

*А.И. ЦОПА., Г.И. СИДОРОВ, канд. техн.наук, В.С. ЧЕЧЕЛЬНИЦКИЙ,
В.А. ТИХОНОВ, канд. техн.наук*

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ И ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЦИФРОВЫХ СИСТЕМ ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ

Применение xDSL-технологии уплотнения абонентских линий для цифровой речевой связи и передачи данных становится актуальной задачей развития телекоммуникаций в Украине. Однако применение новых технологий на существующих линиях связи может вызывать определенные трудности, связанные с ограниченной шириной полосы каналов, величиной затухания, влиянием помех и искажений, групповым временем задержки. В связи с этим возникает задача исследования пропускной способности существующих телефонных каналов связи и определения требований к проектируемым. В статье проведен анализ первичных параметров эксплуатируемых кабельных линий связи, исследована потенциальная ширина полосы пропускания и проведена оценка пропускной способности каналов.

Сеть телефонной связи Украины, как и других стран мира, развивалась как низкочастотная сеть, обеспечивающая передачу аналогового телефонного сигнала. Существующая сеть, особенно в сельской местности, базируется на основе координатных АТС, аналоговых малокабельных систем передачи, 15- и 30-канальных цифровых систем (ИКМ). При этом основой линейных сооружений являются линии из одночетверочных кабелей, которые используются для соединительных линий между АТС. Значительный объем занимают также воздушные линии связи. Средняя длина соединительных линий достаточно велика и лежит в пределах от 10 до 20 км. Более 80% линий межстанционных соединений выполнены с использованием кабеля типа КСПП – 1х4х0,9(1,2) (ГОСТ 22498-77). Недостатком конструкции этого кабеля является наличие свободного объема в сердечнике кабеля. Это может быть причиной продольного распространения влаги вдоль кабеля при повреждении оболочек и корпусов соединительных муфт кабельных линий.

Замена кабелей на новые, более совершенные медные или оптоволоконные, требует больших как материальных, так и временных затрат. Если в черте города можно заменить кабели на современные с относительно небольшими затратами, то замена линий связи в сельской местности требует значительных инвестиций. Поэтому наиболее эффективным решением проблемы в ближайшее десятилетие будет повышение скорости передачи цифровой информации до 2 Мбит/с и выше по существующим линиям телефонной связи с применением новых технологий. В связи с этим наиболее перспективной является технология цифрового уплотнения абонентских линий xDSL. Разработка и проектирование отечественного оборудования, использующего эту технологию, требует исследования характеристик и моделирования каналов передачи с учетом особенностей участников связи, параметров кабельных линий, воздействий внешних факторов [1].

В xDSL-технологии применяются многоуровневая модуляция, эхоподавление, подавление межсимвольной интерференции, подстройка фазы и частоты по синхрослову, борьба с дрожанием фронтов, защита от искажений и помех, вызванных токами в соседних парах и наводками на кабель. Широкие возможности этой технологии требуют создания эффективных алгоритмов обработки цифровых сигналов и выбора их оптимальных параметров. Синтез и анализ алгоритмов, их проверка и оценка потенциальных возможностей требуют статистического моделирования каналов связи и методов обработки сигналов.

Для проектирования и расчета систем передачи цифровой информации необходимо знать электрические характеристики цепей кабельных линий связи. Электрические характеристики могут быть определены двумя способами: расчетным и на основе результатов электрических измерений. Точный расчет параметров линии связи затруднителен по следующим причинам:

- а) трудно точно определить диаметры жил и расстояние между центрами, объемное соотношение диэлектрика, воздуха и влаги в изоляции по всей длине линии связи;
- б) существует технологический разброс ϵ (относительная диэлектрическая проницаемость), $\operatorname{tg} \delta$ (угол диэлектрических потерь) изолирующих материалов;
- в) применяются неточные, эмпирические формулы для расчета погонного сопротивления и индуктивности, отсутствуют точные формулы для расчета рабочей емкости.

Указанные причины приводят к тому, что рассчитанные значения могут рассматриваться как ориентировочные и могут отличаться на 10..15% от реальных. Для задач моделирования в условиях нестационарности параметров линии связи такая точность вполне удовлетворительна. Реальные характеристики телефонных кабелей имеются только для тональной частоты (0,3 ... 3,4 кГц) [2]. Для высокоскоростной передачи цифровой информации таких данных явно недостаточно.

В данной статье расчеты амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) основывались на погонных параметрах длинной линии. При расчетах учитывались следующие первичные электрические параметры цепи: погонное сопротивление токопроводящей жилы $R(\text{Ом/км})$, погонная индуктивность цепи $L(\text{Гн/км})$, погонная емкость цепи $C(\text{Ф/км})$ и погонная проводимость изолятора $G(\text{См/км})$. Первичные параметры передачи цепи использовались для расчета вторичного параметра - коэффициента затухания $\alpha(\text{дБ})$. Оценки характеристик цепи проводились с учетом влажности как основного фактора, влияющего на параметры кабельных линий. При расчете двухпроводной линии за базовую модель принята модель, приведенная в [3]. Частотные характеристики рассчитывались для эквивалентной схемы линии связи, представленной на рис. 1 для некоторой длины l . Схема включает последовательное соединение сопротивления нагрузки R_n , сопротивления токопроводящей жилы $R(f) \cdot l (\text{Ом})$, погонной индуктивности цепи $L(f) \cdot l (\text{Гн})$. Цепь шунтируется погонной емкостью цепи $C \cdot l (\text{Ф})$, погонной проводимостью изолятора $G(f) \cdot l (\text{См})$ и сопротивлением нагрузки R_n .

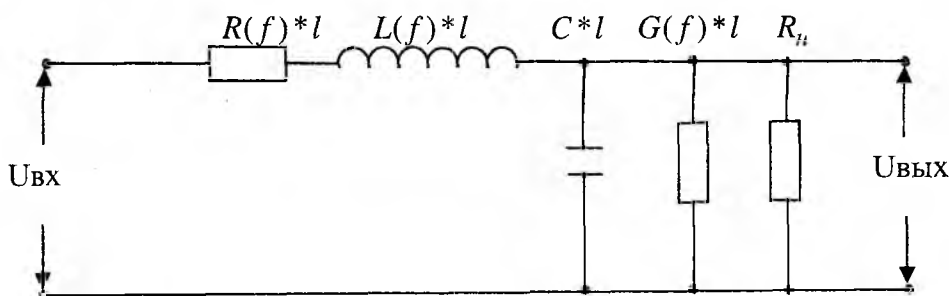


Рис. 1

Сопротивление нагрузки, согласованной с линией, равно $R_n = 135 \text{ Ом}$. Погонное сопротивление по постоянному току для монометаллических жил (медь, алюминий), (Ом/км) составляет [2]:

$$R_0 = \frac{8\rho k_y}{\pi d_0^2} \cdot 10^3, \quad (1)$$

где ρ - удельное сопротивление материала жил при 20°C , (Ом мм²/м); k_y - коэффициент укладки; d_0 - диаметр токопроводящей жилы, (мм).

Активное погонное сопротивление цепи на частотах выше 5 кГц, без учета влияния окисления металлических элементов кабеля, вычисляется по формуле [2]:

$$R(x) = R_0 \left[1 + F(x) + \frac{pG(x)(\frac{d_0}{a})^2}{1 - H(x)(\frac{d_0}{a})^2} \right], \quad (2)$$

где a - расстояние между центрами жил; p - коэффициент, учитывающий вид скрутки ($p=1$ для парной, $p=5$ для четверочной); $F(x), H(x), G(x)$ - табличные функции [2], величина $x = 0,0082d_0\sqrt{f}$ для медных жил; f - частота, Гц.

Погонная проводимость изолятора в цепи равна [2]:

$$G(f) = G_0 + j2\pi f C t g \delta, \quad (3)$$

где G_0 - погонная проводимость изолятора по постоянному току; C - погонная емкость между электродами; δ - угол диэлектрических потерь. Погонная проводимость изолятора по постоянному току рассчитывается с помощью выражения [2]:

$$G_0 = (\rho_v 10^{-11} / 2\pi) \ln(a / d_0), \quad (4)$$

где ρ_v - удельное сопротивление изолятора, (Ом*м).

Погонная рабочая емкость цепи (Ф/км) равна [2]:

$$C = \frac{k_y \epsilon_3 * 10^{-6}}{36 * \ln(\frac{2a}{d_0} \psi)}, \quad (5)$$

где: ϵ_3 - эквивалентная диэлектрическая проницаемость изоляции; ψ - поправочный коэффициент, характеризующий близость цепи к заземленным другим жилам и оболочке, на практике $\psi \approx 0,75$ [2].

Как видно из формулы (5), емкость не зависит от частоты. Увлажнение сердечника кабеля приводит к росту погонной емкости и, как следствие, к увеличению погонной проводимости. Большая диэлектрическая проницаемость воды $\epsilon_w = 80$ по сравнению с диэлектрической проницаемостью диэлектрика (для полиэтилена она составляет $\epsilon_n = 2,3$) заметно увеличивает диэлектрическую проницаемость изолятора. Эквивалентная диэлектрическая проницаемость комбинированного диэлектрика при хаотическом, неупорядоченном в пространстве расположении статической смеси может быть вычислена по следующей формуле [4]:

$$\epsilon_3 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n V_i \sqrt[3]{\epsilon_i}}{\sum_{i=1}^n V_i} \right)^3, \quad (6)$$

где V_i - объемное содержание в смеси i -того компонента; ϵ_i - диэлектрическая проницаемость i -того компонента.

Наличие сквозного тока в диэлектрике приводит к диэлектрическим потерям на электропроводность. Для оценки тангенса угла диэлектрических потерь, обусловленных сквозным током, можно использовать соотношение [4]:

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{1,8 \cdot 10^{10}}{f \epsilon_{\Sigma} \rho_v} . \quad (7)$$

Однако для практических целей оценка (7) дает значительные погрешности и поэтому целесообразно использовать результаты экспериментальных исследований [4], показывающих рост тангенса угла диэлектрических потерь с увеличением заполнения сердечника кабеля водой, особенно на высоких частотах.

Погонная индуктивность цепи (без учета влияния окружающих металлических элементов кабеля) представляет собой сумму внешней межпроводниковой индуктивности $L_{\text{внеш}}$ и внутренней $L_{\text{внутр}}$. Внешняя индуктивность зависит от диаметра токопроводящих жил и расстояния между их центрами. Внутренняя индуктивность определяется магнитным полем, возникающим внутри токопроводящих жил. Индуктивность цепи (Гн/км) определяется выражением [2]:

$$L(f) = L_{\text{внеш}} + L_{\text{внутр}}(f) = k_y \left(2 \ln \frac{2a - d_0}{d_0} + \mu_r Q(x) \right) \cdot 10^{-4}, \quad (8)$$

где $Q(x)$ – функция, зависящая от коэффициентов вихревых токов, диаметра жил и частоты; μ_r – относительная магнитная проницаемость материала жил, равная 1 для медных и алюминиевых жил; k_y – коэффициент укрутки (≈ 1).

Значения $Q(x)$ приводятся в таблицах [2].

Проведем расчет погонных параметров и АЧХ для кабеля КСПП – 1х4х1,2, имеющего следующие основные характеристики [5]: 1. Тип жилы – медь. 2. Сечение жилы – 1,2 мм. 3. Расстояние между жилами – 1,6 мм; 4. Тип изоляции – полиэтилен. 5. Длина линии – 5,25 км. 6. Количество пар в кабеле – 2. 7. Заполнение сердечника кабеля влагой в % – 0, 4, 8. 8. Удельное сопротивление диэлектрика (полиэтилен) – 10^7 Ом/см. 9. Тип скрутки – звездная четверка.

На рисунке 2 представлены частотные зависимости для первичных параметров кабеля (1 – погонное сопротивление; 2 – погонная проводимость; 3 – погонная индуктивность).

Величина погонной емкости от различного количества влаги в сердечнике кабеля приведена в табл. 1.

Таблица 1

Процент влаги, %	0	2	4	6	8
Эквивалентная диэлектрическая проницаемость	2,16	2,49	2,9	3,32	3,8
Погоная емкость, нФ/км	39	45	52	60	68

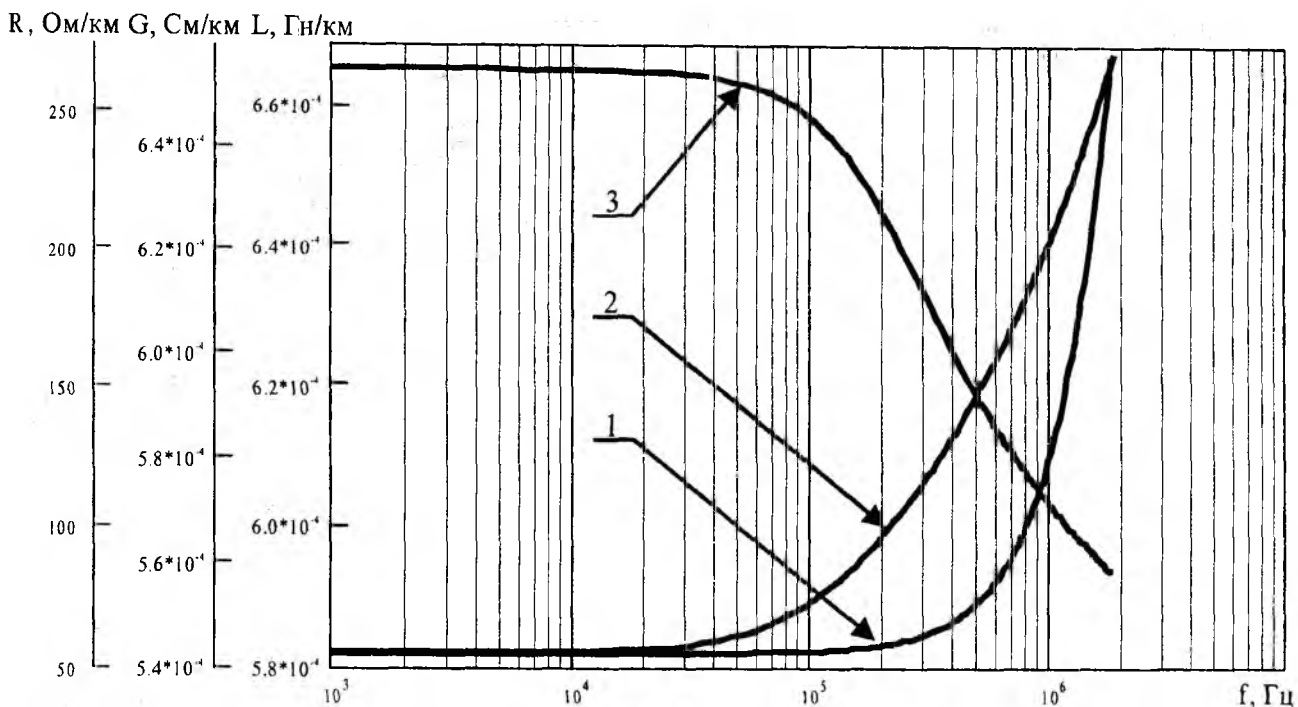


Рис. 2

Взаимосвязь между частотной характеристикой, погонными параметрами телефонного кабеля и максимальной дальностью связи для кабелей в литературе не приведена, что не позволяет оценивать максимально достижимую скорость передачи информации при заданной длине линии связи и выборе оптимального вида модуляции.

Модуль АЧХ всей линии для приведенных выше первичных параметров и для эквивалентной схемы (рис.1) равен:

$$|K(jf)| = \left| \frac{\frac{1}{G(f)l + G_n + j2\pi fCl}}{R_n + R(f)l + \frac{1}{G(f)l + G_n + j2\pi fCl}} \right|. \quad (9)$$

Семейство кривых модуля АЧХ для различной длины линии связи и количества влаги 4% в сердечнике кабеля приведено на рис. 3. (1 - L=5 км; 2 - L=10 км; 3 - L=15 км; 4 - L=20 км; 5 - L=25 км).

Если принять, что на отечественных телефонных линиях связи в условиях реальных уровней помех энергетический потенциал системы должен составлять не менее -40 дБ, то при граничной частоте f (рис. 3) и использовании двоичного кода максимальная скорость передачи информации составляет $\leq 2f$, а при использовании четырехуровневого кода 2B1Q скорость передачи - $\leq 4f$. В табл. 2 приведены оценки максимальной скорости передачи для различных длин линии связи при использовании xDSL-технологии, полученные в соответствии с рис. 3. В этой же таблице приведены значения стандартизованных скоростей передачи. Практически полное соответствие данных полностью подтверждает адекватность предлагаемых моделей и методик расчета.

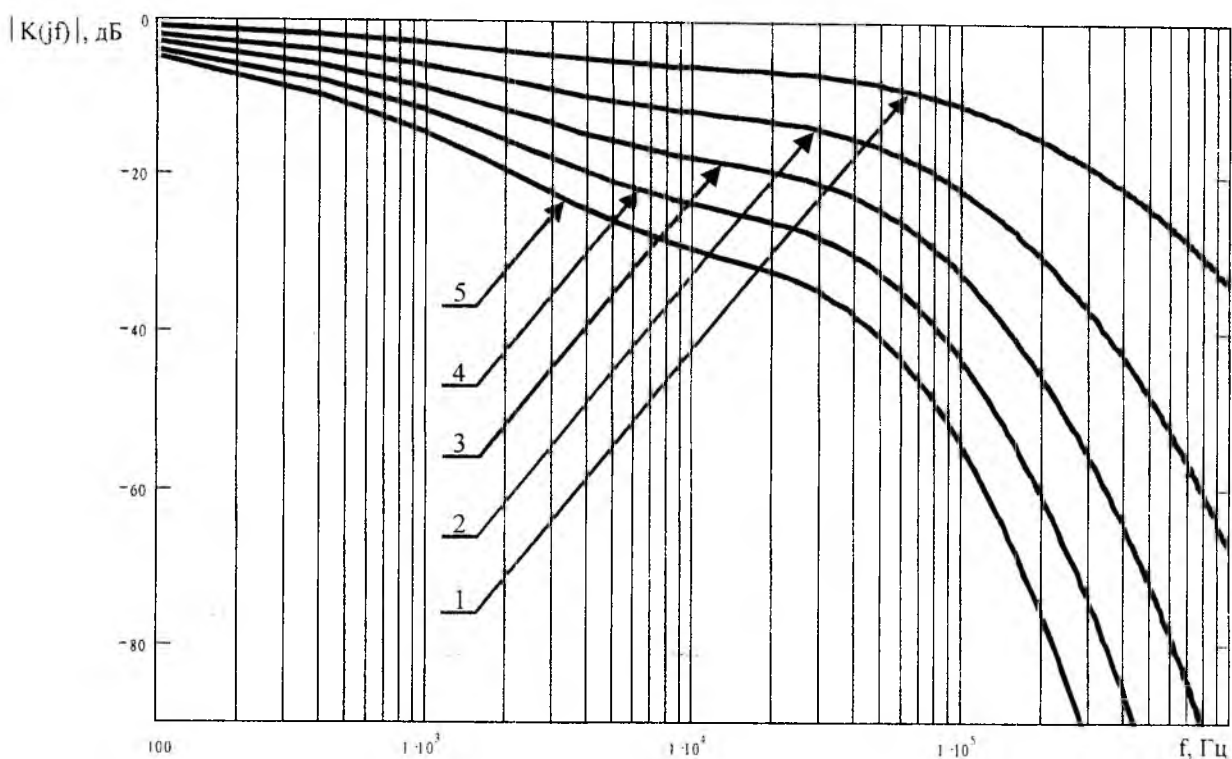


Рис. 3

Таблица 2

L, км	5	10	15	20	25
$C_{\max}$, кбит/с	>4000	1188	530	304	165
$C_{\text{ст}}$, кбит/с	2048	1168	528	272	160

Графики зависимости модуля АЧХ для кабеля КСПП-4-4-1.2 при длине $L=20$ км для различного содержания влаги в сердечнике кабеля представлены на рис. 4 : 1 – 0%; 2 – 4%; 3 – 8%.

Как видно из рисунка 4, увеличение количества влаги в кабеле ведет к увеличению затухания. Это вызвано увеличением погонной емкости цепи и, как следствие увеличением погонной проводимости.

Следует учитывать воздействие влаги на взаимное влияние между цепями в кабеле. Причиной взаимного влияния является поперечное электромагнитное поле, возникающее от токонесущих жил. Теоретический анализ и экспериментальные данные доказывают увеличение воздействия влаги на взаимное влияние с ростом частоты [4]. Влага в сердечнике кабеля уменьшает величину переходного затухания на 10 дБ.

Кроме влияния влаги необходимо учитывать влияние отрицательных факторов, возникающих в процессе старения кабеля. Коррозия жил, возникновение окисла меди на них увеличивают асимметрию цепи, нелинейные искажения, перерывы в связи, изменение волнового сопротивления. Ухудшение параметров кабелей снижает пробивное напряжение, возрастает затухание, возрастают взаимные влияния и увеличивается неоднородность волнового сопротивления. Исследования показывают [4], что суммарное воздействие этих факторов на линии из кабелей КСПП, находящихся в эксплуатации 15-20 лет, приводит к увеличению коэффициента затухания на 15-20%.

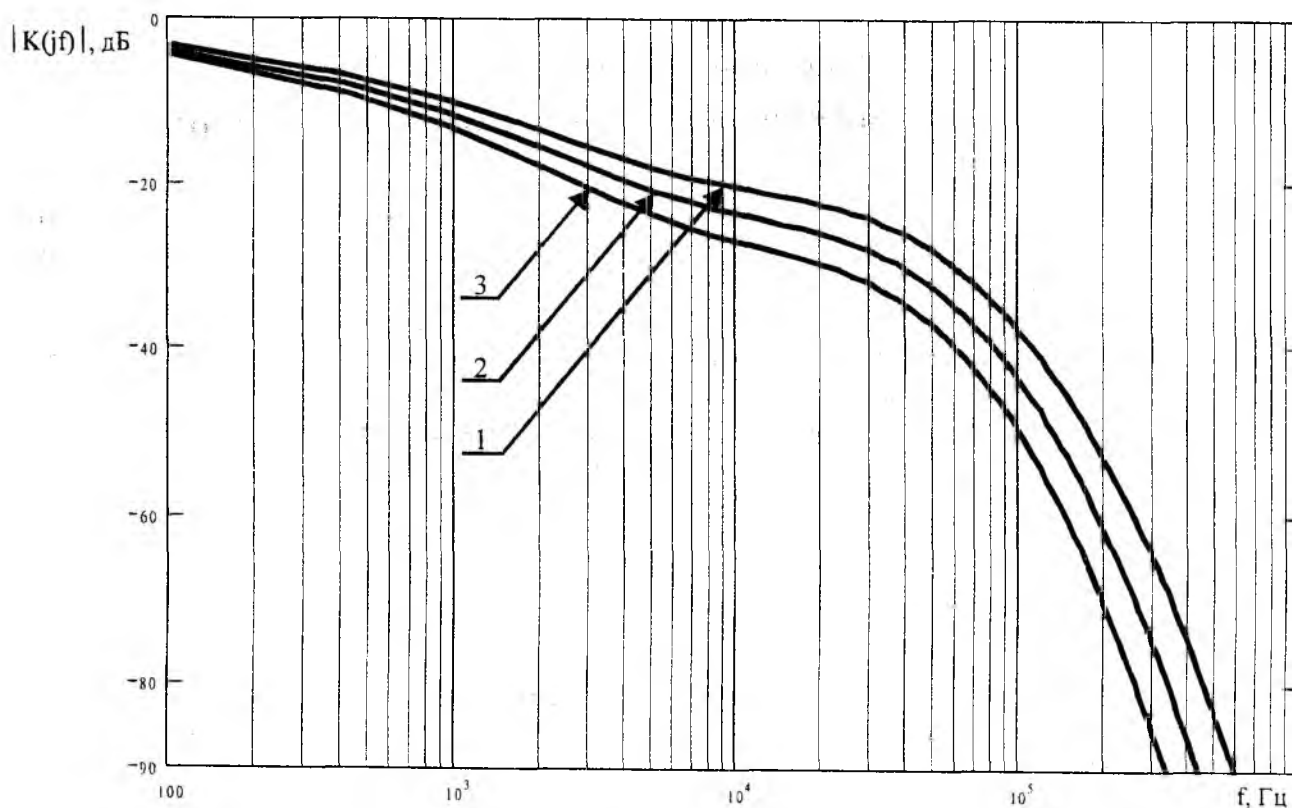


Рис. 4

Разработанная модель кабельных линий связи позволяет проводить оценку и расчет частотных характеристик конкретных линий связи и максимальной скорости передачи, что чрезвычайно необходимо при проектировании высокоскоростных цифровых систем передачи информации.

Список литературы: 1. Мирошников Д. Г. и др. Современные методы передачи данных в оборудовании SDSL с линейным кодом TC-PAM // Электросвязь, 2001. №4. 2. Брискер А.С., Руга А.Д., Шарле Д.Л. Городские телефонные кабели. М.: Радио и связь, 1991. 208 с. 3. Ионов А. Д., Попов Б. В. Линии связи. М.: Радио и связь, 1990. 168 с. 4. Парфенов Ю. А., Мирошников Д. Г. Последняя миля на медных кабелях. М.: Эко-Трендз, 2001. 212 с. 5. Кабельные линии сельской телефонной связи и проводного вещания. М.: Радио и связь, 1981. 168 с.

Харьковский национальный
университет радиоэлектроники

Поступила в редколлегию 27.02.2002