

УДК 621.391.82; 004.3

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ
В НЕЭКРАНИРОВАННОЙ ВИТОЙ ПАРЕ ПРИ ВНЕШНИХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

З. М. Гизатуллин, Р. М. Гизатуллин, М. С. Шкиндеров, М. Г. Нуриев, Р. И. Салимов
Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А. Н. Туполева - КАИ

Статья поступила в редакцию 21 ноября 2016 г.

Аннотация. К компьютерным сетям предъявляются требования по надежности, безопасности, своевременности и достоверности передачи информации, без которых невозможна эффективная управленческая и производственная деятельность. В работе рассмотрена проблема помехоустойчивости компьютерных сетей на основе неэкранированной витой пары при воздействии внешних электромагнитных полей. Эффективным решением проблемы помехоустойчивости компьютерных сетей является ее учет на этапе разработки и внедрения. Решение о необходимости повышения помехоустойчивости компьютерных сетей при воздействии помех формируются на основе результатов моделирования. Предложены математические модели для анализа электромагнитных помех в неэкранированной витой паре при воздействии электромагнитного поля в дальней зоне. Определены ограничения математических моделей. Приведены результаты моделирования электромагнитных помех, которые используются для решения задачи прогнозирования помехоустойчивости компьютерных сетей. Предложена методика для анализа помехоустойчивости компьютерных сетей. Представлены результаты исследований.

Ключевые слова: компьютерная сеть, помехоустойчивость, электромагнитная помеха, неэкранированная витая пара, математическая модель, методика, моделирование.

Abstract. Computer networks must meet certain requirements in terms of reliability, security, timeliness and reliability of the transmission of information, without which there is no effective management and production activities. The problem of effects of external electromagnetic interference on computer networks based on UTP is considered in the article. An effective solution to the problem of noise immunity the computer networks is its accounting at the development and introduction. The decision about the necessity to improve the noise immunity of computer networks under the influence of electromagnetic interference is formulated on the based on the simulation results. Mathematical models for analysis of electromagnetic interference in the unshielded twisted pair under the influence of external electromagnetic field in the far-field region are suggested in this project. Limits of mathematical models are defined. Simulation results of electromagnetic interference are used to the solution of the problem the noise immunity problem analysis computer networks. A theoretical technique for the analysis of noise immunity of computer networks is proposed. The results of the study are presented.

Key words: computer networks, noise immunity, electromagnetic interference, unshielded twisted pair, mathematical model, technique, simulation.

Введение

Важным аспектом качественного обслуживания информационных процессов общества связано с использованием современных компьютерных сетей (КС), в частности технологий проводных сетей Ethernet. Данное обстоятельство предъявляет повышенные требования к надежности, безопасности и своевременности передачи информации, без которых невозможна эффективная управленческая, производственная и другие виды деятельности. В реальных условиях эксплуатации часто происходит снижение качества функционирования КС, т.е. нарушение совокупности свойств и параметров, характеризующих ее работоспособность при воздействии внешних электромагнитных помех. Интенсивность непреднамеренных электромагнитных помех связано с наличием естественных источников или с

существенным увеличением количества и мощности электронных, радиотехнических и промышленных источников (задача помехоустойчивости) [1]. Преднамеренные источники помех появляются в связи с обострением конкурентных экономических отношений, с целью целенаправленного уничтожения или блокирования информации в результате искажения электрических сигналов (задача защиты информации) [2]. При этом, вне зависимости от механизма возникновения электромагнитных помех, они могут привести к существенному снижению качества функционирования КС [3, 4].

Анализ представленных в литературе результатов исследований показывает, что наблюдается недостаток работ направленных на комплексное рассмотрение количественных или качественных параметров функционирования сетей в условиях воздействия электромагнитных помех, т.е. выявление уровня электромагнитных помех и анализ снижения производительности КС. Например, в работах [5, 6, 7] выявлены уровни напряженности импульсного электрического поля, способные привести к нарушению функционирования вычислительных сетей, но отсутствуют промежуточные данные о величине электромагнитных помех и возможном снижении производительности сетей. При этом рассматриваются воздействие сверхкоротких электромагнитных импульсов и практически отсутствуют качественные и количественные исследования воздействия промышленных гармонических помех [8]. При этом преднамеренные источники помех возникают по осознанной инициативе людей, что не всегда позволяет проводить количественную оценку при помощи вероятностных методик [9, 10, 11].

Основной объединяющей средой КС является структурированная кабельная система. Основным принципом структурированной кабельной системы является интеграция вычислительных, телефонных и других коммуникационных сетей в едином кабельном пространстве, объединяя тем самым всё оборудование в здании в концепцию «интеллектуального здания» [12]. Структурированная кабельная система создается в расчете на длительную

перспективу и исключает необходимость прокладки дополнительных кабелей при изменении требований к системе коммуникаций при подключении нового и перемещении существующего эксплуатируемого оборудования. При этом, с точки зрения помехоустойчивости и защиты информации (отсутствия физического искажения, блокирования или уничтожения информации [2]), на практике, доступ к оборудованию ничем не ограничен. По своим электрофизическим и геометрическим параметрам элементы структурированной кабельной системы зданий являются одними из наиболее опасных «приемников» и «переносчиков» электромагнитных помех в КС. Современные структурированные кабельные системы допускают использование следующих типов кабелей: неэкранированная витая пара; экранированная витая пара; фольгированная витая пара; оптоволоконный кабель. По некоторым данным [12], в России процент использования неэкранированной витой пары достигает 85-90%.

Цель данной работы – моделирование электромагнитных помех в неэкранированной витой паре при внешних электромагнитных воздействиях и прогнозирование качества функционирования КС при их воздействии.

1. Математические модели для анализа электромагнитных помех в неэкранированной витой

Для анализа электромагнитных помех в неэкранированной витой паре, ее конструкция может быть представлена периодической структурой в виде бифилярной спирали скрученной относительно средней линии (рис. 1) [13, 14].

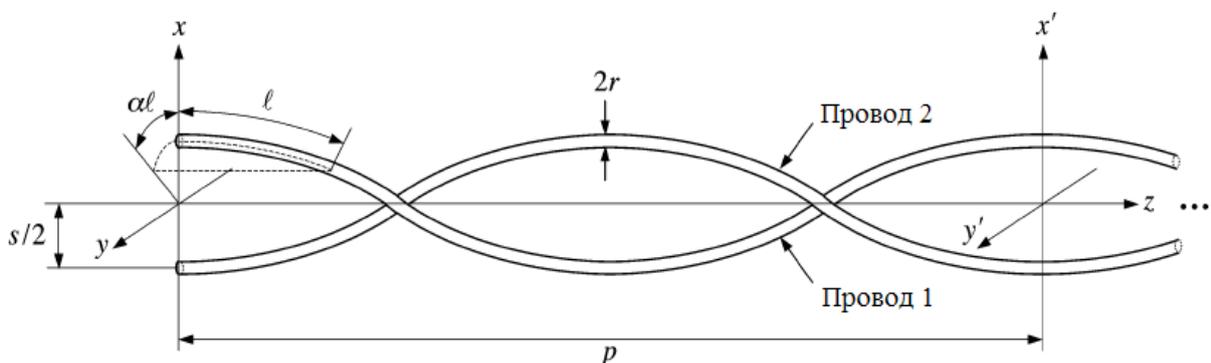


Рис. 1. Конструкция неэкранированной витой пары

Координаты точек $a(l)$, $b(l)$ внутри проводников витой пары

определяются следующим образом:

$$x_1(l) = \frac{s}{2} \cos(\alpha \cdot l), \quad y_1(l) = \frac{s}{2} \sin(\alpha \cdot l), \quad z_1(l) = \frac{p \cdot \alpha \cdot l}{2 \cdot \pi},$$

$$x_2(l) = -\frac{s}{2} \cos(\alpha \cdot l), \quad y_2(l) = -\frac{s}{2} \sin(\alpha \cdot l), \quad z_2(l) = \frac{p \cdot \alpha \cdot l}{2 \cdot \pi}.$$

Где l – длина дуги; s – расстояние между осями проводников витой пары (провод 1 и 2 одинаковы); p – шаг скрутки проводников витой пары; α – коэффициент скрутки, который определяется следующим образом:

$$\alpha = \left(\sqrt{\left(\frac{s}{2}\right)^2 + \left(\frac{p}{2\pi}\right)^2} \right)^{-1}.$$

Единичные векторы $l_1(l)$ и $l_2(l)$ направлены по касательной к проводникам 1 и 2, соответственно, в точках $a(l)$ и $b(l)$ (рис. 3).

$$l_1(l) = -\frac{s \cdot \alpha}{2} \sin(\alpha \cdot l) a_x + \frac{s \cdot \alpha}{2} \cos(\alpha \cdot l) a_y + \frac{\alpha \cdot p}{2\pi} a_z,$$

$$l_2(l) = \frac{s \cdot \alpha}{2} \sin(\alpha \cdot l) a_x - \frac{s \cdot \alpha}{2} \cos(\alpha \cdot l) a_y + \frac{\alpha \cdot p}{2\pi} a_z.$$

Где a_x, a_y, a_z - проекции единичных векторов $l_1(l)$ и $l_2(l)$ на оси x, y, z , соответственно.

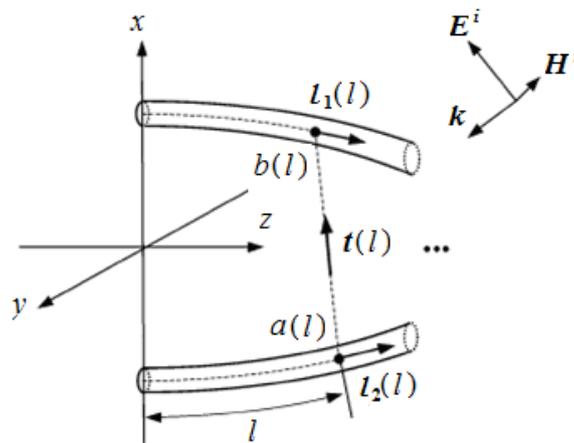


Рис. 2. Изменение координат проводников витой пары в плоскости x - y при изменении координат в направлении оси z

Для данного случая, уравнения линии передачи при воздействии внешних неоднородных электромагнитных полей можно записать в следующем виде

[15]:

$$\frac{d}{dl}V(l) = -ZI(l) + V_F(l), \quad Z = Z_i + j\omega L_e,$$

$$V_F(l) = -\frac{d}{dl} \int_{a(l)}^{b(l)} E^i(p, l) \cdot dp + E^i(x_1(l), y_1(l), z_1(l)) \cdot l_1(l) - \\ - E^i(x_2(l), y_2(l), z_2(l)) \cdot l_2(l),$$

$$\frac{d}{dl}I(l) = -YV(l) + I_F(l), \quad Y = G + j\omega C,$$

$$I_F(l) = -Y \int_{a(l)}^{b(l)} E^i(p, l) \cdot dp, \quad dp = t(l) \cdot d\rho, \quad t(l) = \cos(\alpha \cdot l) a_x + \sin(\alpha \cdot l) a_y.$$

Где ρ – цилиндрическая координата в радиальном направлении; $t(l)$ – единичный вектор направленный из точки $a(l)$ в точку $b(l)$; $E^i(x(l), y(l), z(l))$ – вектор электрической напряженности внешнего электромагнитного поля; $V(l)$ – напряжение между проводниками витой пары (положительное в точке $b(l)$, отрицательное в точке $a(l)$); $I(l)$ – ток в линии передачи; Z – полное сопротивление линии передачи на единицу длины; Z_i – активное сопротивление линии передачи на единицу длины; L_e – индуктивность линии передачи на единицу длины; Y – полная проводимость линии передачи на единицу длины; G – проводимость изоляции вокруг линии передачи на единицу длины; C – емкость линии передачи на единицу длины; $V_F(l)$ и $I_F(l)$ – распределенные зависимые источники напряжения и тока, соответственно.

Фактически, данные уравнения можно рассматривать как модификацию известных уравнений для однородной линии передачи, только в данном случае распределенные источники $V_F(l)$ и $I_F(l)$ учитывают винтовой характер линии передачи неэкранированной витой пары.

Рассмотрим ограничения данных уравнений:

1. Изоляция вокруг проводников линии передачи считается однородной диэлектрической средой. На практике, проводники витой пары покрыты тонким слоем изоляции. При этом его толщина всегда намного меньше наименьшей

длины волны воздействующего электромагнитного поля, поэтому можно считать ее однородным диэлектрическим слоем.

2. Индуктивность L_e и емкость C линии передачи на единицу длины считаются независимыми от положения по длине, так как, во-первых, расстояние между осями проводников линии передачи всегда остается неизменным в плоскости x - y , и, во-вторых, период скрутки линии передачи намного больше, чем расстояние между осями проводников витой пары ($p \gg s$). Данное предположение, дает возможность решения задачи для случая однородной линии передачи, а все первичные параметры линии передачи на единицу длины рассчитываются по известным формулам для двухпроводной цилиндрической линии передачи.

3. Минимальная длина волны воздействующего электромагнитного поля намного больше расстояния между осями проводников неэкранированной витой пары ($\lambda \gg s$).

4. Соотношение полной длины проводников неэкранированной витой пары L_Z к величине шага скрутки намного больше единицы ($\frac{L_Z}{p} \gg 1$).

Следующим шагом в решении данной задачи является введение нагрузочных цепей в линии передачи неэкранированной витой пары (рис. 3).

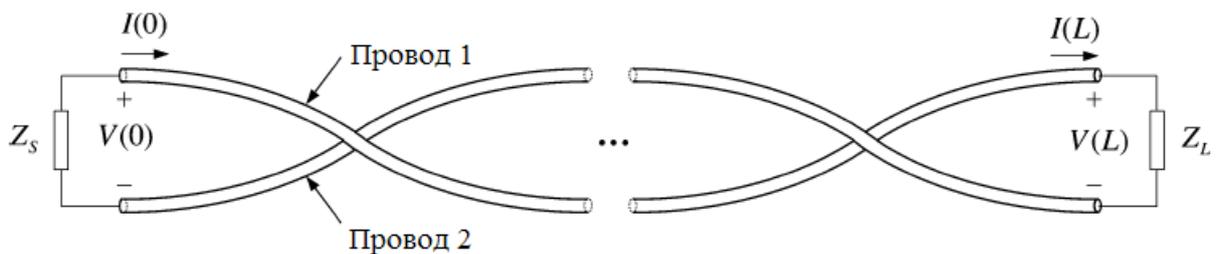


Рис. 3. Конфигурация неэкранированной витой пары с установленными нагрузочными цепями

В данном случае токи на нагрузках $I(0)$ и $I(L)$, соответственно, при $l=0$ и $l=L$ можно рассчитать с помощью следующих уравнений:

$$I(0) = \frac{1}{D} \int_0^L (\cosh(\gamma(L-l)) + \frac{Z_L}{Z_C} \sinh(\gamma(L-l))) \cdot \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \cdot \left[E^i(x_1, y_1, z_1) \cdot l_1(l) - E^i(x_2, y_2, z_2) \cdot l_2(l) \right] dl - \\ & - \frac{1}{D} \int_{a(l)}^{b(l)} E^i(\rho, l) \cdot d\rho \Big|_{l=L} + \frac{1}{D} \left[\cosh(\gamma \cdot L) + \frac{Z_L}{Z_C} \sinh(\gamma \cdot L) \right] \cdot \int_{a(l)}^{b(l)} E^i(\rho, l) \cdot d\rho \Big|_{l=0} \cdot \\ & I(L) = \frac{1}{D} \int_0^L \left(\cosh(\gamma \cdot l) + \frac{Z_S}{Z_C} \sinh(\gamma l) \right) \cdot \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \cdot \left[E^i(x_1, y_1, z_1) \cdot l_1(l) - E^i(x_2, y_2, z_2) \cdot l_2(l) \right] dl - \\ & - \frac{1}{D} \left[\cosh(\gamma \cdot L) + \frac{Z_S}{Z_C} \sinh(\gamma \cdot L) \right] \cdot \int_{a(l)}^{b(l)} E^i(\rho, l) \cdot d\rho \Big|_{l=L} + \frac{1}{D} \int_{a(l)}^{b(l)} E^i(\rho, l) \cdot d\rho \Big|_{l=0} \end{aligned}$$

где, $D = \cosh(\gamma \cdot L)(Z_S + Z_L) + \sinh(\gamma \cdot L)(Z_C + \frac{Z_S Z_L}{Z_C})$,

$$Z_C = \sqrt{(Z_i + j \cdot \omega \cdot L_e) / (G + j \cdot \omega \cdot C)}, \quad \gamma = \sqrt{(Z_i + j \cdot \omega \cdot L_e) \cdot (G + j \cdot \omega \cdot C)},$$

$$Z_i = \frac{2 \cdot R_s}{\pi \cdot d}, \quad R_s = \frac{1}{\sigma \cdot \delta_0}, \quad \delta_0 = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma}}, \quad G = 2 \cdot \pi \cdot C \cdot \tan \delta.$$

Где ω , λ – угловая частота и длина волны воздействующего электромагнитного поля, соответственно; μ – относительная магнитная проницаемость изоляции проводника; δ_0 – толщина скин-слоя проводника; σ – проводимость проводника на единицу длины; d – диаметр цилиндрического проводника витой пары; $\tan \delta$ – тангенс угла потерь изоляции проводника.

Действительные напряжения на нагрузках $V_d(0)$ и $V_d(L)$ вычисляются соответственно:

$$V_d(0) = \frac{|V(0)|}{\sqrt{2}} = \frac{|I(0) \cdot Z_S|}{\sqrt{2}}, \quad V_d(L) = \frac{|V(L)|}{\sqrt{2}} = \frac{|I(L) \cdot Z_L|}{\sqrt{2}}.$$

Где, соответственно, $V(0)$ и $V(L)$ расчетные комплексные напряжения на нагрузках Z_S и Z_L .

Уравнения (1,2) учитывают воздействующее электромагнитное поле в общем виде, т.е. оно может быть и неоднородным. Однако, для оценки влияния электромагнитного поля на линию передачи в виде неэкранированной витой пары, ограничимся случаем дальней зоны, где характерно постоянное

соотношение вектора напряженности электрического и магнитного полей, т.е. электромагнитное поле рассматривается в виде плоской электромагнитной волны распространяющейся в свободном пространстве (рис. 4).

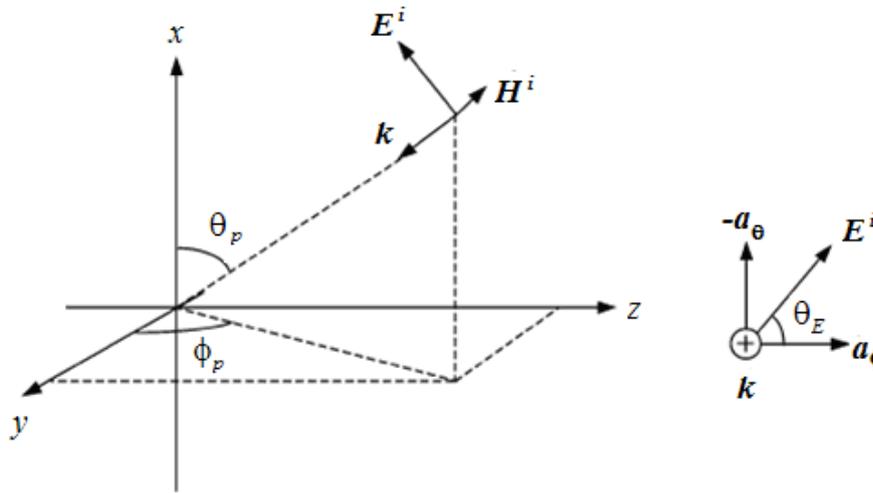


Рис. 4. Ориентация воздействующего электромагнитного поля

Для данного случая, воздействующее электромагнитное поле описывается следующим образом:

$$E^i(x, y, z) = E^i(e_x a_x + e_y a_y + e_z a_z) e^{-j(k_x x + k_y y + k_z z)}. \quad (3)$$

Где, $e_x = \sin(\theta_E) \sin(\theta_p)$, $e_y = -\sin(\theta_E) \cos(\theta_p) \cos(\phi_p) - \cos(\theta_E) \sin(\phi_p)$,

$e_z = -\sin(\theta_E) \cos(\theta_p) \sin(\phi_p) + \cos(\theta_E) \cos(\phi_p)$, $k_x = -k \cos(\theta_p)$,

$$k_y = -k \sin(\theta_p) \cos(\phi_p), \quad k_z = -k \sin(\theta_p) \sin(\phi_p), \quad k = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2 \cdot \pi}{\lambda}.$$

Где, c_0 – скорость света; θ_p , ϕ_p , θ_E – углы падения и поляризации воздействующего электромагнитного поля по отношению к линии передачи. Подставляя уравнение (3) в уравнения (1, 2) и учитывая ограничения, получаем более простые уравнения (4, 5) для решения задачи анализа электромагнитного воздействия в дальней зоне на неэкранированную витую пару:

$$I(0) \approx -\frac{E^i s}{2 \cdot D} [(\alpha \cdot e_x + j \cdot \kappa_y \cdot e_z)(F_+(L) + \frac{Z_L}{Z_C} F_-(L)) - (\alpha e_y - j \cdot \kappa_x e_z)(K_+(L) + \frac{Z_L}{Z_C} K_-(L)) + 2(e_x \cos(\alpha \cdot L) + \quad (4)$$

$$+ e_y \sin(\alpha \cdot L) e^{-j\kappa_z L} - 2 \cdot e_x (\cosh(\gamma \cdot L) + \frac{Z_L}{Z_C} \sinh(\gamma \cdot L)),$$

$$I(L) \approx -\frac{E^i s}{2 \cdot D} [(\alpha \cdot e_x + j \cdot \kappa_y \cdot e_z)(F_+^*(L) + \frac{Z_S}{Z_C} F_-^*(L)) - \dots \dots \dots] \quad (5)$$

$$- (\alpha e_y - j \cdot \kappa_x \cdot e_z) (K_+^*(L) + \frac{Z_S}{Z_C} K_-^*(L)) + 2(\cosh(\gamma \cdot L) + \frac{Z_S}{Z_C} \sinh(\gamma \cdot L))(e_x \cos(\alpha \cdot L) + e_y \sin(\alpha \cdot L)) e^{-j\kappa_z L} - 2 \cdot e_x].$$

Где, $F_{\pm}(L) = F_1(L) \pm F_2(L)$, $K_{\pm}(L) = K_1(L) \pm K_2(L)$,

$$F_{\pm}^*(L) = \pm F_1(L) e^{-\gamma \cdot L} + F_2(L) e^{\gamma \cdot L}, \quad K_{\pm}^*(L) = \pm K_1(L) e^{-\gamma \cdot L} + K_2(L) e^{\gamma \cdot L},$$

$$F_1(L) = \frac{\alpha \cdot e^{\gamma \cdot L} - (\alpha \cos(\alpha \cdot L) + (\gamma + j \cdot \kappa_z) \sin(\alpha \cdot L)) e^{-j \cdot \kappa_z \cdot L}}{(\gamma + j \cdot \kappa_z)^2 + \alpha^2},$$

$$F_2(L) = \frac{\alpha \cdot e^{-\gamma \cdot L} - (\alpha \cos(\alpha \cdot L) + (-\gamma + j \cdot \kappa_z) \sin(\alpha \cdot L)) e^{-j \cdot \kappa_z \cdot L}}{(\gamma - j \cdot \kappa_z)^2 + \alpha^2},$$

$$K_1(L) = \frac{(\gamma + j \cdot \kappa_z) e^{\gamma \cdot L} + (\alpha \cdot \sin(\alpha \cdot L) - (\gamma + j \cdot \kappa_z) \cos(\alpha \cdot L)) e^{-j \cdot \kappa_z \cdot L}}{(\gamma + j \cdot \kappa_z)^2 + \alpha^2},$$

$$K_2(L) = \frac{(-\gamma + j \cdot \kappa_z) e^{-\gamma \cdot L} + (\alpha \cdot \sin(\alpha \cdot L) + (\gamma - j \cdot \kappa_z) \cos(\alpha \cdot L)) e^{-j \cdot \kappa_z \cdot L}}{(\gamma - j \cdot \kappa_z)^2 + \alpha^2},$$

$$\kappa_x = \frac{k_x \alpha \cdot p}{2 \cdot \pi}, \quad \kappa_y = \frac{k_y \alpha \cdot p}{2 \cdot \pi}, \quad \kappa_z = \frac{k_z \alpha \cdot p}{2 \cdot \pi}.$$

Мощность рассеивания P на нагрузках Z_S , Z_L неэкранированной витой пары может быть вычислена с помощью следующих выражений:

$$P_S = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(Z_S \cdot |I(0)|^2), \quad P_L = \frac{1}{2} \operatorname{Re}(Z_L \cdot |I(L)|^2).$$

Для проверки предложенных математических моделей проведем сравнение расчетных результатов с имеющимися в литературе экспериментальными данными [13]. На рис. 5. представлены сравнительные результаты расчета мощности рассеивания на нагрузке Z_L при внешнем электромагнитном воздействии на неэкранированную витую пару.

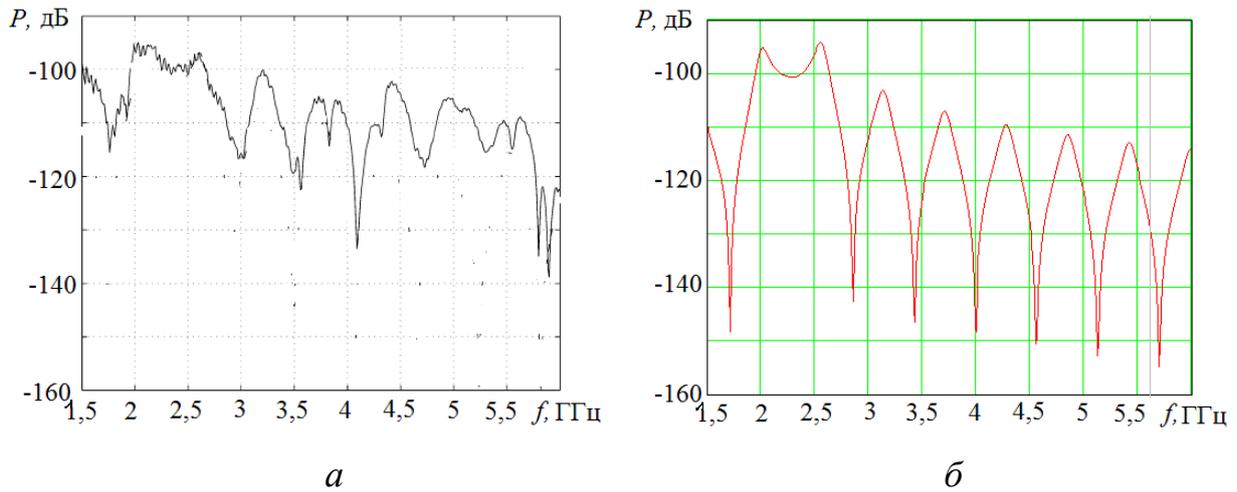


Рис. 5. Мощность рассеивания на нагрузке Z_L (a – эксперимент, b – моделирование) при внешнем электромагнитном воздействии (вектор напряженности электрического поля направлен по оси z)

2. Результаты моделирования электромагнитных помех

Рассмотрим электромагнитные помехи в неэкранированной витой паре при внешнем электромагнитном воздействии в дальней зоне. Параметры неэкранированной витой пары 5 категории: волновое сопротивление $Z_C = 100$ Ом; сопротивление нагрузки $Z_S = Z_L = 100$ Ом; шаг скрутки $p = 16$ мм; расстояние между осями проводников $s = 0,9$ мм; диаметр проводника (медь) $d = 0,54$ мм; толщина изоляции – $0,18$ мм; диэлектрическая проницаемость материала изоляции – $1,74$; длина неэкранированной витой пары 30 м. Форма и параметры внешнего электромагнитного импульса представлена на рис. 6.

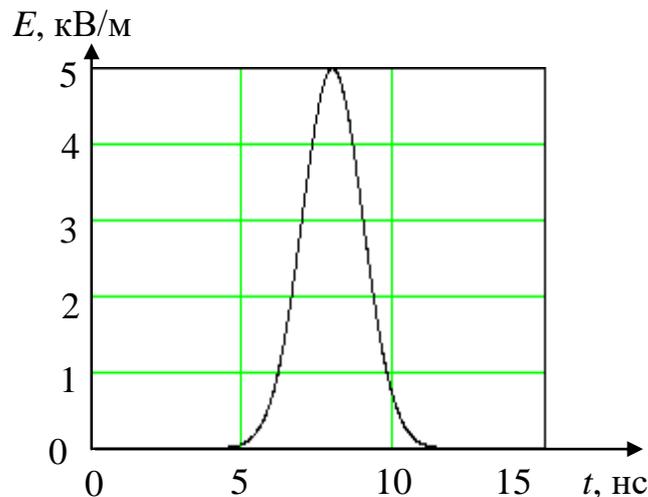


Рис. 6. Временная форма электромагнитного импульса

На рис. 7 представлен результат моделирования электромагнитной

помехи на нагрузке Z_L неэкранированной витой пары.

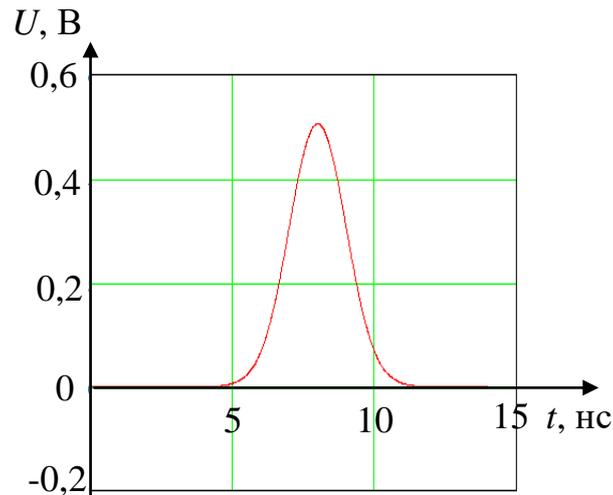


Рис. 7. Электромагнитная помеха на нагрузке Z_L (б) неэкранированной витой пары при воздействии электромагнитного импульса

На рис. 8 представлены результаты моделирования электромагнитных помех на нагрузке Z_L в зависимости от длины неэкранированной витой пары при электромагнитных воздействиях (рис. 8).

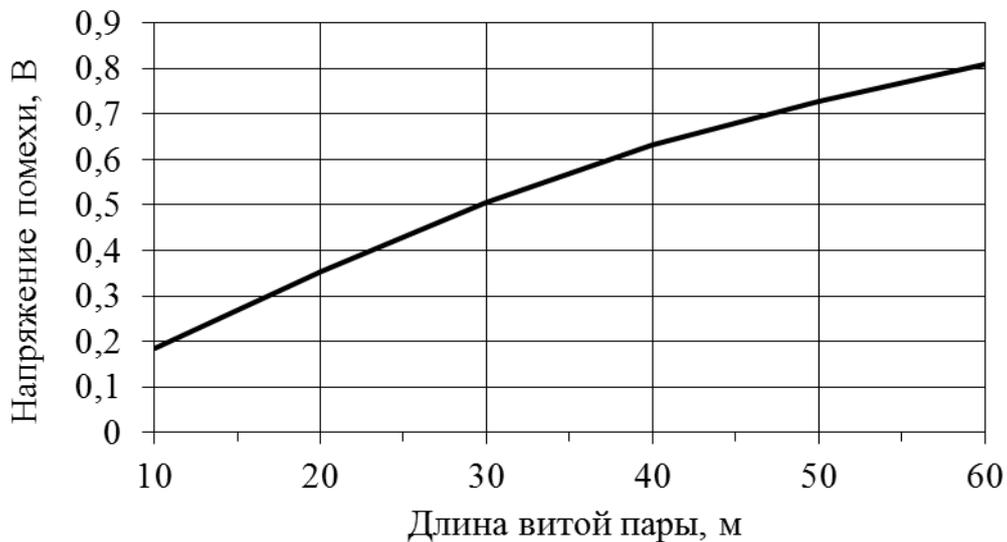
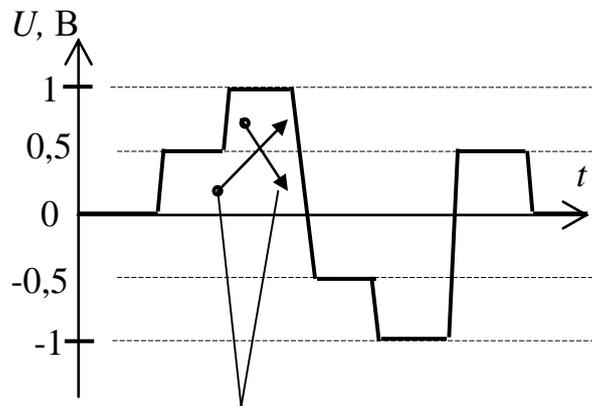


Рис. 8. Амплитуда напряжения электромагнитных помех в неэкранированной витой паре в зависимости от ее длины

Для прогнозирования качества функционирования компьютерных сетей при воздействии электромагнитных помех можно использовать приближенный подход на основе теоретической методики представленной в [16]. Прогнозирование ведется на физическом уровне без учета различных

временных режимов работы КС. Например, сеть Gigabit Ethernet имеет пятиуровневый метод физического кодирования сигнала (рис. 9). В качестве исходных данных выбираются следующие параметры информационных пакетов: минимальная длина – 64 байт; максимальная длина – 1518 байт; соответственно, длительность пакетов 2,05 мкс и 48,58 мкс.



Воздействие электромагнитных помех

Рис. 9. Нарушения помехоустойчивости сети Gigabit Ethernet при воздействии электромагнитных помех

Считаем, что минимальный уровень помех, который может привести к изменению логического уровня информационного сигнала в КС составляет $\pm 0,5$ В, с длительностью более 4 нс. Полученные, на основе моделирования, электромагнитные помехи способны привести к ошибке в пакете данных компьютерной сети. С учетом возможной частоты повторения воздействующих электромагнитных импульсов, помехи вводят множественные ложные сигналы в пакеты данных, которые обнаруживаются проверкой контрольной суммы пакета. Такие пакеты отбрасываются, и требуется их повторная передача (рис. 10).

Выводы

1. Неэкранированная витая пара является основой для построения большинства компьютерных сетей, а по своим электрофизическим и геометрическим параметрам может выступать хорошим «приемником» электромагнитных полей и преобразователем их в электромагнитные помехи.

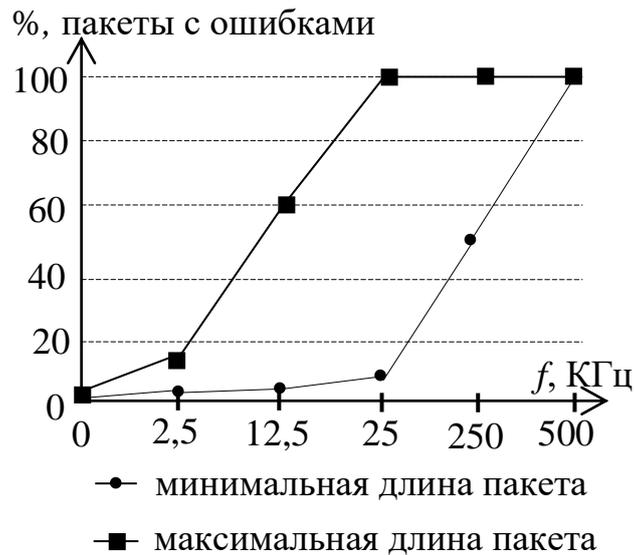


Рис. 10. Прогнозирование функционирования сети Ethernet при воздействии электромагнитных помех

2. В работе предложены математические модели для анализа электромагнитных помех в неэкранированной витой паре при внешнем электромагнитном воздействии в дальней зоне. Сравнение результатов моделирования и экспериментальных данных позволяет говорить о том, что они достаточно хорошо согласуются (расхождение не более $\pm 1,5$ дБ).

3. Величины электромагнитных помех в неэкранированной витой паре при воздействии мощных электромагнитных импульсов может достигать нескольких вольт, что достаточно для нарушения уровня помехоустойчивости информационных сигналов в сетях. С учетом возможной частоты повторения воздействующих электромагнитных импульсов помехи способны привести к существенному снижению качества функционирования компьютерных сетей.

Литература

1. ГОСТ Р 30804.4.4-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2014. – 27 с.

2. ГОСТ Р 56115-2014. Защита информации. Автоматизированные системы в защищенном исполнении. Средства защиты от преднамеренных силовых электромагнитных воздействий. Общие требования. – М.:

Стандартинформ, 2015. – 46 с.

3. Gizatullin Z.M., Gizatullin R.M. Study of the electromagnetic compatibility of local area networks under the action of nanosecond electromagnetic disturbances // Journal of Communications Technology and Electronics. – 2014. – No. 5. – pp. 424–426.

4. Сахаров К.Ю., Соколов А.А., Михеев О.В. Исследование функционирования локальной вычислительной сети в условиях воздействия сверхкоротких электромагнитных импульсов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2006 – №3. – С. 36–46.

5. Mojert C., Nitsch D., Friedjoff H., Maack J., Sabath F., Camp M., Garbe G. UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks // Proceedings of the 14th International Zürich Symposium EMC. – Zurich, 2001. – pp. 47–52.

6. Jeffrey J., Gilmore C., Siemens G., LoVetri J. Hardware Invariant Protocol Disruptive Interference for 100BaseTX Ethernet Communications // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – 2004. – No. 3. – pp. 412–422.

7. Maki M., Hamada S., Tokuda M., Shimoshio Y. Immunity of communications systems using a balanced cable // Proceedings of the IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. – Fort Lauderdale, 2010. – pp. 37–42.

8. Kreitlow M., Sabath F., Garbe H. A test method for analyzing disturbed Ethernet data streams // Advances in Radio Science. – 2015. – No. 13. – pp. 149–153.

9. Киричек Р.В. Исследование влияния сверхкоротких электромагнитных импульсов на процесс передачи данных в сетях Ethernet: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. – СПб., 2011. – 20 с.

10. Ларионенко А.В. Разработка требований к средствам защиты локальных вычислительных сетей от деструктивного воздействия сверхкороткого импульсного электромагнитного излучения: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – М., 2010. – 28 с.

11. Li-Hua S., Yang Y., Ying-Hui Z., Bi-Hua Z. Statistical results on the EMP conductive susceptibility of a serial network measurement and control device //

Proceedings of the 5th Asia-Pacific Conference on Environmental Electromagnetic. – Beijing, 2009. – pp. 13–16.

12. Кечиев Л.Н., Степанов П.В. ЭМС и информационная безопасность в системах телекоммуникаций. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2005. – 320 с.

13. Armenta R.B., Sarris C.D. Efficient evaluation of the terminal response of a twisted-wire pair excited by a plane-wave electromagnetic field // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – 2007. – No. 3. – P. 698–707.

14. Taylor C.D., Castillo J.P. On the response of a terminated twisted-wire cable excited by a plane-wave electromagnetic field // IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility. – 1980. – No. 1. – pp. 16–19.

15. Smith A. Coupling of external electromagnetic fields to transmission lines. – New York: Inter science, 1977. – 125 p.

16. Гизатуллин З.М. Помехоустойчивость средств вычислительной техники внутри зданий при широкополосных электромагнитных воздействиях: монография. – Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та, 2012. – 254 с.