СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Smith P., Furse C., Gunther J.** Analysis of Spread Spectrum Time Domain Reflectometry for Wire Fault Location // IEEE Sensors Journal. – December 2005. –Vol. 5, №. 6. – P. 1469–1478.
2. **Lo C., Furse C.** Noise-Domain Reflectometry for Locating Wiring Faults // IEEE Transactions on electromagnetic compability. – February 2005. – Vol. 47, №.1. – P. 97–104.
3. **Naik Suketu, Furse C., Farhang-Boroujeny B.** Multicarrier Reflectometry // IEEE Sensors Journal. – June 2006. – Vol. 6, №3. – P. 812–818.
4. **Джиган В.И., Кочеров А.В.** Рефлектометр на основе непрерывного сигнала для тестирования кабелей цифровых абонентских линий (XDSL) // Электросвязь. – 2006. – №3. – С.40–43.
5. **Архангельский В.Б., Глаголев С.Ф., Марченко К.В., Семин А.В.** Корреляционный рефлектометр со сложным зондирующим сигналом // Фотон-Экспресс. – 2004. – № 5 (37).
6. **Архангельский В.Б., Глаголев С.Ф., Марченко К.В.** Интегрирующий рефлектометр // Фотон-Экспресс. – 2005. – № 3 (43).
7. **Былин А.Р., Былина М.С., Глаголев С.Ф.** Функциональные возможности импульсных рефлектометров // Вестник связи. – 2007. – № 8.
8. **Былина М.С., Глаголев С.Ф.** Повышение точности определения расстояний по рефлектограммам кабельных цепей // Кабель-News. – 2011. –№ 5.
9. **Былина М.С., Глаголев С.Ф., Дюбов А.С.** Новые возможности импульсного метода измерений параметров кабелей для цифровых систем передачи // Электросвязь. – 2010. – № 2.
10. **Дюбов А.С.** Прибор для измерения количественных и статистических характеристик внутренних неоднородностей симметричных высокочастотных кабелей связи // Ползуновский вестник. – 2010. – №2.
11. Контрольно-измерительные приборы. http://www.dianetcom.ru/info/catalog/test_pribor/reflektometr (дата обращения 02.01.2015)
12. **Пат.2446407 РФ.** Способ определения места повреждения линий электропередачи и связи и устройство для его осуществления / Ю.Е. Седельников, Л.Ю. Фадеева. Опубл., бюл. II ч. – 2012. – №9. – С.369–370.
13. **Тихонов В. И.** Оптимальный прием сигналов. – М.: Радио и связь, 1983. – 320с.
14. Теоретические основы радиолокации / Под ред. Я.Д. Ширмана. Учебное пособие для ВУЗов. – М.: Советское радио, 1970. – 340с.
15. **Неганов В.А., Табаков Д.П., Яровой Г.П.** Современная теория и практические применения антенн / Под ред. В.А. Неганова. – М.: Радиотехника, 2009. – 720с.

Получено 04.06.2015

Модели расчета помех в экранированных кабельных системах

Т.С. Аббасова, доцент кафедры информационных технологий и управляющих систем ФГБОУ ПО «Технологический университет», к.т.н.; abbasova_univer@mail.ru

УДК 629.7

Аннотация. *Предложены геометрические модели для оценки электромагнитных наводок в электрических кабельных линиях, защищенных сетчатым экраном. Построенные модели отличаются от существующих тем, что сетчатый экран в них не рассматривается как сплошной экран или как дипольное приближение для щелевого затекания, а разбивается на пять областей с соответствующим масштабированием внешних и внутренних задач и проникновением полей через отдельную щель. Проникновение полей оценивается путем решения уравнения Лапласа в пяти областях с согласованием на границах. Предложенные модели позволяют оценить помехи в кабельных линиях, в области разъемов кабелей, защищенных сетчатым экраном, а также помехи, возникающие при самоэкранировании пучка линий.*

Ключевые слова: *электрические каналы, электромагнитная совместимость, кабельные системы.*

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Оценке наводок в экранированных кабельных линиях в случаях проникновении электромагнитных полей (ЭМП) через сеточные экраны посвящено достаточно публикаций [1, 2]. Как правило, в них сеточные экраны «заменяли» сплошными, рассматривая типичное для импульсов микросекундной длительности проникновение, и дипольное приближение для щелевого затекания [3]. Однако такие подходы справедливы далеко не для всех ориентаций ЭМП.

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМА РАСЧЕТА ОБЛАСТЕЙ СЕТЧАТОГО ЭКРАНА И ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ

Определение областей сетчатого экрана и граничных условий. Рассмотрим проникновение ЭМП через металлический сеточный экран. Для поперечных электрических и продольных магнитных полей в качестве граничного условия выберем равенство нулю производной по нормали к проводящей поверхности. Физически это означает полное отражение этих полей. Будем считать, что длина волны излучения λ много больше характерных размеров щелей и самого экрана, т.е. λ>>D (рис. 1).

Задача оценки проникновения полей разбивается на поиск решения уравнения Лапласа в пяти областях с согласованием на границах: 1) внешняя задача в масштабе D; 2) внешняя задача в масштабе D_1; 3) проникновение полей через отдельную щель; 4) внутренняя задача в масштабе D_1; 5) внутренняя задача в масштабе D.

Расчетные области и граничные условия представлены на рис. 2.

Внутренние задачи рассчитываются подобно внешним. При решении внешней задачи должны учитываться следующие величины: $E_\perp$ – вектор напряженности электрического поля, перпендикулярный вектору напряженности магнитного поля; $H_\parallel$ – вектор напряженности магнитного поля, параллельный вектору напряженности электрического поля; $E_\parallel$ – вектор напряженности электрического поля, параллельный вектору напряженности магнитного поля и $H_\perp$ – вектор напряженности магнитного поля, перпендикулярный вектору напряженности электрического поля.

Поиск решения внешних задач. Обозначим индексами значения полей: 0 при $y = D$; 1 при $y = D_1$; 2 – $y = 0$; 3 – $y = -L$; 4 – $y = -(L + D_1)$; 5 – $y = -(L+D)$. Полная внешняя задача 1 (рис. 2, *а*) для $E_\perp$ и $H_\parallel$ имеет решение, отличное от постоянного только в области отверстия, поэтому для дальнейших оценок можно считать

$E_{\perp 0} = E_{\perp 1} = E_{\perp 2}$ и $H_{\parallel 0} = H_{\parallel 1} = H_{\parallel 2}$.

Полная внешняя задача 1 для $E_\parallel$ и $H_\perp$:

$\Delta E_\parallel = \partial_{yy} E_\parallel + \partial_{xx} E_\parallel = 0$

имеет линейное решение, удовлетворяющее граничным условиям

$$E_\parallel = \frac{E_{\parallel 0}}{D} y,\ H_\perp = \frac{H_{\perp 0}}{D} y.$$

Поэтому $E_{\parallel 1} = E_{\parallel 0}\dfrac{D_1}{D}$, $H_{\perp 1} = H_{\perp 0}\dfrac{D_1}{D}$.

Несмотря на то, что внешняя задача 2 (рис. 2, *б*) на периоде сетки для $E_\parallel$ и $H_\perp$ существенно двумерна, характерные значения можно получить решив одномерную модельную задачу на оси y ($x = 0$), предположив малые боковые потери ($\partial_{xx} E_\parallel = 0$).

Тогда $\partial_{yy} E_\parallel = 0$ с граничными условиями при $y = 0$,

$$\partial_y E_\parallel = \frac{2\sqrt{2}}{d} E_\parallel;$$

при $y = D_1$ напряженность электрического поля $E_\parallel = E_{\parallel 1}$.

Находим решение в виде $E_\parallel = A + B$: при $y = D_1$ напряженность $E_{\parallel 1} = A + BD_1$, при $y = 0$ величина

$$B = \frac{2\sqrt{2}}{d} A.$$

Тогда

$$A = \frac{E_1}{1 + \dfrac{2\sqrt{2}D_1}{d}},\ B = \frac{E_{\parallel 1}}{\dfrac{d}{2\sqrt{2}} + D_1};$$

$$E_{\parallel 2} = A \approx \frac{d}{2\sqrt{2}D_1} E_{\parallel 1}.$$

В другом варианте, если учесть боковые потери как

$\partial_{xx} E_\parallel = -\dfrac{1}{D_1^2} E_\parallel$, то получим $\partial_{yy} E_\parallel = \dfrac{E_\parallel}{D_1^2}$, $E_\parallel = A e^{yl D_1} + B e^{-elD_1}$;

при $y = D_1$ имеем $Ae + Be^{(-l)} = E_{\parallel 1}$,
а при $y = 0$ получаем $A + B = E_{\parallel 2} << E_{\parallel 1}$,

или $\dfrac{A}{D_1} - \dfrac{B}{D_1} = \dfrac{2\sqrt{2}}{d}(A + B)$.

Тогда $A \cong -B$; $E_{\parallel 2} = \dfrac{d}{2\sqrt{2}D} E_{\parallel 1} \dfrac{2}{e - e^{-1}} = 0.86 \dfrac{d}{2\sqrt{2}D_1} E_{\parallel 1}$. ➤

Рисунок 1
Внешний вид модельного экрана: D_1 – период решетки; d – размер отверстий; L – толщина экрана; D – общий размер экрана

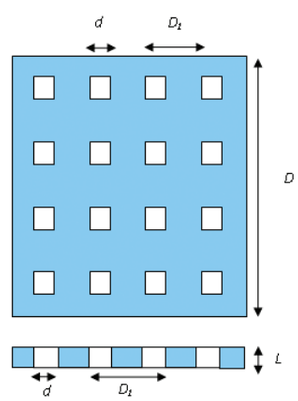
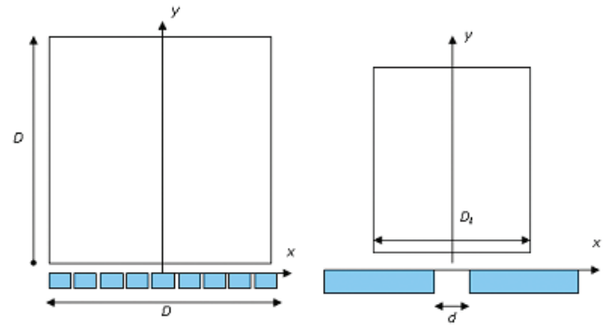


Рисунок 2
Внешняя область: а – внешняя задача в масштабе D; б – внешняя задача в масштабе D_1



а) б)

Рисунок 3
Проникновение полей через щель

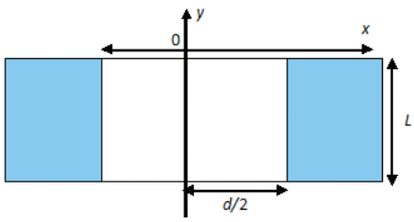
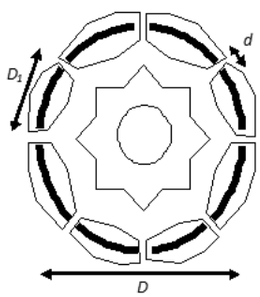


Рисунок 4
Изолинии напряженности электрического поля в сечении кабеля



➤➤ Необходимо отметить, что в постановке одномерной задачи с потерями необходимо тщательно выбирать положение внешней границы, пользуясь эффективной диффузной длиной для различных геометрий, иначе результат оценок может значительно отличаться от двумерных расчетов.

Для проведения дальнейших расчетов будем считать, что

$$E_{\|2} = \frac{d}{2\sqrt{2}D_1} E_{II1} = \frac{d}{2\sqrt{2}D} E_{\|0}; \qquad (1)$$

$$H_{\perp 2} = \frac{d}{2\sqrt{2}D_1} H_1 = \frac{d}{2\sqrt{2}D} H_0. \qquad (2)$$

Поиск решения задачи о прохождении ЭМП через щель. Рассмотрим решение, представленное на рис. 3, с граничными условиями:

при $y = 0$ $\quad E_{\|} = E_2,\ E_{\perp} = E_2;$
при $y = -L$ $\quad \partial_x E_{\|}, E_{\perp} = 0;$
при $x = \pm d/2$ $\quad \partial_x E_{\|}, E_{\perp} = 0.$

Так как $E_{\|}$ и $H_{\perp}$ не поглощаются стенками и проходят через отверстия практически без потерь, то считаем, что $E_{\|3} = E_{\|2}$ и $H_{\perp 3} = H_{\perp 2}$ с точностью расплывания входного профиля, т.е. не уменьшение амплитуды полей соответствует верхней оценке, которой следует придерживаться в задачах устойчивости.

В конечном итоге в зоне экранирования после проведенных алгебраических преобразований верхняя оценка для ЭМП имеет вид:

$$\frac{E_{\|5}}{E_{\|0}} = k_{\|}^{E} = \frac{d^2}{8DD_1}; \frac{E_{\perp 5}}{E_{\perp 0}} = k_{\perp}^{E} = \frac{d}{2\sqrt{2}D_1} e^{\frac{-2\sqrt{2}}{d}L};$$

$$\frac{H_{\|5}}{H_{\|0}} = k_{\|}^{H} = \frac{d}{2\sqrt{2}D_1} e^{\frac{-2\sqrt{2}}{d}L}; \frac{H_{\perp 5}}{H_{\perp 0}} = k_{\perp}^{H} = \frac{d^2}{8DD_1}. \qquad (3)$$

Заметим, что проникающие продольные магнитные поля и поперечные электрические очень чувствительны к толщине экрана L. Кроме того, необходимо отметить, что полученные оценки значительно отличаются от решения модельной задачи об отверстии в бесконечном экране в дипольном приближении. В рассматриваемой постановке весь экран с масштабом D является эффективным диполем и электромагнитная обстановка становится жестче. Так же или с привлечением двухмерного численного моделирования могут быть решены частные задачи, связанные с затеканием СВЧ-полей $\lambda < D$.

Оценка электромагнитных помех в кабельных линиях, защищенных сетчатым экраном. Рассмотрим прямые электромагнитные помехи в кабелях, защищенных сетчатым экраном. При этом полагаем, что для двужильных линий «земля» оплетки разнесена с «землей» линии, занос полей через материал экрана мал. Токи, возникающие в информационных сетях за счет гальванических соединений с экранами, рассматривать не будем. Считаем, что проводящие жилы слабо влияют на распространение ЭМП по сечению кабеля. Несмотря на то, что данное предположение достаточно грубо и не может быть использовано для точных расчетов, при верхней оценке наводок можно учитывать нулевую толщину жилы и нулевое сопротивление.

Помехи от продольных электрических полей можно оценить по результатам, полученным для плоского экрана. Эти задачи в масштабе сетки D_1 идентичны, а полная внешняя задача дает тот же масштаб приповерхностных полей. Продольное электрическое поле внутри кабеля, исключая приэкранную область ($R - D_1 < r < R$, где R – радиус кабеля), представляет собой поле с постоянной напряженностью ($E_{\|вн}$ = const). Поэтому $\varepsilon / E_0 = E_{\|BH} / E_0 = k_{\|}^{E} = d^2 / 8DD_1$, где ε – удельная ЭДС; D – диаметр кабеля; D_1 – шаг оплетки; d – диаметр отверстий в оплетки. Характерный вид изолиний напряженности электрического поля в сечении кабеля представлен на рис. 4 [3].

Процессы перетеканий зарядов и зависимость от длительности фронта импульса $\tau_ф$ можно учесть введением дополнительного множителя

$$\varepsilon = k_{\|}^{E} / (1 + c\tau_ф / l),$$

где l – длина кабеля.

Продольные к оси кабеля магнитные поля имеют структуру подобную продольным электрическим полям (рис. 4), но другой коэффициент затекания. Для прямых линий наводки токов создают поперечные к оси кабеля магнитные поля, которые по отношению к поверхности кабеля могут быть локально как продольными, так и поперечными.

Как и в случае плоского экрана, можно выделить три характерные зоны: дальняя внешняя $r > D + D_1$, приповерхностная $D + D_1 > r > D - D_1$ и внутренняя $r < D - D_1$.

Рисунок 5
Расчетная геометрия для кабеля в однородном магнитном поле

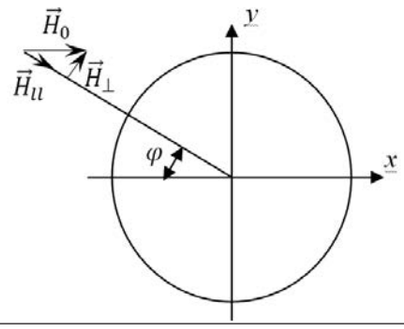
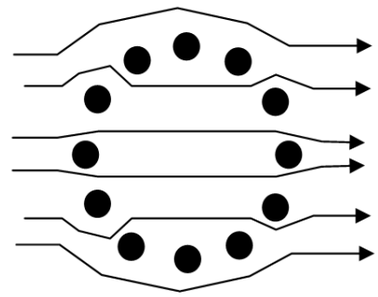


Рисунок 6
Дипольное магнитное поле в окрестности кабеля



Решения в дальней внешней и во внутренней областях имеют цилиндрическую симметрию до масштабов l (длина кабеля или его прямого отрезка). Несмотря на то, что решение в приповерхностной зоне трехмерно, при $D_1 << D$ можно воспользоваться плоским приближением.

В цилиндрических координатах уравнение Лапласа имеет следующие собственные моды [3]:

$$\Delta\vec{H} = 0 = \frac{1}{r^2}\partial^2_{\varphi\varphi}\vec{H} + \frac{1}{r}\partial_r r\partial_r\vec{H};$$
$$\vec{H} = \vec{H}_1 \ln r + \vec{H}_2 + \sum_{k=1}^{\infty}(\vec{H}_{3k}r^k + \vec{H}_{4k}r^{-k})\cos(\mathrm{k}\,\varphi + \varphi_k), \quad (4)$$

соответствующие (k – 1) полным приближениям.

Рассмотрим задачу, в которой кабель находится в однородном по пространству магнитном поле, т.е. вдали от кабеля (рис. 5). Внешнее решение $\vec{H} = (H_x, H_y)$ определяется граничными условиями: $\vec{H} = H_x\vec{e}_x + H_y\vec{e}_y$.

При $r = \infty$ решение $\vec{H} = (H_0, 0)$, при $r = R + D_1$:

$$H_x = H_{\|}\sin\varphi + H_\perp\cos\varphi;$$
$$H_y = H_{\|}\cos\varphi + H_\perp\sin\varphi;$$
$$H_{\|} = H_\perp\sin\varphi;$$
$$H_\perp = k_{\perp 1}H_\perp\cos\varphi,\ k_{\perp 1} = \frac{d}{2\sqrt{2}D},$$

где $k_{\perp 1}$ – нормировочный множитель.

Решая (4), получим

$$H_\perp = H_0(2/(1 + k_1));$$
$$H_x = H_0 - H_0\left(R^2/r^2\right)[(1-\mathrm{k}_{\perp 1})/(1+\mathrm{k}_{\perp 1})]\cos 2\varphi;$$
$$H_y = H_0\left(R^2/r^2\right)[(1-\mathrm{k}_{\perp 1})/(1+\mathrm{k}_{\perp 1})]\sin 2\varphi.$$

С учетом прохождения через приповерхностную область, при $r = R - D_1$ внутреннее решение удовлетворяет следующим граничным условиям:

$$H_{\|} = H_0(2k_{\|}/(1+k_{\perp 1}))\sin\varphi;$$
$$H_\perp = H_0(2k_{\perp 2}k_{\perp 1}/(1+k_{\perp 1}))\cos\varphi;$$
$$H_x = [2H_0/(1+k_{\perp 1})](k_{\|} + (k_{\perp 1}k_{\perp 2} - k_{\|})\cos 2\varphi);$$
$$H_y = [H_0/(1+k_{\perp 1})](k_{\|} - k_{\perp 1}k_{\perp 2})\sin 2\varphi.$$

В итоге решение принимает вид:

$$H_x = H_0[(k_\perp + k_{\|})/(1+k_{\perp 1})] + H_0(R^2/r^2)[(k_\perp - k_{\|})/(1+k_{\perp 1})]\cos 2\varphi; \quad (5)$$
$$H_y = H_0(R^2/r^2)[(k_{\|} - k_\perp)/(1+k_{\perp 1})]\sin 2\varphi. \quad (6)$$

На рис. 6 представлен общий вид магнитных полей в окрестности кабеля. Полное магнитное поле состоит из однородного внешнего поля и поля диполя от токов в оплетке кабеля. Оценим прямые магнитные наводки в кабельных линиях. Считаем, что поля в сечении кабеля определяются только затеканием извне. Исходя из этих полей, определим наводки в цепях кабеля.

Сделав необходимые преобразования, окончательно запишем:

$$\varepsilon = dU/dz = E_{\|};$$
$$\mathrm{rot}\vec{E} = A^{-1}\frac{\partial}{\partial t}\vec{B};\ \vec{B} = \mu\vec{H};$$
$$\vec{E} = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int L\left[\vec{H}, d\vec{r}\right],$$

где ε – удельная ЭДС; U – перепад напряжения в цепи; z – расстояние по оси кабеля (меняется в зависимости от длины кабеля); L – контур между жилами. Заметим, что выражение для $\vec{E}$ вытекает из дифференциального представления выражения для rot $\vec{E}$ после интегрирования по поверхности, натянутой на контур.

Сначала рассмотрим однопроводную линию, для которой обратная связь осуществляется по оплетке. Так как возможные рамки между проводом и оплеткой распределены, то необходимо провести усреднение по углу

$$\vec{E} = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int_{\varphi}^{\infty}\int_{L}^{\infty}\frac{\left[\vec{H}, d\vec{r}\right]}{2\pi}d\varphi.$$

Для осесимметричного расположения жил (коаксиальный кабель) наводки определяются членами второго порядка малости, описывающими асимметрию в изготовлении кабеля и неоднородности внешнего поля

$$k_0\frac{dH}{dx} \text{ или } H_0\frac{dk}{dx},$$

Рисунок 7
Выбор контуров для расчета наводок в кабельных линиях

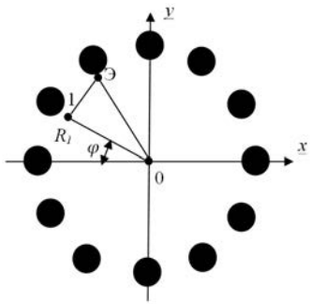
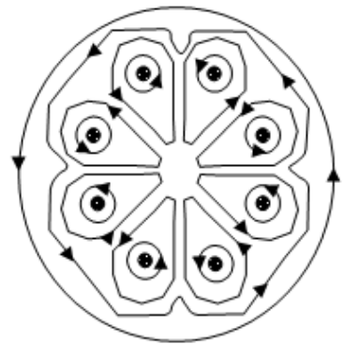


Рисунок 8
Магнитные поля от тока по оплетке кабеля



➤➤ где k – коэффициент проникновения через оплетку. Однако в инженерных расчетах из-за общей симметрии принимают, что наводки для осесимметричного расположения жил нулевые, т.е. $E_{0э} = 0$. Для осенесимметричного расположения отдельной жилы задача решается также как и для двух проводов, один из которых осевой. Поверхность, натянутую на рамки, можно выбрать произвольно (см. рис. 7, где плоскость контура ортогональна плоскости рисунка).

Интегральный поток через рамки «провод 1 – экран» равен сумме потоков «провод 0 – экран» и «провод 0 – провод 1»:

$$\varepsilon_{1э} = \varepsilon_{0э} = \varepsilon_{10} = E_{0э} + E_{10} = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int L_{1э}\left[\vec{H}, d\vec{r}\right] =$$

$$= -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int L_{10}\left[\vec{H}, d\vec{r}\right] + \int L_{1э}\left[\vec{H}, d\vec{r}\right] = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int L_{1э}\left[\vec{H}, d\vec{r}\right].$$

Подставляя полученное ранее решение для $\vec{H}$ внутри кабеля (5), (6), вычислим

$$\varepsilon_{1э} = \varepsilon_{10} = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int_0^{R_1}\left(H_x dr_y - H_y dr_x\right) \text{ или}$$

$$\varepsilon_{1э} = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\int_0^{R_1}\left(H_x \sin\varphi + H_y \cos\varphi\right) dr,$$

где H_x и H_y определяются исходя из выражений (5) и (6), соответственно. Тогда

$$\varepsilon_{1э} = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\frac{H_0(t)}{1+k_1} R_1\left[\left(k_\perp + k_\parallel\right) + \left(k_\parallel - k_\perp\right) R_1^2 / 3R^2\right]\sin\varphi.$$

Аналогичные вычисления приведут к оценке наводок для произвольной двухпроводной линии:

$$\varepsilon_{12} = -\frac{\mu}{c}\frac{\partial}{\partial t}\frac{H_0(t)}{1+k_{\perp 1}}\left\{\begin{array}{l} R_1\left[\left(k_\perp + k_\parallel\right) + \dfrac{\left(k_\parallel - k_\perp\right)R_1^2}{3R^2}\right] sin\varphi_1 - \\ -R_2\left[\left(k_\perp + k_\parallel\right) + \dfrac{\left(k_\parallel - k_\perp\right)R_1^2}{3R^2}\right] sin\varphi_2 \end{array}\right\};$$

$$k_{\perp 1} = \frac{d}{2\sqrt{2}D}, k_\perp = k_\perp^H = d^2 / 8DD_1;$$

$$k_{II} = k_\parallel^H = \frac{d}{2\sqrt{2}D_1} e^{-\frac{2\sqrt{2}}{d}L},$$

где d – диаметр отверстий; D – шаг сетки; L – глубина защитного экрана; $D_1 = 2R$ – диаметр кабеля; R_1, R_2, φ_1, φ_2 – координаты жил линии.

Физический смысл полученного выражения заключается в следующем. Наводки в экранированных линиях пропорциональны внешнему магнитному полю H_0, трансформированному магнитным диполем экрана, и проекции «заметаемой» проводами площади. Причем магнитное поле затекает (проникает) как через переднюю часть экрана, так и через боковые поверхности сечения кабеля.

Оценим магнитные наводки от токов по оплетке в кабельных линиях (рис. 8). Вне оплетки основной является мода (5), (6):

$$\vec{H} = H_0(-\sin\varphi\,\vec{e}_x + \cos\varphi\,\vec{e}_y).$$

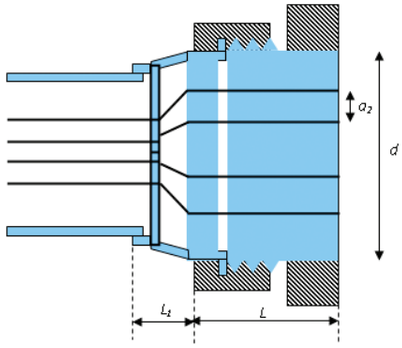
В области под оплеткой происходит заполнение по модам с волновыми числами от $k_2 = D/d_1$ до $k_1 = D/D_1$, где D – диаметр кабеля; d_1 – диаметр отверстий; D_1 – шаг сетки. В масштабе D_1 ($D - D_1 < D$) более высокие моды убывают быстрее, и выделяется нижняя мода, соответствующая шагу оплетки ($k_1 = D / D_1$). Она – основная во внутреннем заполнении ($r \le D - D_1$). Общее решение (внутри) будет иметь вид:

$$H_\varphi = H_0 k_{II}\left(r / R\right)^{k_1}\cos\left(k_1\varphi + \varphi_{k_1}\right).$$

Таким образом, можно сделать следующие выводы. Поскольку $k_1 = D / D_1 \approx 10$, то магнитные поля быстро убывают к оси. Существенные наводки от них возможны лишь для жил, расположенных в приэкранной области ($r > D - D_1$). При этом оценивать такие наводки следует путем решения плоской задачи.

Оценка помех в области разъемов кабелей, защищенных сетчатым экраном. Как правило, при экранировании электрических линий связи разъемы являются одними из главных источников паразитных электромагнитных наводок. Связано это с тем, что обычно полиэтиленовые крышки входных и выходных разъемов выполняют из диэлектрических материалов, прозрачных для ЭМП.

Рисунок 9
Сечение типового разъема



Для оценки электромагнитных наводок будем считать, что магнитное поле в области входной крышки равно H_0, а в области керамической части самого разъема – убывающим по экспоненте. В этом случае помеха может быть описана как

$$\varepsilon = \int_0^{L+L_1} \frac{\mu}{c} \frac{\partial H_0(t,x)}{\partial t} a(x)\,dx,$$

где $a(x)$ – расстояние между линиями.

После учета геометрических особенностей запишем:

$$\varepsilon = \frac{\mu}{c}\frac{\pi H_0}{2\tau_D}\left(L_1 \frac{a_1+a_2}{2} + a_2 \int_0^{L_1} \exp\left(-\frac{2\sqrt{2}x}{d}\right)dx\right);$$

$$\varepsilon = \frac{\mu}{c}\frac{\pi H_0}{2\tau_D}\left(L_1 \frac{a_1+a_2}{2} + \frac{a_2 d}{2\sqrt{2}}\left(1-\exp\frac{2\sqrt{2}L}{d}\right)\right),$$

где a_1 и a_2 – расстояние между проводами в кабеле и разъеме; d – диаметр разъема; L – толщина соединительного керамического элемента (рис. 9) [3].

Для численных (инженерных) расчетов удобно пользоваться выражением:

$$\varepsilon = 2\times10^{-2}\frac{H_0[A/м]}{\tau_\phi[A]}\left(L_1 \frac{a_1+a_2}{2} + \frac{a_2 d}{2\sqrt{2}}\left(1-\exp\frac{2\sqrt{2}L}{d}\right)\right), B,$$

где L, L_1, a_1, a_2 измеряются в сантиметрах. Например, для случая $\tau_ф = 10^{-8}$ с, $H_0 = 100$ А/м, $L_1 = 3$ см, $a_1 = 0{,}1$ см, $a_2 = 0{,}3$ см, $L = 3$ см, $d = 6$ см наводка $\varepsilon = 3{,}3$ В.

Оценка помех при самоэкранировании пучка линий. Если в кабеле используется плотный пучок линий, то внешние провода можно рассматривать как своеобразный экран. В этом случае для внутренних линий пучок обладает свойством самоэкранирования [4].

Как известно, уровень наводок определяется диффузным проникновением полей. Коэффициент экранировки пучком линий для коротких импульсов или высоких частот в отсутствие прямого затекания через металлические элементы оценивается как:

$$K^H = \exp\frac{-2\sqrt{2}R_{эф}}{d},$$

где d – расстояние между линиями; $R_{эф} \cong (R-r)$ – эффективная глубина диффузии; R – радиус кабеля; r – положение линии. При $R_{эф} \cong d$ коэффициент экранирования $k_H = 0{,}05$.

В таблице представлены оценки удельных наводок в типовых кабельных линиях с различными уровнями экранировки, полученные экспериментальным и расчетным путем по изложенной выше методике [3].

Наводки в типовых кабельных линиях с различными уровнями экранировки

Тип кабеля	Кабель без экранирования разъемов		Кабель с дополнительным экранированием разъемов	
	K_E, В/(кВ/м)	K_H, В/(А/м)	K_E, В/(кВ/м)	K_H, В/(А/м)
Неэкранированный U/FTP	0,31/0,3	0,15/0,15	0,31/0,3	0,15/0,15
В общем экране S/UTP	0,03/0,025	0,03/0,029	$7\cdot10^{-4}$/8×10-3	0,015/0,014
Витая пара в экране S/FTP	0,017/0,015	0,015/0,015	$7\cdot10^{-4}$/6×10-3	$4\cdot10^{-3}$/3,5×10^{-3}
Примечание: эксперимент/расчет.				

В расчетах рассматривался кабель с двухпроводными линиями и двумя разъемами. Эксперимент проводился на частоте 600 МГц для кабелей: U/FTP – четыре пары, категория 6а, 19C-TA-23WT-R500; S/UTP – общий экран из сетчатой оплетки, четыре пары неэкранированные, категория 6а, 19C-SA-23WT-R500; S/FTP – общий экран из сетчатой оплетки, каждая витая пара в экране из фольги (9T7L4-E6, четыре пары, кабель категории 7).

Для лучшего согласования с экспериментом внешние характеристики нормировались по неэкранированной линии. Характеристики кабеля: соотношения оплетки $d/D_1 = 2/3$, $d/D = 1/30$, $L/d = 1/3$; длина повива – 7 см, длина разъема – 3 см, среднее расстояние между линиями в разъеме – 0,25 см; $k_E = \varepsilon/E_0$, $k_H = \varepsilon/H_0$, где ε – наведенная ЭДС; E_0, H_0 – воздействующие ЭМП. Из таблицы видно хорошее совпадение расчетных и экспериментальных данных.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведена оценка внешних помех в информационных экранированных кабельных линиях на основе витой пары при защите кабельных систем с помощью сеточных экранов. Полученные простые физические соотношения для определения периода повива жил и коэффициентов затекания через сеточные экраны позволяют оценить наводки в сетях с учетом всех характерных размеров структуры и прокладки кабельных линий. Результаты экспериментальных данных и теоретических расчетов показали хорошее совпадение. С помощью приведенных расчетных соотношений можно определить условия эксплуатации экранированных электрических каналов кабельных систем на стадии проектирования. ➤

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Артюшенко В.М., Малёнкин А.В.** Количественная оценка электромагнитного влияния однопроводных линий электротехнического оборудования // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2008. – №1. – Т.4. – С. 29 – 32.
2. **Говорков В.А., Куполян С.Д.** Теория электромагнитного поля в упражнениях и задачах. – М.: Высшая школа, 1979. – 301 с.
3. **Медведев А.А., Меньшиков В.А., Силантьев А.Ю.** Стохастическое дифференциальное моделирование сложных технических систем. – Новосибирск: Наука, 1999. – 324 с.
4. **Артюшенко В.М., Аббасова Т.С.** Расчет и проектирование мультисервисных кабельных систем в условиях мешающих электромагнитных воздействий: учебное пособие. – Королев: ГБОУ ВПО ФТА, 2012. – 262 с.

Получено 23.10.14

Модель функционирования «смартлинк соединения»

В.С. Никитин, директор ООО «НТЦ «Интрофизика», к.т.н.; 505z@mail.ru
Э.И. Семенов, профессор ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва», д.т.н.; e.i.semenov@mail.ru
А.Н. Ломанов, декан факультета радиоэлектроники и информатики ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва», к.т.н.; lepss@yandex.ru
А. В. Солостин, заместитель директора ООО «НТЦ «Интрофизика»; 21solo@mail.ru
В.Г. Шаров, проректор ФГБОУ ВПО «РГАТУ им. П.А. Соловьёва», к.ф.- м.н.; sharov@rsatu.ru
С.В. Чайка, программист ООО «НТЦ «Интрофизика»; chaika_sv@mail.ru

УДК 621.391.63

Аннотация. *Математическая модель «смартлинк соединения» дополнена в части моделирования прохождения сигналов по физическим каналам, учтено «размытие» сигналов, а также несколько видов потерь интенсивности сигналов при их прохождении по световодам. На основании построенной математической модели разработано программное обеспечение (ПО), реализующее и моделирующее функции коммутации каналов и самовосстановления соединения. В ходе проведения экспериментов с использованием разработанного ПО были изучены свойства самовосстановления «смартлинк соединений», а также получены оптимальные характеристики для изготовления оптических делителей сигналов.*

Ключевые слова: *оптоволоконные соединения, математическое моделирование, программное моделирование, источник сигналов, приемник сигналов, делитель сигналов.*

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы все большее внимание при проектировании высокопроизводительных вычислительных систем (сложных микросхем, многопроцессорных суперкомпьютерных систем) уделяется организации межсоединений [1–3]. Межсоединения определяют организацию обмена информацией между узлами сети и могут быть описаны такими характеристиками, как физическая среда, топология сети, используемые протоколы передачи данных (ПД). Если говорить о физической среде, то одним из перспективных направлений развития межсоединений являются многоканальные оптоволоконные соединения (ОС).

Основная причина, по которой ОС до сих пор не получили массового распространения, – сложность монтажа. Важно, чтобы при монтаже была выполнена строгая юстировка компонентов ОС (источника и приемника сигнала, а также оптического канала) друг относительно друга. Процедура юстировки и монтажа требует высокоточного, дорогостоящего оборудования. Кроме того, ОС не обладает достаточной устойчивостью к внешним воздействиям: смещение компонентов друг относительно друга, а также чрезмерный излом оптоволокна могут привести к трудно восстановимому нарушению связи. Если говорить о многоканальных ОС, то увеличение количества каналов ведет не только к росту производительности соединения, но и к усложнению его монтажа.

Наиболее распространенные сегодня многоканальные ОС – это активные оптические кабели и высокоплотные параллельные ОС. Разработчики таких соединений решают в основном технологические проблемы высокоточного монтажа, стремясь разместить как можно больше каналов в корпусах небольших размеров.

Возможным альтернативным решением проблемы построения многоканальных ОС является технология ПД по интеллектуальному многоканальному ОС (ИМКС) [4]. В статье приводятся результаты исследования системы ПД – «смартлинк соединения», построенной на основе предложенной технологии.