

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ РАБОТЫ ЦИФРОВЫХ АБОНЕНТСКИХ ЛИНИЙ

### MODELLING OF PARALLEL OPERATION OF DIGITAL SUBSCRIBER LINES

**Аннотация.** В статье приведены модель параллельной работы цифровых абонентских линий (ЦАЛ) в многопарном кабеле ГТС и результаты моделирования для разных типов кабелей и величин шумов.

**Summary.** The model of parallel operation of digital subscriber lines (DSL) in the multipair cable of urban telephone network and results of modelling for the different types of cables and values of noises are given in the article.

Для построения широкополосной (высокоскоростной) цифровой сети доступа на основе существующей традиционной телефонной сети используются так называемые xDSL-технологии (Digital Subscriber Line – DSL), характеристики которых регламентированы Рекомендациями МСЭ G.99х и которые были разработаны специально для передачи информации по существующим медным кабелям местной телефонной сети связи [1 ... 12].

С целью решения проблемы объективной оценки характеристик цифровых абонентских линий (ЦАЛ) ряд ведущих операторов связи при поддержке производителей оборудования объединились в организацию под названием FSAN (Fully Services Access Networks – сеть доступа с полным набором услуг). Ее рекомендации в последнее время стали практически «законодательными» для разработчиков систем передачи DSL (СП DSL). Подход FSAN к определению основных характеристик ЦАЛ ориентирован на то, чтобы аппаратура тестировалась в реальных условиях. Для целей тестирования разработан ряд типовых моделей абонентских линий (АЛ) и сценариев испытаний, различающихся загрузкой кабеля (набором ЦАЛ, работающих параллельно в многопарном кабеле) и характеристиками действующих шумов.

Этот подход требует наличия соответствующих аппаратных средств и материальных затрат и находит применение благодаря убедительности результатов. Наряду с этим следует применять методы исследования, включающие имитационное и математическое моделирование характеристик ЦАЛ, которые базируются на программных моделях отечественных абонентских линий, учитывающих основные сценарии загрузки кабеля и характеристики шумов, и соответствующих методиках оценок результатов исследований. Такой подход, очевидно, не может полностью заменить натурное моделирование, но обладает тем преимуществом перед последним, что позволяет легко осуществить «чистый» эксперимент при учете лишь требуемых и контролируемых факторов, влияющих на характеристики объекта моделирования. При этом достоверность полученных результатов будет определяться степенью адекватности модели реальному объекту моделирования. В ряде случаев методы моделирования являются единственно практически приемлемыми для исследования, например, в случае оценки электромагнитной совместимости (ЭМС) ЦАЛ в различных сценариях загрузки многопарных кабелей.

За рубежом исследованию характеристик ЦАЛ методами моделирования уделяется большое внимание. 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 ADSL2+, выполненное с учетом электромагнитной совместимости между СП ADSL2+, одновременно работающими в парах многопарных кабелей ГТС.

**1. Описание программной модели.** На рис. 1 приведена разработанная обобщенная программная модель ЦАЛ в многопарном телефонном кабеле местной телефонной сети. Обобщенная модель содержит: модель СП, модель АЛ, модель шумов, модель ЭМС и блок задания параметров и расчета характеристик ЦАЛ.

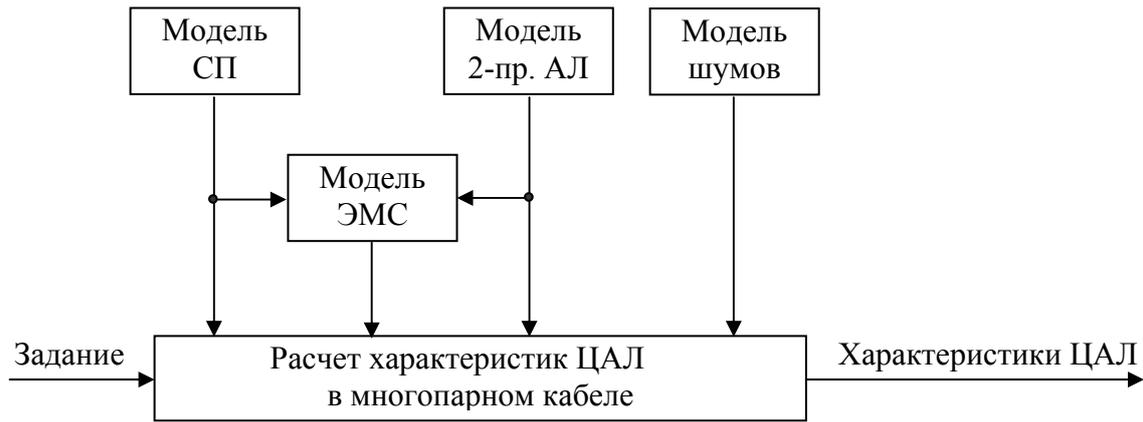


Рисунок 1 – Обобщенная модель ЦАЛ в многопарном кабеле

Блок “Модель СП” содержит характеристики используемых на абонентской сети систем передачи, включая архаичные АБУ, системы охранной сигнализации и т.д. Модель этих СП в самом общем плане представляет собой маску – функцию спектральной плотности мощности передаваемого сигнала  $PSD_i(f)$ . При необходимости могут использоваться и более сложные, например, имитационные модели СП. Для расчета достижимых скоростей передачи в СП с DMT-модуляцией модель должна учитывать, например, распределение бит по несущим.

Блок “Модель 2-проводной АЛ” позволяет по определенной методике синтезировать передаточную функцию  $H(f)$  или амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) простой однородной, состоящей из пар кабеля одного типа АЛ, либо составной АЛ, состоящей из последовательно включенных пар телефонных кабелей, отличающихся как диаметром жил, так и конструкцией, включая и кабель абонентской проводки ТРП.

На рис. 2 для примера приведена синтезированная частотная характеристика рабочего затухания АЛ кабеля ТПП с диаметром жил 0,5 мм длиной 1 км.

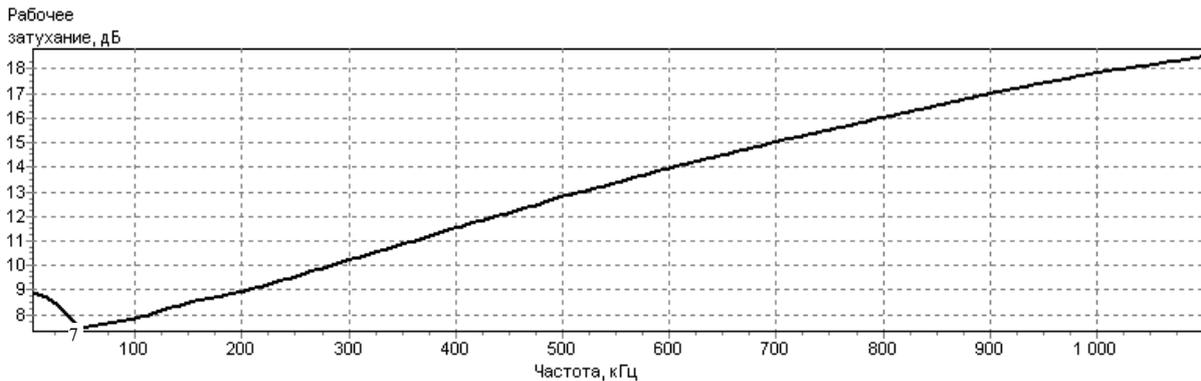


Рисунок 2 – Частотная характеристика рабочего затухания АЛ кабеля ТПП с диаметром жил 0,5 мм длиной 1 км

Блок “Модель ЭМС” предназначен для расчета переходных помех на ближнем и дальнем концах от СП, работающих по параллельным парам при различных сценариях загрузки и типах кабеля (рис. 3). Для расчета помех задаются частотные характеристики переходного затухания  $A_0(f)$  на ближнем конце и защищенности  $A_3(f)$  на дальнем конце между разными парами многопарного кабеля.

На рис. 3 схематически изображены две влияющие пары и одна подверженная влиянию. Мощность передаваемого сигнала в  $i$ -й DSL обозначена  $P_{i \text{ пер}}$ . На вход приемника  $DSL_k$  поступает ослабленный в линии связи полезный сигнал  $P_{k \text{ пр}}$  и переходные помехи на ближнем и дальнем концах  $P_{\text{бл},i,k}$ ,  $P_{\text{бл},j,k}$ ,  $P_{\text{д},i,k}$  и  $P_{\text{д},j,k}$ , порожденные передаваемыми сигналами  $DSL_i$  и  $DSL_j$ .

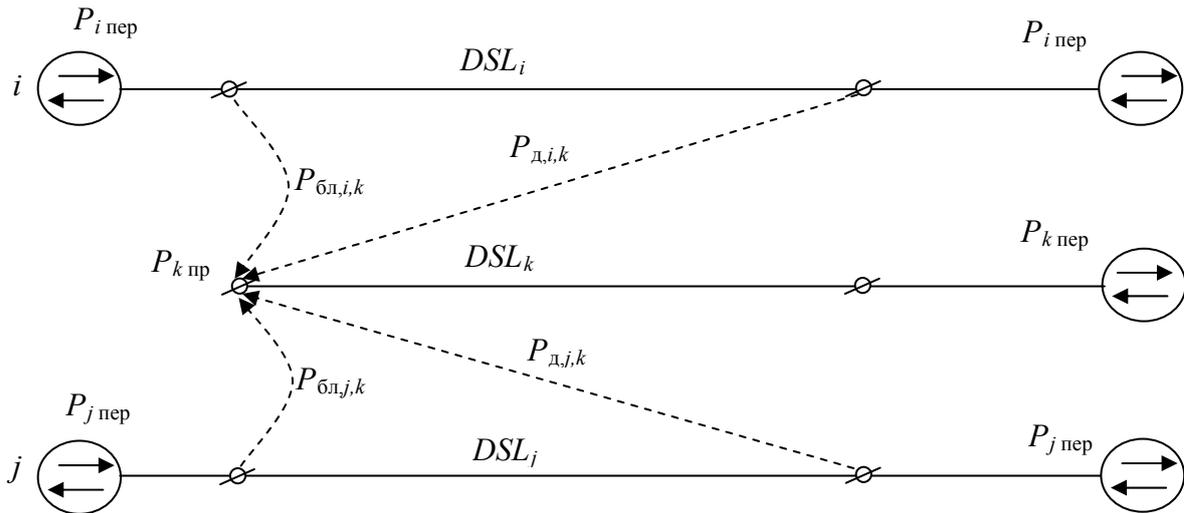


Рисунок 3 – Модель переходных помех между DSL в многопарном кабеле

Отношение сигнал/шум в  $k$ -й DSL определяется выражением

$$SNR_k = 10 \lg \frac{P_{k \text{ пр}}}{\sum_{i,i \neq k} P_{\text{бл},i,k} + \sum_{i,i \neq k} P_{\text{д},i,k} + \sum_m n_m},$$

где  $P_{k \text{ пр}} = \int PSD_k(f) \cdot H^2(f) df$ ,  $\sum_m n_m$  – сумма всех остальных помех  $n_m$ , действующих на входе приемника  $DSL_k$ .

Величины  $P_{\text{бл},i,k}$  и  $P_{\text{д},i,k}$  определяются аналогично  $P_{k \text{ пр}}$  по формулам, в которых  $H^2(f)$  заменены на частотные функции переходных характеристик между  $i$ -й и  $k$ -й парами на ближнем и дальнем концах  $H_{\text{бл},i,k}(f)$  и  $H_{\text{д},i,k}(f)$  соответственно:

$$P_{\text{бл},i,k} = \int PSD_i(f) \cdot H_{\text{бл},i,k}^2(f) df.$$

Блок «Модель шумов» содержит модель аддитивного белого шума, модели некоторых специфических шумов, порождаемых импульсным набором номера, работой коммутационных приборов механических АТС и др., а также модели типовых шумов, например, модели ETSI A и ETSI B, определенные в Рекомендации ITU-T G.996.1 [11] (см. рис. 4).

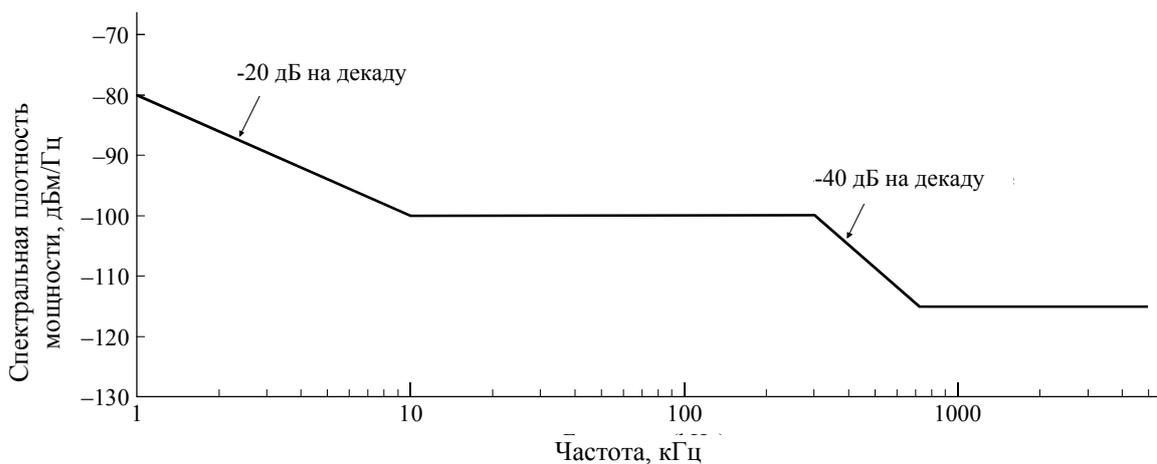


Рисунок 4 – Спектр шума ETSI B

Функций блока «Расчет характеристик DSL» может быть несколько. Во-первых, по заданным условиям – типу кабеля, длине АЛ, сценарию загрузки – рассчитать достижимое соотношение сигнал/шум  $SNR$  или достижимую скорость передачи информации для исследуемой СП. Во-вторых, может решаться такая задача: при заданных характеристиках АЛ определить оптимальный сценарий

загрузки, т.е. выбрать типы СП, их количество и схемы включения (выбор пар), обеспечивающие для всех систем требуемое соотношение сигнал/шум  $SNR_{req}$  или требуемую скорость передачи информации. Очевидно, возможны разные варианты этих задач, например, для заданного сценария загрузки выбрать характеристики АЛ, обеспечивающие требуемое  $SNR_{req}$ .

Моделирование системы ADSL включает в себя следующие основные шаги [14]:

1) Определение отношения сигнал/шум на частоте каждой несущей ADSL на основе маски мощности передаваемого сигнала, частотной характеристики затухания канала связи и мощности аддитивной помехи в каждом канале СП ОГС.

2) Определение максимального количества передаваемых в течение посылки на  $i$ -й несущей бит [15].

3) Расчет суммарной скорости передачи.

В качестве примера, иллюстрирующего возможности предлагаемых методики моделирования и модели DSL, приведём оценки, полученные с их помощью, достижимой скорости передачи информации СП ADSL и ADSL2+ по АЛ 30-парного кабеля ТПП с диаметром жил 0,5 мм в зависимости от длины кабеля и сценариев загрузки этого кабеля. Все расчеты проведены для метода разделения сигналов встречных направлений передачи по частоте, следовательно, учитываются только переходные помехи на дальнем конце.

Результаты расчетов достижимых в системах ADSL2+ и ADSL скоростей передачи в зависимости от длины АЛ кабеля ТПП 30x2 повивной скрутки с диаметром жил 0,5 мм при сценариях загрузки  $M_1$ ,  $M_{15}$  и  $M_{30}$  приведены на рис. 5 и 6 соответственно (под сценарием загрузки  $M_N$ ,  $N = 1, 2, \dots, 30$  будем понимать схему включения систем передачи xDSL, при которой загружено одновременно  $N$  пар). Эти результаты демонстрируют существенное ограничение скорости передачи  $R$  переходными помехами на дальнем конце, имеющими место в рассматриваемом случае использования СП ADSL2+ и ADSL с частотным методом разделения сигналов противоположных направлений передачи.

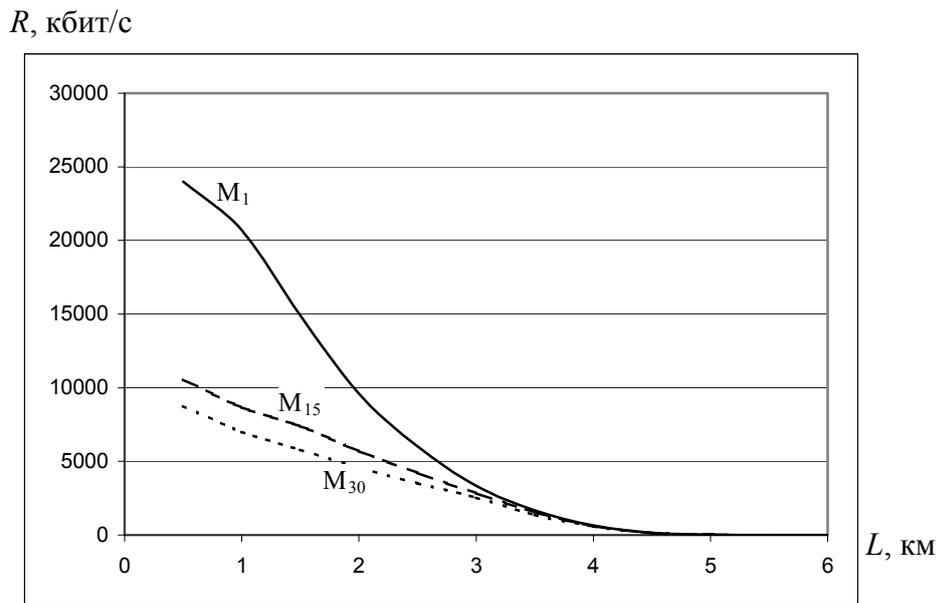


Рисунок 5 – Скорость передачи в зависимости от длины АЛ кабеля ТПП 30x2 повивной скрутки с диаметром жил 0,5 мм при сценариях загрузки  $M_1$ ,  $M_{15}$  и  $M_{30}$  (СП ADSL2+, шум ETSI B)

По приведенной модели электромагнитной совместимости осуществлены также расчеты длин ЦАЛ и скоростей передачи в восходящем и нисходящем направлениях по ЦАЛ при различных вариантах xDSL-оборудования, загрузки, числе пар, диаметре жил, применении однородного и неоднородного (составного) кабеля для белого шума различной спектральной плотности мощности (СПМ).

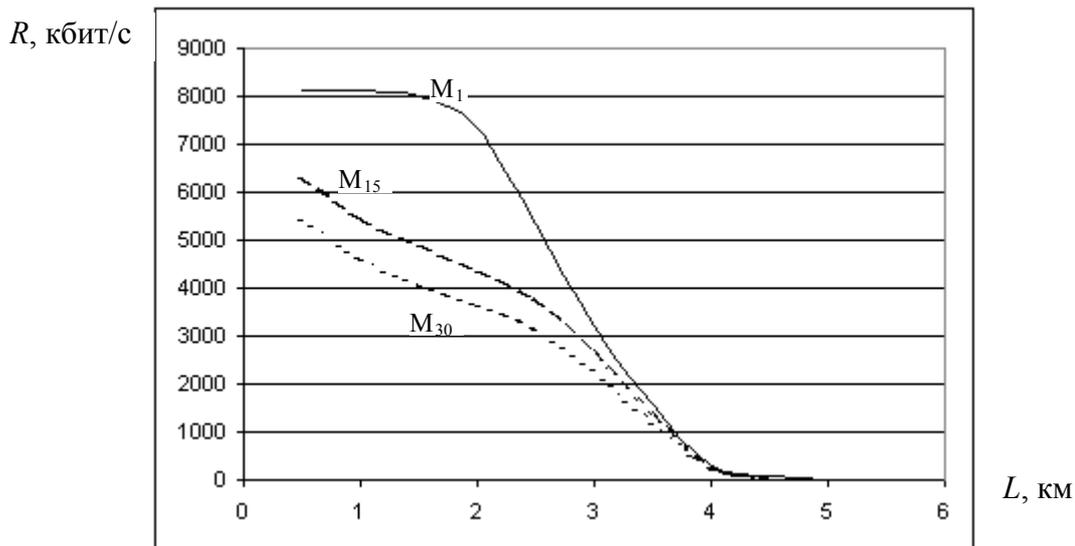


Рисунок 6 – Скорость передачи в зависимости от длины АЛ кабеля ТПП 30х2 повивной скрутки с диаметром жил 0,5 мм при сценариях загрузки M<sub>1</sub>, M<sub>15</sub> и M<sub>30</sub> (СП ADSL, шум ETSI B)

На рис. 7 ... 10 приведены результаты расчетов предельной длины линии ADSL2+ при использовании 10-, 50- и 100-парных кабелей типа ТП пучковой скрутки сердечника с диаметрами жил 0,32 мм; 0,4 мм; 0,5 мм и 0,64 мм для спектральной плотности мощности (СПМ) белого шума минус 120 дБм/Гц на входе приемника в зависимости от процента пар кабеля, использованных для передачи сигналов ADSL2+. Анализ приведенных на рис. 7 ... 10 результатов позволяет сделать полезный для практики вывод: при малых длинах кабеля и загрузке кабеля системами передачи ADSL2+ свыше 40% достижимая длина линий ADSL2+ не зависит от диаметра жил кабеля. Это объясняется тем, что основным мешающим фактором для СП ADSL2+ в случае малых длин кабеля являются переходные помехи на дальнем конце, а переходные помехи на дальнем конце не зависят от диаметра жил кабеля.

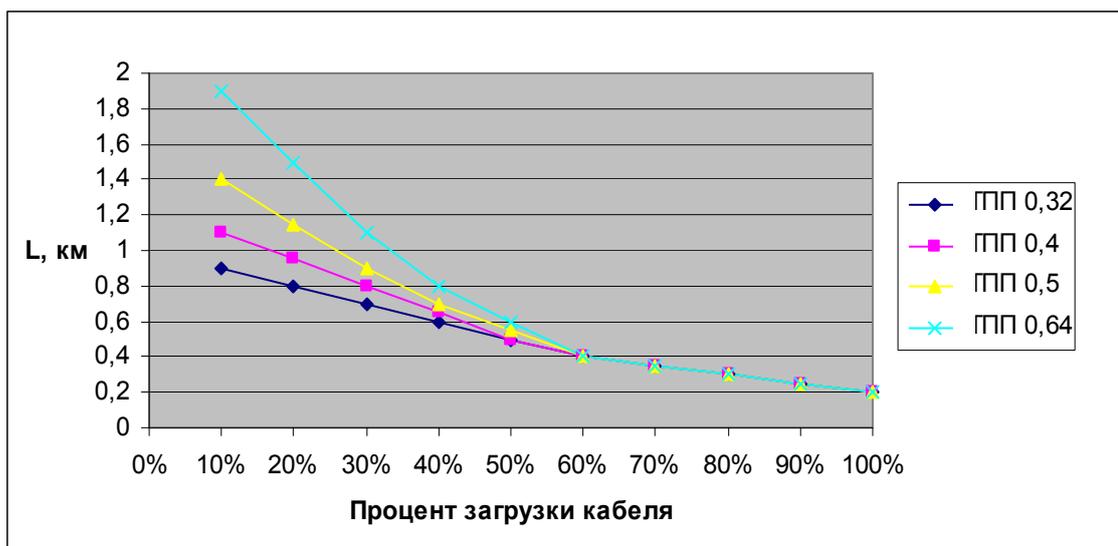


Рисунок 7 – Достижимая длина линии ADSL2+ для скорости 19648 кбит/с в нисходящем направлении и 928 кбит/с в восходящем направлении при использовании 10-парного кабеля типа ТП и СПМ белого шума – 120 дБм/Гц в зависимости от процента загрузки пар кабеля линиями ADSL2+

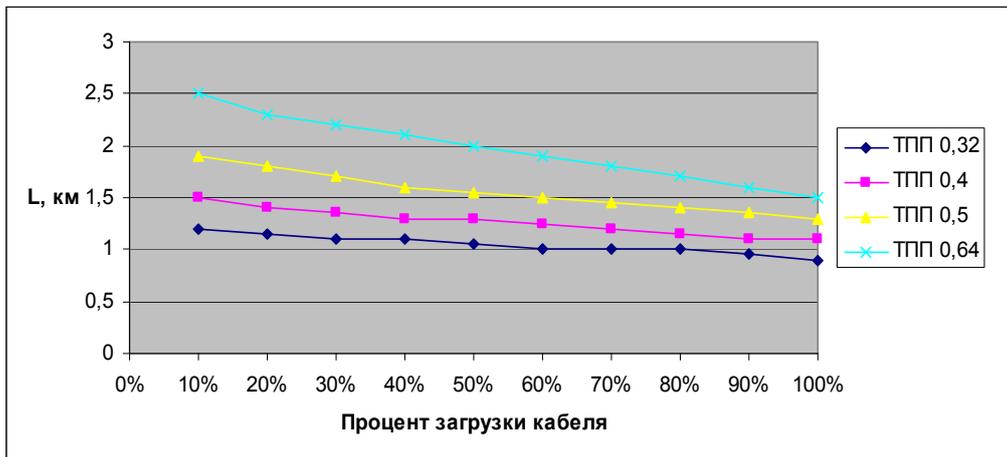


Рисунок 8 – Достижимая длина линии ADSL2+ для скорости 14720 кбит/с в нисходящем направлении и 928 кбит/с в восходящем направлении при использовании 10-парного кабеля типа ТП и СПМ белого шума – 120 дБм/Гц в зависимости от процента загрузки пар кабеля линиями ADSL2+

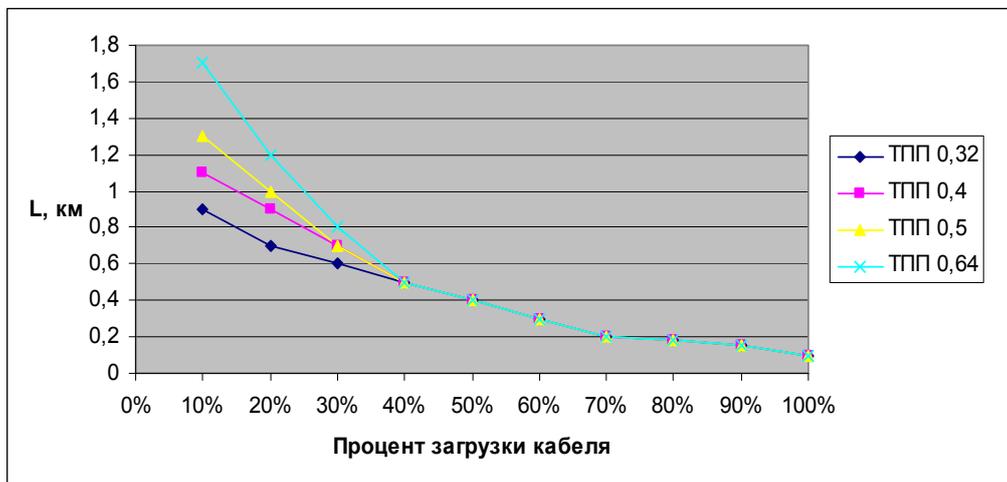


Рисунок 9 – Достижимая длина линии ADSL2+ для скорости 19648 кбит/с в нисходящем направлении и 928 кбит/с в восходящем направлении при использовании 50-парного кабеля типа ТП и СПМ белого шума – 120 дБм/Гц в зависимости от процента загрузки пар кабеля линиями ADSL2+

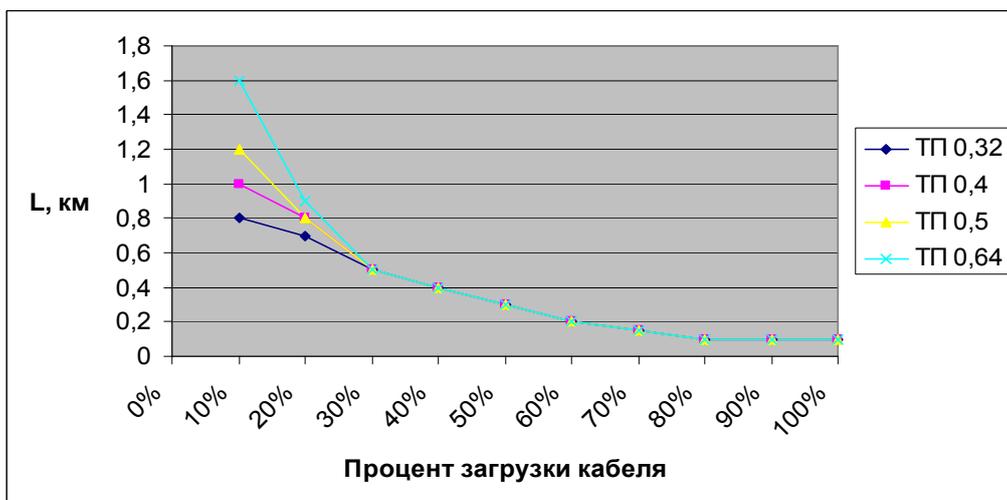


Рисунок 10 – Достижимая длина линии ADSL2+ для скорости 19648 кбит/с в нисходящем направлении и 928 кбит/с в восходящем направлении при использовании 100-парного кабеля типа ТП и СПМ белого шума – 120 дБм/Гц в зависимости от процента загрузки пар кабеля линиями ADSL2+

В заключение можно сделать выводы.

1. Разработанные методики и программы моделирования параллельной работы ЦАЛ сети широкополосного цифрового абонентского доступа на базе технологий xDSL с учётом характеристик отечественных абонентских линий позволяют эффективно решать задачи проектирования, строительства и эксплуатации сети доступа.

2. Сравнение результатов моделирования характеристик ЦАЛ по приведенным программам с измеренными характеристиками реальных ЦАЛ, построенных на отечественных телефонных кабелях, показало приемлемую для большинства приложений инженерную точность результатов расчета.

### **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. Гроднев И.И. Линии связи / И.И. Гроднев, С.М. Верник – М.: Радио и связь, 1988. – С. 312.
14. Балашов В.А. Характеристики абонентского доступа ADSL при использовании отечественных кабелей ГТС / Балашов В.А., Ляховецкий Л.М. // Зв'язок. – 2001. – №6. – С. 20-25.
15. John A. C. *Bingman*. Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come // IEEE Communication Magazine. – May 1990. – 7 p.
16. Парфенов Ю.А. Новые возможности кабелей сельской связи / Ю.А., Парфенов, Л.Г. Рысин // Электросвязь. – 2000. – №9. – С. 41-43.