recommendations (Обзор рекомендаций по цифровым абонентским линиям).
11. Рекомендация ITU-T G.996.1 Test procedures for Digital Subscriber Line (DSL) transceivers (Процедуры тестирования для приемопередатчиков цифровых абонентских линий (DSL)).
12. Рекомендация ITU-T G.997.1 Physical layer management for Digital Subscriber Line (DSL) transceivers (Управление на физическом уровне для приемопередатчиков цифровых абонентских линий).
13. *Зайченко Н., Сайко В.* Современные DSL-технологии в Украине // Сети и телекоммуникации. – 2002. – №1. – С. 33–37.
14. *John A.C. Bingman.* Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come // IEEE Communication Magazine. May, 1990. – 7–14 p.
15. *Балашов В.А., Ляховецкий Л.М.* Алгоритмы оптимизации спектра группового сигнала в многоканальных модемах // Научные труды УГАС им. А.С. Попова. – 1999. – №1. – С. 37–43.
16. *Балашов В.А., Ляховецкий Л.М.* Моделирование характеристик цифровых абонентских линий // Зв'язок. – 2003. – №2. – С. 19–23.
17. *Ляховецкий Л.М.* ADSL: проверка готовности // Телекоммуникации и сети. – 2002. – №9. – С. 38–42.