

УДК 621.39

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ НА ДАЛЬНОМ КОНЦЕ МЕЖДУ ЦЕПЯМИ КАБЕЛЯ ДЛЯ ШИРОКОПОЛОСНОГО АБОНЕНТСКОГО ДОСТУПА

В. В. Баннов, технический директор ЗАО «Самарская кабельная компания»; bannov@samaracable.ru

В. Б. Попов, доцент ПГУТИ, к. т. н.

Ключевые слова: сети абонентского доступа, технологии xDSL, электромагнитное влияние, взаимовлияющие цепи, коэффициент электромагнитной связи на дальнем конце, защищенность симметричных цепей.

Сформировавшаяся в настоящее время в России структура телекоммуникационного рынка обеспечивает производство и доставку разнообразных телекоммуникационных продуктов и услуг, быстрое внедрение самых современных технологий. Мультимедийные инфокоммуникационные услуги (передача голоса, данных, видеоинформации и т. д.) на основе широкополосного доступа (ШПД) образуют один из наиболее динамично развивающихся сегментов рынка телекоммуникаций.

На сетях абонентского доступа сегодня активно используется технология передачи xDSL, позволяющая применять не только симметричные кабели существующей местной сети, но и новые, специально изготовленные по технологии витой пары, кабели, предназначенные для ШПД. Во всех xDSL-технологиях скорость доступа ограничивается затуханием сигнала и мешающими взаимными влияниями между цепями в кабеле. На первом этапе чаще всего применялась технология ADSL, основное преимущество которой в том, что она работает по уже существующим абонентским линиям, построенным большей частью на основе кабелей типа ТПП. Технология ADSL позволяет передавать информацию со скоростью не более 8 Мбит/с в направлении к абоненту и 5,6 Мбит/с — в обратном направлении (от абонента). С появлением ADSL2+ скорость заметно выросла: приемопередатчики ADSL2+ обеспечивают скорость до 24—29 Мбит/с [1]. В последнее время наряду с ADSL2+ внедряется более скоростная технология VDSL2+, применение которой на медножильном участке длиной не более 200—300 м позволяет увеличить скорость доступа до 100 Мбит/с [2].

Для обеспечения высокой скорости передачи и 100 %-ного уплотнения кабельных цепей при строительстве новых сетей ШПД применяется архитектура FTТх; в этом случае лучше всего применять специальные медножильные кабели, изготавливаемые по технологии витой пары. От обычных телефонных кабелей они отличаются более высокими показателями геометрической и диэлектрической однородности, а также более высокой помехозащищенностью.

В ЗАО «Самарская кабельная компания» разработаны симметричные цифровые кабели с пленко-пористо-пленочной полиэтиленовой изоляцией жил (в том числе с гидрофобным наполнителем) марки КЦПппП, которые выпускаются по технологии витой пары. Здесь внутри пучков используется классическая однонаправленная скрутка. Кабели имеют емкость от 5 до 100 пар с диаметром медных жил 0,4; 0,5; 0,64; 0,7 мм. Освоены также кабели с 5-парными экранированными пучками. Использование физического

вспенивания позволяет обеспечить заданные значения коэффициента затухания и рабочей емкости кабельных пар. Высокая однородность пленко-пористо-пленочной изоляции достигается благодаря применению системы автоматического регулирования погонной емкости и диаметра изолированной жилы, а также физическому вспениванию пористого слоя.

Основными электрическими характеристиками медножильных симметричных кабелей связи, которые позволяют системам xDSL работать на абонентских линиях, являются характеристики электромагнитной совместимости цепей, т. е. параметры взаимного влияния. Именно взаимные электромагнитные влияния (ЭМВ) между цепями определяют допустимую длительность передаваемых импульсов и предельную длину кабелей при передаче цифровых сигналов по местным сетям связи. Значения ЭМВ зависят главным образом от параметров переходного затухания на ближнем конце A_0 и защищенности на дальнем конце A_3 симметричных цепей (СЦ).

Описание математической модели и результаты исследования ЭМВ на ближнем конце между цепями симметричного кабеля для ШПД с пленко-пористо-пленочной полиэтиленовой изоляцией производства ЗАО «Самарская кабельная компания» изложены в [3]. Защищенность на дальнем конце A_3 служит определяющим параметром при двухкабельном режиме работы линии связи, когда сигналы противоположных направлений передачи транспортируются по парам разных кабелей. Также A_3 имеет ключевое значение для разделения сигналов противоположных направлений, передаваемых по одной паре, при дуплексном способе передачи данных, когда используется метод частотного разделения сигналов с помощью технологий FDM, применяемый в системах ADSL2+ и VDSL2.

Данная работа посвящена исследованию ЭМВ на дальнем конце между цепями симметричного кабеля для ШПД с пленко-пористо-пленочной полиэтиленовой изоляцией марки КЦПппП в диапазоне частот до 100 МГц.

Электромагнитное влияние на дальнем конце (ДК) обусловлено в основном непосредственным переходом энергии за счет нерегулярной составляющей электромагнитной связи, а также косвенным влиянием через третьи цепи при двойном переходе энергии [4, 5]. В общем случае изменение нерегулярной составляющей связи между цепями на ДК можно представить в виде

$$F_{12}(p, x) = p \left[\overline{F(x)} + f_{12}(x) \right],$$

где $\overline{F(x)}$ — текущее математическое ожидание случайной функции $F_{12}(p, x)$; $f_{12}(x)$ — центрированная случайная функция; $p = j\omega$ — оператор Лапласа; ω — круговая частота.

Предположим, что функция $F(x)$ является постоянной по всей длине и равна коэффициенту электромагнитной

связи F_n на ДК. В этом случае передаточная функция влияния на ДК при непосредственном влиянии между цепями 1 и 2 принимает вид

$$K_i^{(1)}(p) = \sum_{i=1}^4 K_i^{(1)}(p).$$

Для согласованных взаимовлияющих цепей передаточные функции, определяющие дополнительное влияние, обусловленное несогласованностью взаимовлияющих цепей, $K_{12}^{(1)}(p) = K_{13}^{(1)} = K_{14}^{(1)} = 0$, а $P_{112} = \frac{1}{2} e^{-\gamma_2 L}$, и передаточная функция, описывающая ЭМВ между согласованными цепями, имеет вид

$$K_{11}^{(1)}(p) = -\frac{pF_n e^{-\gamma_2 L}}{2(\gamma_1 - \gamma_2)} (1 - e^{-(\gamma_1 - \gamma_2)L}), \quad (1)$$

где γ_1, γ_2 — коэффициенты распространения 1- и 2-й цепей; L — длина симметричной цепи.

Входящие в формулу (1) коэффициенты распространения γ_1 и γ_2 можно представить как $\gamma = \nu\sqrt{p} + pt_3$, где ν — коэффициент, характеризующий затухание в цепи кабеля, с/км.

Можно считать, что $\alpha_1 \approx \alpha_2$. Тогда $\gamma_1 - \gamma_2 = j(\beta_1 - \beta_2) = j\omega(t_{31} - t_{32}) = p\Delta T_3$, где ΔT_3 — разница во времени задержки сигнала в 1-и 2-й цепях.

Воспользовавшись выражением (1), перейдем к амплитудно-частотной характеристике защищенности между цепями внутри пучков:

$$A_3(\omega) = -20 \lg \left(\frac{F_n e^{-\alpha_2 L} \sqrt{2 - 2 \cos \Delta T_3 \omega}}{2 \Delta T_3} \right) - \alpha L. \quad (2)$$

Используя соотношение (2), построим графики защищенности (рис. 1) для двух длин кабеля КЦПППП: $L = 1000$ м (сплошные кривые) и $L = 500$ м (штриховые) — при $F_n = 2,86 \cdot 10^{-10}$. Из рисунка следует, что увеличение длины линии приводит к снижению защищенности, в относительно низкочастотной области $A_3(\omega)$ имеет место монотонный спад со скоростью 6 дБ/окт., а затем на графиках появляются экстремумы, которые определяются параметром $\Delta T_3 = t_{31} - t_{32}$, где $t_3 = \sqrt{L_{вн} C}$, с/км; $L_{вн}$ — внешняя межпроводниковая индуктивность цепи, Гн/км; C — емкость цепи, Ф/км. Запишем:

$$L_{вн} = 4\zeta \cdot 10^{-4} \ln \frac{a-r}{r}; \quad C = \frac{\zeta \cdot \epsilon_{э\text{кв}} \cdot 10^{-6}}{36 \ln \frac{a\psi}{r}}, \quad (3)$$

где a — расстояние между центрами проводников, мм; r — радиус проводника; ζ — коэффициент укрутки;

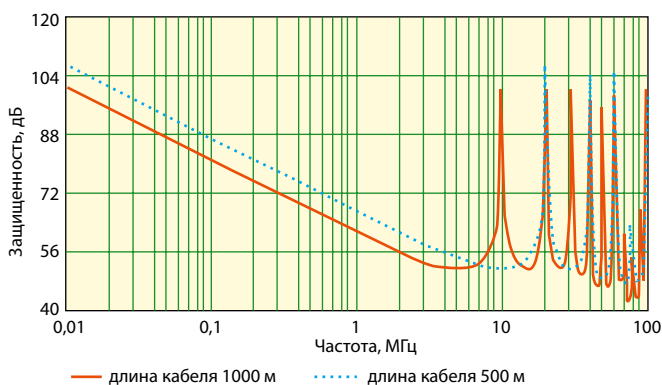


Рис. 1

$\epsilon_{э\text{кв}}$ — эквивалентная относительная диэлектрическая проницаемость изоляции жил; ψ — коэффициент, учитывающий близость соседних проводников и металлической оболочки.

Как видно из формул (3), параметр ΔT_3 зависит от различия шагов скрутки, геометрических размеров, типа изоляции взаимовлияющих цепей. Подбирая эти параметры, можно получить оптимально допустимое значение ΔT_3 .

Из графиков $A_3(\omega)$ для разных значений ΔT_3 (рис. 2) следует, что чем больше отличие между t_{31} и t_{32} , тем ниже частота, соответствующая первому экстремуму, и тем больше защищенность цепей от взаимных влияний. Для кабелей, используемых в сетях абонентского широкополосного доступа, увеличение параметра ΔT_3 повышает защищенность. Например, в соответствии с рис. 2 достаточно, чтобы $\Delta T_3 > 0,1$ мкс/км.

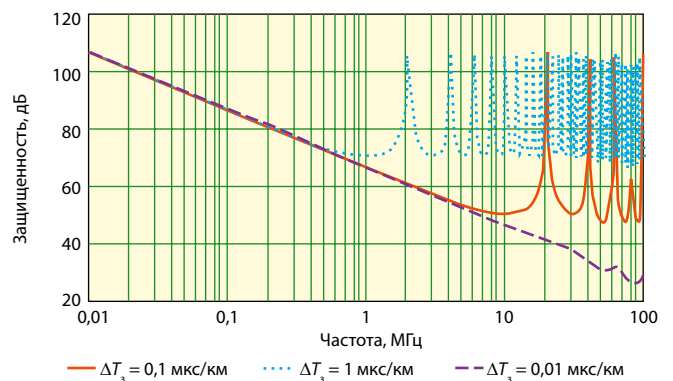


Рис. 2

Поведение нерегулярной составляющей связи $F_{12}(p, x) = pf_{12}(x)$ определяется многими независимыми случайными факторами, что позволяет на основании предельной теоремы Ляпунова считать функции $f_{12}(x)$ стационарными [6]. Для математического описания этих функций можно воспользоваться их вероятностными характеристиками — дисперсиями D_f и автокорреляционными функциями $R_f(\chi)$.

В частотной области влияние между цепями за счет нерегулярной составляющей связи $f(x)$ характеризуется квадратом модуля передаточной функции влияния. На основании [4] запишем

$$\overline{|K_l(j\omega)|^2} = \frac{\omega^2}{2} e^{-2\alpha_2 L} \int_0^L R_f(\chi)(L - \chi) \cos \omega \Delta T_3 \chi d\chi; \quad (4)$$

$$R_f(\chi) = \begin{cases} D_f \left(1 - \frac{\chi}{l}\right) & \text{при } 0 \leq \chi \leq l; \\ 0 & \text{при } \chi > l. \end{cases}$$

Среднее значение квадрата модуля передаточной функции и среднее значение защищенности на ДК определяются по формулам

$$\overline{|K_l(j\omega)|^2} = \frac{e^{-2\alpha_2 L}}{2\Delta T_3^2} D_f \left[\left(1 + \frac{L}{l}\right) (1 - \cos \omega \Delta T_3 l) + 2 \cos \omega \Delta T_3 l - \frac{2 \sin \omega \Delta T_3 l}{\omega \Delta T_3 l} \right];$$

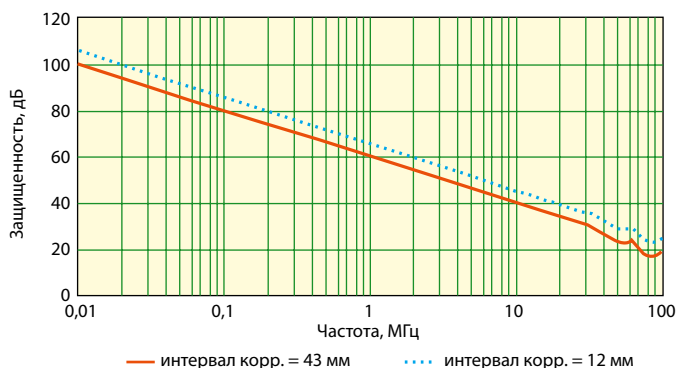


Рис. 3

$$\overline{A_3(\omega)} = -10 \lg \left\{ \frac{e^{-2\alpha_2 L}}{2\Delta T_3^2} D_f \left[\left(1 + \frac{L}{l} \right) (1 - \cos \omega \Delta T_3 l) + 2 \cos \omega \Delta T_3 l - \frac{2 \sin \omega \Delta T_3 l}{\omega \Delta T_3 l} \right] \right\} - \alpha L. \quad (5)$$

Проанализируем изменение $\overline{A_3(\omega)}$ в зависимости от интервала корреляции (шага скрутки) l и ΔT_3 . На рис. 3 представлены графики $\overline{A_3(\omega)}$ для двух значений интервала корреляции (соответственно минимального — 12 мм — и максимального — 43 мм — шага скрутки) кабеля КЦППП взаимовлияющих СЦ при $D_f = 4,74 \cdot 10^{-15}$ (с/км)² и $L = 500$ м. Согласно рис. 3, среднее значение защищенности имеет монотонно убывающий характер, спад составляет 6 дБ на октаву. Уменьшение интервала корреляции увеличивает степень защищенности между взаимовлияющими цепями во всем спектре частот.

Посмотрим, как изменяются $\overline{A_3(\omega)}$ при трех значениях ΔT_3 (0,01; 0,1 и 1 мкс/км) при тех же исходных данных, что и при построении зависимостей на рис. 3. Расчеты выполнялись при наибольшем значении интервала корреляции. Графики $\overline{A_3(\omega)}$ при разных значениях ΔT_3 совпали. Это объясняется тем, что в скрученных цепях разница во времени задержки сигнала во взаимовлияющих цепях не сказывается на характеристике усредненной защищенности вследствие малых значений интервалов корреляции.

Согласно теоретическим исследованиям изменения $\overline{A_3(\omega)}$ в зависимости от длины L взаимовлияющих цепей, графики имеют монотонно убывающий характер и спад защищенности с увеличением длины составляет 3 дБ на октаву.

Таким образом, электромагнитное влияние на ДК для кабелей ШПД можно записать в виде

$$\overline{A_3(\omega)} = -10 \lg \left[|K_{11}(j\omega)|^2 + |K_{12}(j\omega)|^2 \right] - \alpha L,$$

где $|K_{11}(j\omega)|$ — передаточная функция, которая определяется из выражения (1); $|K_{12}(j\omega)|^2$ — среднее значение квадрата модуля передаточной функции влияния, которое определяется по формуле (5).

Выполнив необходимые преобразования, получим

$$\overline{A_3(\omega)} = -10 \lg \left\{ \frac{e^{-2\alpha_2 L}}{2\Delta T_3^2} \left[\frac{(2 - 2 \cos \omega \Delta T_3 L) F_n^2}{2} + D_f \left[\left(1 + \frac{L}{l} \right) (1 - \cos \omega \Delta T_3 l) + 2 \cos \omega \Delta T_3 l - \frac{2 \sin \omega \Delta T_3 l}{\omega \Delta T_3 l} \right] \right] \right\} - \alpha L. \quad (6)$$

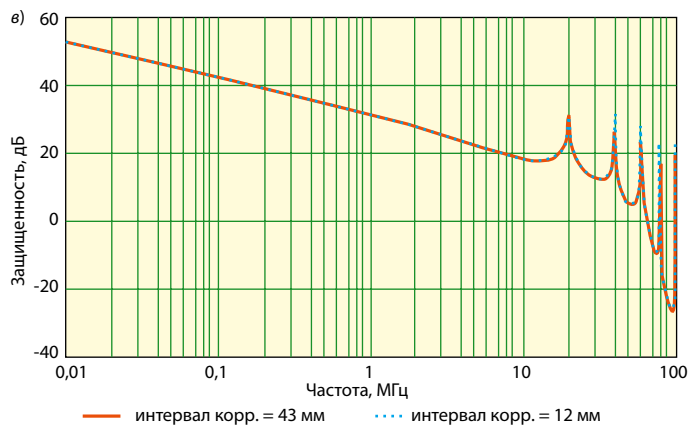
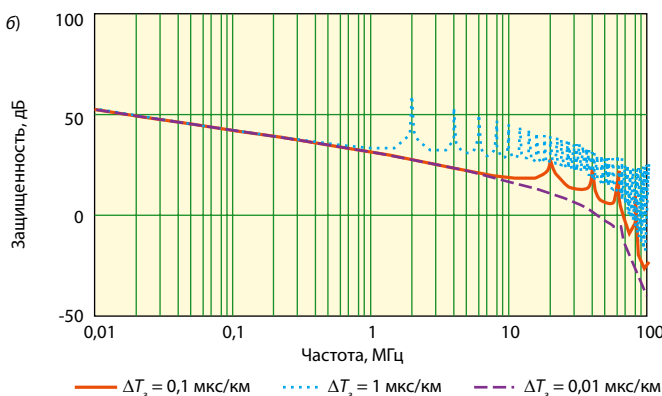
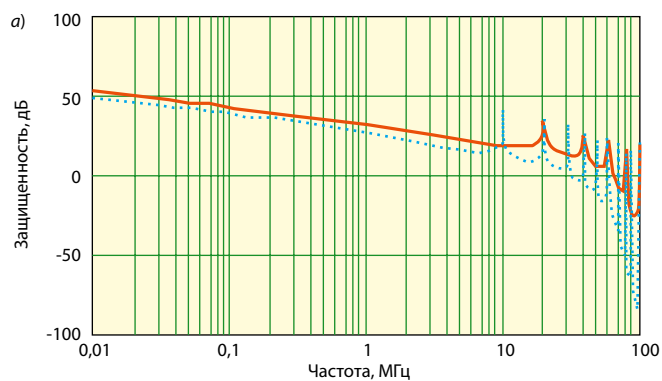


Рис. 4

Используя выражение (6), проведем исследование ЭМВ между симметричными цепями на дальнем конце при следующих исходных данных: $D_f = 4,74 \cdot 10^{-15}$ (с/км)²; $L = 500$ м; $l = 43$ мм; $F_n = 2,86 \cdot 10^{-10}$. Значения электромагнитных связей на ДК были взяты из экспериментальных данных. Графики $\overline{A_3(\omega)}$ для разной протяженности кабеля представлены на рис. 4, а, для трех значений ΔT_3 — на рис. 4, б и для максимального/минимального интервала корреляции — на рис. 4, в.

Анализ графиков, построенных на основе полученных аналитических соотношений, показал, что изменение $\overline{A_3(\omega)}$ носит волнообразный характер. Графики $\overline{A_3(\omega)}$ имеют монотонный спад, соответствующий 6 дБ/окт. в относительно низкочастотной области. Увеличение длины линии приводит к снижению суммарной защищенности и возникновению осцилляций в высокочастотной области. Рост ΔT_3 вызывает подъем $\overline{A_3(\omega)}$ в высокочастотной области, причем частота, с которой начинается подъем, тем ниже, чем боль-

ше ΔT_3 . Изменение интервала корреляции в данном случае не влияет на значение усредненной защищенности.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кочеров А. В.** К вопросу обеспечения нормирования сетей ШПД-xDSL//Вестник связи. — 2008. — № 9. — С. 63—65.
2. **Кочеров А. В., Гаврилюк Ю. А., Тарасов Н. И., Хвостов Д. В.** DSL на 100%//Вестник связи. — 2009. — № 6. — С. 52—57.
3. **Баннов В. В.** Математическая модель электромагнитных влияний на ближнем конце между цепями симметричного кабеля для широкополосного абонентского доступа с пленко-
пористо-пленочной полиэтиленовой изоляцией//Кабели и провода. — 2009. — № 5.
4. **Андреев В. А.** Теория электромагнитных влияний между цепями связи. — М.: Радио и связь, 1999.
5. **Самойлова Н. А.** Исследование параметров взаимного влияния кабелей локальных сетей, имеющих нерегулярную конструкцию//Электросвязь. — 1999. — № 6.
6. **Левин Б. Р.** Теоретические основы статистической радиотехники. Кн. 1. — М.: Сов. радио, 1974.

Получено 12.01.10
