

# АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ взаимных влияний на ближнем конце многопарных LAN-кабелей

**В.Баннов**, к.т.н., заместитель генерального директора –  
технический директор АО "Самарская кабельная компания",

**Б.Попов**, к.т.н., профессор ПГУТИ,

**В.Попов**, к.т.н., профессор ПГУТИ / inkat@inbox.ru,

УДК 679.746.52, DOI: 10.22184/2070-8963.2022.107.7.40.43

Приводятся результаты исследования составляющих взаимных влияний на ближнем конце многопарных LAN-кабелей. Полученные данные о преобладающих составляющих взаимного влияния позволяют на этапе конструирования и производства кабеля принимать меры по уменьшению взаимных влияний между цепями кабеля. На основе проведенных исследований разработан комплекс мероприятий по технологии изготовления многопарных LAN-кабелей, позволяющий обеспечить выполнение требований, предъявляемых к кабелям категории 5e.

## Общие положения

Сегодня в России в отрасли телекоммуникаций наибольшая доля капитальных вложений направляется на развитие широкополосного доступа (ШПД). Весьма востребованы также структурированные кабельные системы (СКС), которые являются неотъемлемой частью инженерной инфраструктуры любого современного общественного объекта, в первую очередь офисных зданий. В этих сферах широкое применение находит специальная группа медножильных симметричных кабелей – LAN-кабели (кабели "витая пара").

Опыт работы реальных сетей ШПД показывает, что достичь высокой скорости и высокого качества передачи можно только используя высококачественные LAN-кабели, не ниже категории 5e. Сегодня наибольшим спросом пользуются четырехпарные кабели без экрана типа U/UTP 4×2×0,52 категории

5e, предназначенные для передачи информации на скоростях до 1 Гбит/с с полосой пропускания до 100 МГц. Однако в последнее время стали востребованы и многопарные LAN-кабели емкостью от 10 до 100 пар. При этом операторы связи в большинстве случаев заказывают для ШПД многопарные LAN-кабели категории 5e, сердечник которых формируется из 4-парных элементарных пучков. Дело в том, что для обеспечения высокой скорости передачи к абоненту вводится уже ставший традиционным 4-парный кабель категории 5e. Необходимость применения именно этой категории вызвана потребностью передачи по сети сигналов сетевых интерфейсов Fast Ethernet и Gigabit Ethernet.

При этом отметим, что скорость передачи в значительной мере определяется величиной взаимных влияний между цепями кабеля связи. Практика

производства симметричных кабелей связи вообще и многопарных в частности показывает, что параметры передачи и особенно взаимных влияний между цепями наиболее чувствительны к неизбежно возникающим геометрическим неоднородностям. Следует особо подчеркнуть, что высококачественные LAN-кабели можно изготавливать только на основе применения современного технологического оборудования, оснащенного системами автоматического регулирования параметров качества продукции, а также использованием материалов надежных отечественных поставщиков [1]. В связи с этим возникает практический интерес к анализу составляющих взаимных влияний между цепями многопарных LAN-кабелей, знание которых необходимо для обеспечения выполнения норм на электрические характеристики взаимных влияний, отвечающих требованиям категории 5е в соответствии с ГОСТ Р 54429-2011 "Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия" [2]. В статье приводятся результаты исследования составляющих взаимных влияний на ближнем конце многопарных LAN-кабелей производства АО "Самарская кабельная компания" (СКК).

#### МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВЯЗЕЙ МЕЖДУ ЦЕПЯМИ ПО ИЗМЕРЕННЫМ ЧАСТОТНЫМ ХАРАКТЕРИСТИКАМ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ

В общем случае величины электромагнитных связей между цепями можно определить через геометрические размеры элементов конструкций кабеля связи [3, 4]. Для этого необходимо знать номинальные значения размеров элементов конструкции кабеля и электрические свойства диэлектрика, которые в процессе изготовления продукции подвергаются неизбежному отклонению от нормы. Поэтому возникает необходимость нахождения статистических характеристик отклонения этих размеров и электрических свойств диэлектрика от номинальных значений.

Такой подход к определению вероятностных характеристик изменения связей является достаточно трудоемким и далеко не всегда согласуется с результатами измерений нормируемых значений параметров взаимного влияния. На практике более рационально определять значения электромагнитных связей по измеренным частотным характеристикам взаимного влияния отдельных образцов кабелей. Измеренные частотные характеристики позволяют определить характер изменения частотных характеристик влияния (ЧХВ), а также найти

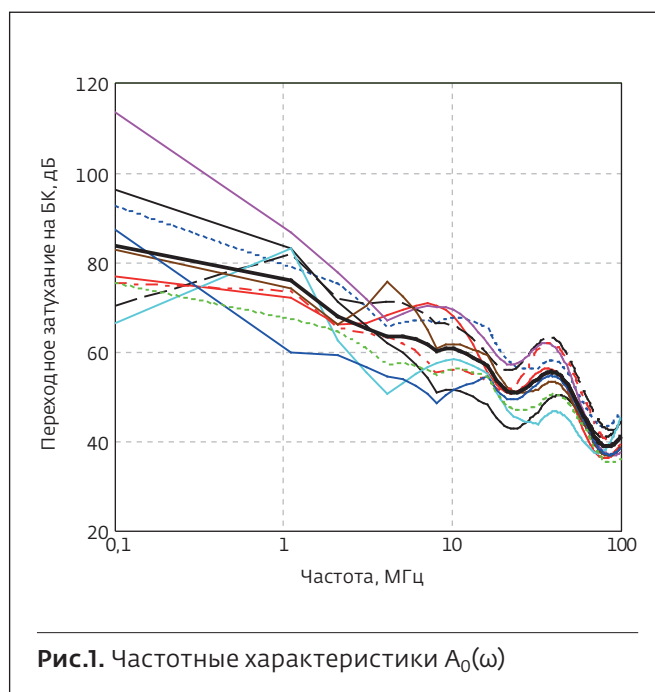


Рис.1. Частотные характеристики  $A_0(\omega)$

значения или вероятностные характеристики электромагнитных связей и выявить определяющие по величине составляющие взаимного влияния. Это называется идентификацией электромагнитных влияний [3].

Данной методикой и воспользуемся для определения отдельных составляющих взаимных влияний на ближнем конце многопарных LAN-кабелей.

#### РАСЧЕТ И АНАЛИЗ СОСТАВЛЯЮЩИХ ВЗАИМНЫХ ВЛИЯНИЙ МНОГОПАРНЫХ LAN-КАБЕЛЕЙ

Для выявления отдельных составляющих влияния были проведены экспериментальные исследования электромагнитных влияний между взаимовлияющими цепями кабеля марки U/UTP cat 5e PVC 25×2×0,52. Сначала определялись значения электромагнитных связей отдельно для регулярной и нерегулярной составляющих, а затем они подставлялись в разработанную математическую модель взаимных влияний на ближнем конце [5]. Далее проводилось сравнение полученной после подстановки частотной характеристики взаимного влияния с экспериментальной ЧХВ.

На рис.1 представлены экспериментальные кривые переходного затухания на ближнем конце (БК) для образца исследуемого кабеля длиной 305 м, а также усредненная величина (жирная кривая) экспериментальных значений  $A_0(\omega)$ . Приведенные ниже результаты исследования получены путем применения численных методов, реализованных в среде MATHCAD.

Для определения величины равномерно распределенной по длине связи  $N_{\Pi}$  воспользуемся выражением для  $A_0(\omega)$  [5]:

$$A_0(\omega) = -20 \lg |K_{01}^{(1)}(j\omega)| = -20 \lg \left( \frac{\omega N_{\Pi}}{2\sqrt{\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2}} \sqrt{1 - 2e^{-\alpha_{12}L} \cos \beta_{12}L + e^{-2\alpha_{12}L}} \right). \quad (1)$$

Для этого на характеристиках  $\overline{A_0(\omega)}$  выбирались дискретные частоты из данного диапазона, на которых определялись значения переходного затухания.

$$N_{\Pi} = \frac{2\sqrt{\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2} 10^{0,05 \overline{A_0(\omega_{\max})}}}{\omega_{\max} \sqrt{1 + e^{-2\alpha_{12}L} - 2e^{-\alpha_{12}L} \cos \beta_{12}L}}, \quad (2)$$

где  $\alpha_{12} = \alpha_1 + \alpha_2$  – коэффициент затухания 1-й и 2-й цепей, дБ/км;

$\beta_{12} = \beta_1 + \beta_2$  – коэффициент фазы 1-й и 2-й цепей, рад/км;

$L$  – длина линии, км.

Используя выражение (2), получено среднее значение величины связи для исследуемого кабеля  $N_{\Pi} = 1,735 \cdot 10^{-7}$ .

Влияние за счет нерегулярной составляющей связи описывается при помощи вероятностных характеристик. Вероятностные характеристики функций электромагнитных связей  $n_{12}(x)$  также можно определить непосредственно по частотным характеристикам влияния, полученным экспериментальным путем.

Согласно [4, 6] запишем:

$$\sigma_n(\beta_{12}) = \frac{8\alpha_{12} 10^{-0,1 \overline{A_0(\omega)}}}{\omega^2 (1 - e^{-2\alpha_{12}L})}, \quad (3)$$

$$\text{где } \sigma_n(\alpha_{12}, \beta_{12}) = 2 \int_0^L R_n(\tau) e^{\alpha_{12}\tau} \cos \beta_{12}\tau d\tau \equiv \sigma_n(-\alpha_{12}, \beta_{12}) = 2 \int_0^L R_n(\tau) e^{-\alpha_{12}\tau} \cos \beta_{12}\tau d\tau = \sigma_n(\beta_{12})$$

(на основании того, что радиус корреляции  $l < L$ ) – спектральная плотность усеченной стационарной функции  $n_{12}(x)$ .

Поскольку в кабельной технике чаще приходится иметь дело со стационарными случайными функциями, представляющими собой отрезки одинаковой длины (например, скрученные участки взаимовлияющих цепей) с постоянными по длине связями, которые случайным образом изменяются, то достаточно воспользоваться линейной автокорреляционной функцией и записать выражение для дисперсии электромагнитных связей на ближнем конце  $D_n$  в следующем виде [6]:

$$D_n = \frac{4 \times 10^{-0,1 \overline{A_0(\omega)}}}{b_1 + b_2 - b_3}, \quad (4)$$

$$\text{где } b_1 = \omega^2 \left[ \frac{\alpha_{12}(e^{-2\alpha_{12}L} + 1)}{2(\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2)} \right]$$

$$b_2 = \omega^2 \left[ \frac{(\alpha_{12}^2 - \beta_{12}^2) [(e^{-2\alpha_{12}L} - 1) + e^{-\alpha_{12}L} \cos \beta_{12}L (1 - e^{-2\alpha_{12}(L-l)})]}{2\alpha_{12}(\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2)^2} \right]$$

$$b_3 = \omega^2 \left[ \frac{e^{-\alpha_{12}L} \beta_{12} \sin \beta_{12}L (1 + e^{-2\alpha_{12}(L-l)})}{(\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2)^2} \right].$$

Используя экспериментальные кривые переходного затухания на БК, представленные на рис.1, а также формулы (3) и (4), получена следующая величина связи:  $D_n = 3,4 \cdot 10^{-14}$  (с/км)<sup>2</sup>.

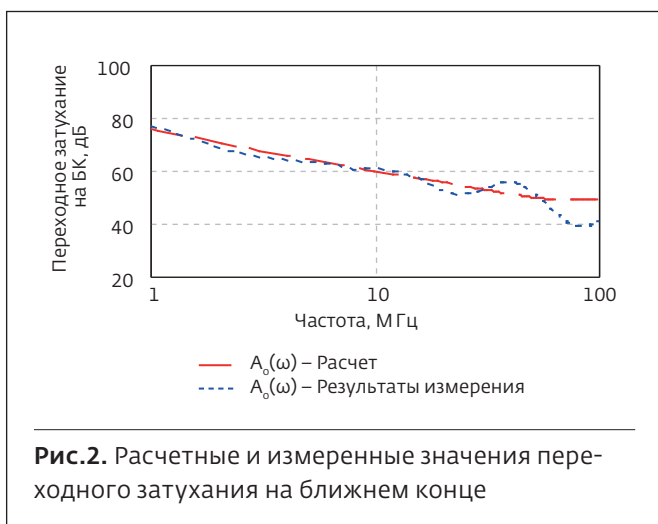
На рис.2 представлены графики, полученные расчетным путем после подстановки в выражение для суммарного значения переходного затухания (5) и найденного значения электромагнитных связей, а также путем усреднения экспериментальных кривых ЧХВ между всеми комбинациями взаимовлияющих цепей.

$$\overline{A_{0\text{сум}}(\omega)} = 10 \lg 4 - 10 \lg \left\{ \omega^2 \left( \left( D_n \left[ \frac{\alpha_{12}(e^{-2\alpha_{12}L} + 1)}{2(\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2)} + \frac{(\alpha_{12}^2 - \beta_{12}^2) \{ (e^{-2\alpha_{12}L} - 1) + e^{-\alpha_{12}L} \cos \beta_{12}L (1 - e^{-2\alpha_{12}(L-l)}) \}}{2\alpha_{12}(\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2)^2} - \frac{e^{-\alpha_{12}L} \beta_{12} \sin \beta_{12}L (1 + e^{-2\alpha_{12}(L-l)})}{(\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2)^2} \right] \right) + \frac{N_{\Pi}^2 (1 - 2e^{-\alpha_{12}L} \cos \beta_{12}L + e^{-2\alpha_{12}L})}{\alpha_{12}^2 + \beta_{12}^2} \right\} \right\} \quad (5)$$

Сопоставление результатов расчета переходного затухания на ближнем конце с экспериментальными данными показало их достаточно хорошее совпадение. Расхождение не превышает 15%, что позволяет сделать вывод о правильности примененной математической модели электромагнитных влияний между цепями на БК многопарных LAN-кабелей со сплошной полиэтиленовой изоляцией и парной однопроволочной скруткой. Выражения (2) и (4) позволяют по измеренным значениям электромагнитных влияний на ближнем конце определять значения электромагнитных связей для регулярной и нерегулярной составляющих взаимного влияния и проводить исследования частотных характеристик взаимного влияния различных конструкций симметричных кабелей парной скрутки с регулярной по длине конструкцией. Полученные данные о преобладающих составляющих взаимного влияния позволяют на этапе конструирования и производства кабеля принимать меры по уменьшению взаимных влияний между цепями кабеля.

На основании проведенных исследований в АО "СКК" разработан комплекс мероприятий





**Рис. 2.** Расчетные и измеренные значения переходного затухания на ближнем конце

по оптимизации технологии скрутки кабельного сердечника из элементарных 4-парных пучков и наложению на сердечник экрана и защитной полимерной оболочки, который позволил обеспечить практически круглую форму сердечника и минимальное механическое воздействие на элементарные пучки в процессе его скрутки. Все это в конечном итоге обеспечивает выполнение норм на электрические характеристики передачи и взаимного влияния

многопарных LAN-кабелей, отвечающих требованиям категории 5e в соответствии с ГОСТ Р 54429-2011.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев В., Бульхин А. и др. Качество LAN-кабелей – основа надежной работы СКС и сетей ШПД // ПЕРВАЯ МИЛЯ. 2020. № 1. С. 24-27.
2. ГОСТ Р 54429-2011. Кабели связи симметричные для цифровых систем передачи. Общие технические условия.
3. Андреев В.А. Теория электромагнитных влияний между цепями связи. М.: Радио и связь, 1999. 320 с.
4. Самойлова Н.А. Электромагнитная совместимость цепей внутриобъектовой связи: дис. ... канд. техн. наук. Самара, 1999. 188 с.
5. 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. С. 20-23.
6. Баннов В.В. Разработка и исследование кабеля с пленко-пористо-пленочной изоляцией для широкополосного абонентского доступа: дис. ... канд. техн. наук. М., 2010. 149 с.

I Федеральный форум по цифровизации и ИТ в лесопромышленном комплексе

# SMART FOREST

SMART FOREST – новая информационная и дискуссионная площадка для обсуждения роли цифровых и информационных технологий, промышленной автоматизации в лесопромышленном комплексе РФ.

Организатор: COMNEWS CONFERENCES

08.12.2022 Санкт-Петербург