

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ВОЗДЕЙСТВИЙ ДЕСТРУКТИВНЫХ ЭМИ НА ЭЛЕМЕНТЫ И УЗЛЫ БЦВК

Л. О. Мырова¹, А. В. Царегородцев², В. А. Михайлов³

¹ ОАО «Московский научно-исследовательский радиотехнический институт»

² ВГНА Минфина России,

³ ОАО «НИИ «АРГОН»

Получена 18 октября 2012 г.

Аннотация. Проводится анализ существующих подходов к построению современных бортовых вычислительных комплексов. Предлагаются основные принципы построения модели воздействий ЭМИ на элементы и узлы БЦВК для реализации интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ на этапах проектирования и эксплуатации

Ключевые слова: бортовой цифровой вычислительный комплекс, электромагнитное воздействие, интеллектуальная система, модель.

Abstract. The analysis of existing approaches to the construction of modern onboard digital computer systems is performed. The basic principles of the development of destructive electromagnetic effects impacts model on the units and components of onboard digital computer system to create an intelligent system of analysis and evaluation of onboard digital computer system's resistance to destructive electromagnetic effects during the design and operation are offered.

Keywords: onboard digital computer system, electromagnetic effect, intelligent system, model.

Введение

Радиоэлектронные технологии вошли в системы управления и навигации как наземных, так и аэрокосмических комплексов. Сегодня уже немыслимо функционирование подвижных комплексов без систем радиосвязи, навигации, наведения, охранных систем и т.д. Однако, с одной стороны, работа технических средств создает в большей или меньшей степени различные

электромагнитные помехи. С другой стороны, само радиоэлектронное оборудование чувствительно к разного рода электромагнитным воздействиям. В результате действия таких помех возникают различные нарушения в работе оборудования, приводящие к выходу его из строя, авариям и сбоям.

Оценка устойчивости бортовых цифровых вычислительных комплексов (БЦВК) к действию электромагнитных полей (ЭМП) включает в себя определение параметров электромагнитных полей, воздействующих на подсистемы БЦВК и последующую оценку воздействия этих ЭМП на работоспособность отдельных элементов и узлов БЦВК и системы в целом.

Анализ методов и средств оценки воздействия электромагнитных импульсов (ЭМИ) на подсистемы БЦВК показал, что для достоверной оценки устойчивости БЦВК к воздействию ЭМИ требуется разработка новых расчетных моделей оценки воздействия ЭМП на элементы и узлы БЦВК с возможностью их интеграции в рамках единого комплекса, позволяющего проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия ЭМИ на БЦВК.

1. Структура интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к воздействию ЭМИ

При постановке проблемы исследования будем отталкиваться от предлагаемого представления интеллектуальной системы анализа устойчивости (ИСАУ) БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ (рисунок 1).

ИСАУ должна проводить анализ и оценку устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ на этапе проектирования и эксплуатации. Для удовлетворения данного требования предполагается использовать подход, при котором проводится анализ модели БЦВК. Данная модель строится на базе спецификаций, описывающих конфигурацию бортовой сети (топологию, состав программного обеспечения (ПО) и аппаратных средств (АС)) и реализуемую в ней политику безопасности. На этапе проектирования БЦВК спецификации

формируются проектировщиком, на этапе эксплуатации – в автоматическом режиме при помощи программных агентов, функционирующих на узлах БЦВК.

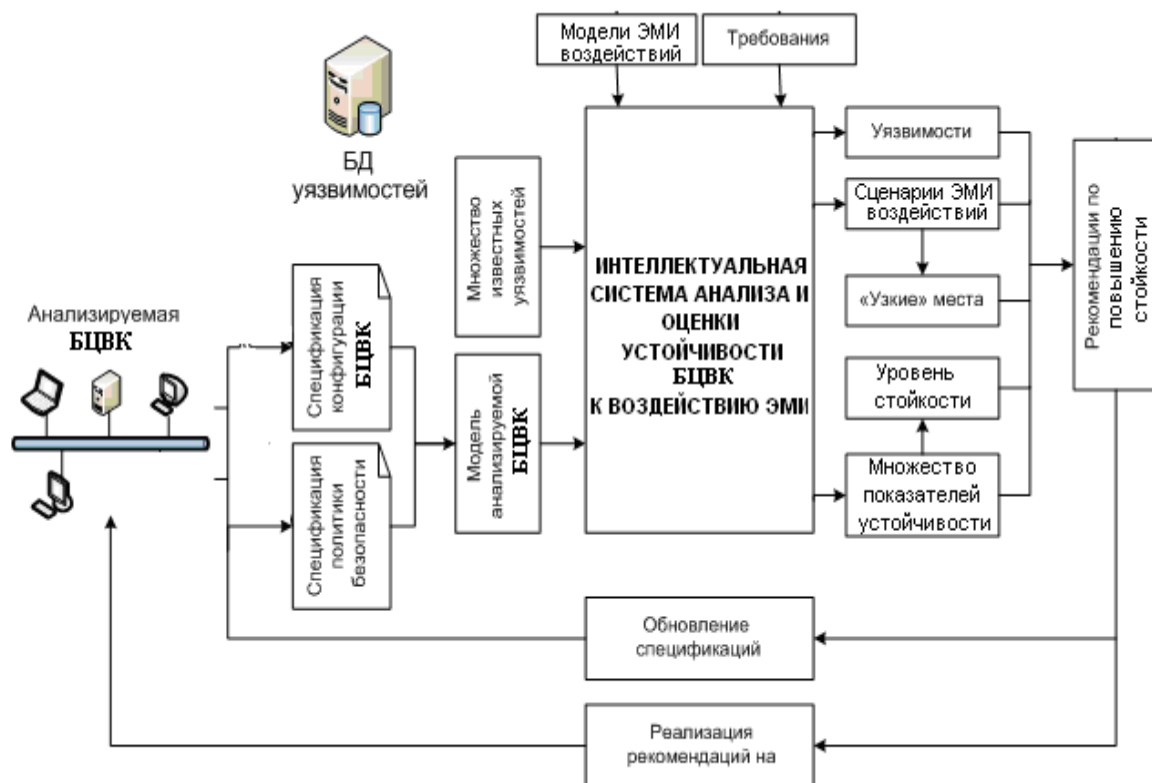


Рис. 1. Представление интеллектуальной системы анализа устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ

Во время работы ИСАУ должна формировать сценарии электромагнитных воздействий на элементы и узлы БЦВК, учитывать модели ЭМИ на элементы и узлы БЦВК на всем диапазоне частот, производить расчет множества показателей, характеризующих устойчивость БЦВК в целом и ее отдельных подсистем к воздействию ЭМИ, учитывать топологию анализируемой сети, состав аппаратных средств и программного обеспечения, реализуемой политики безопасности. Результатом работы ИСАУ являются множество обнаруженных уязвимостей, сценарии ЭМИ воздействий, наиболее критичные компоненты сети, вероятность выхода из строя которых наивысшая, множество показателей устойчивости, комплекс мер по повышению уровня стойкости БЦВК.

Для реализации анализа устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ на этапах проектирования и эксплуатации необходимо разработать модели воздействий ЭМИ на элементы и узлы анализируемой БЦВК, построения сценариев электромагнитных воздействий на элементы и узлы БЦВК и оценки уровня стойкости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ.

В работе [1] показано, что наиболее критичной подсистемой при воздействии ЭМИ на БЦВК является система информационного обмена, поэтому при разработке модели воздействия деструктивных ЭМИ на каналы передачи данных и управления БЦВК можно использовать результаты анализа воздействия ЭМИ на элементы локальных сетей.

2. Особенности построения высокоскоростных сетей Ethernet

Разрабатываемая математическая модель предполагает описание основных логических операций, выполняемых на физическом уровне технологии Ethernet. Наиболее вероятно и опасно воздействие СК ЭМИ в сетях доступа на участках «ПК — ПК», «ПК — коммутатор» и «коммутатор — маршрутизатор».

В качестве представительного объекта воздействия рассмотрим фрагмент сети Ethernet, состоящий из двух ПК и линии связи — витой пары категории 5е (рисунок 2). Обобщение разработанного ниже расчетного аппарата на другие вышеуказанные участки сети достаточно очевидно ввиду идентичности сетевых интерфейсов конкретного производителя оборудования.



Рис. 2. Фрагмент сети Ethernet, подверженный воздействию СК ЭМИ

На рассматриваемый фрагмент с помощью генератора СК ЭМИ осуществляется преднамеренное электромагнитное воздействие на неэкранированную витую пару с помощью емкостной связи. В результате этого воздействия возникают ошибки при передаче данных, возрастает число потерь и, как следствие, происходит снижение производительности сети.

На рисунке 3 представлена осциллограмма помехи $V(t)$, которая представляет собой периодически повторяющуюся импульсную помеху в линии связи с частотой следования f и длительностью τ_p .

Рассмотрим математическую модель, которая связывает параметры периодически повторяющейся импульсной помехи с вероятностью потери кадра P_{loss} , для рассмотренных спецификаций Ethernet.

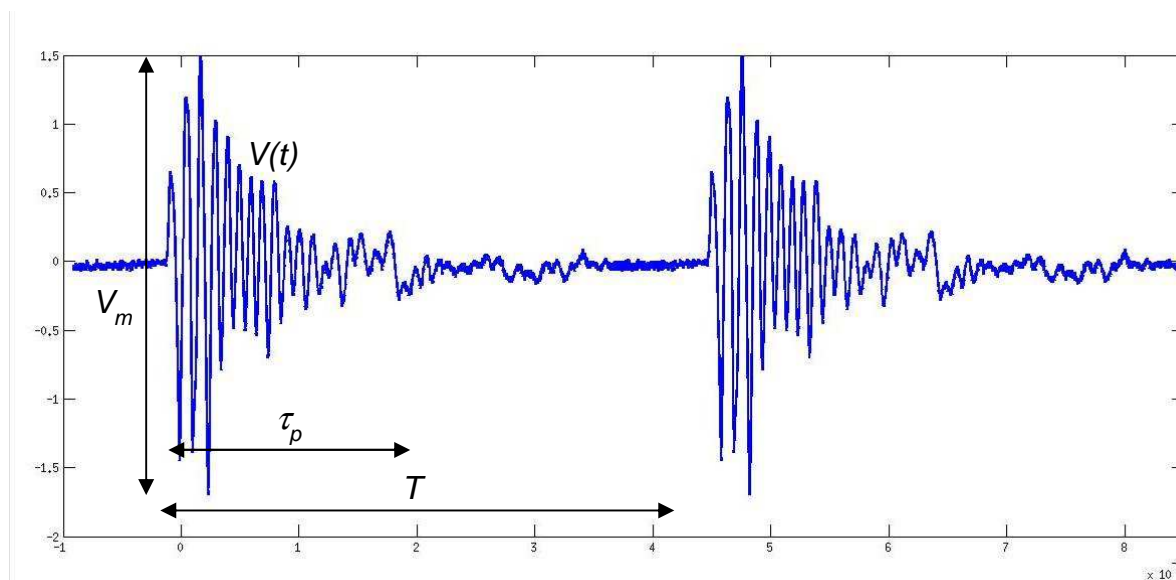


Рис. 3. Осциллограмма периодических импульсных помех, наведенных в линии связи

Чтобы связать вероятность единичного сбоя Pe с параметрами периодически повторяющейся импульсной помехи, наведенной в кабеле, допустимо преобразовать напряжение $V(t)$ в эквивалентное напряжение гауссова шума V_{ng} . Эта задача рассматривалась в основополагающей работе Шеннона по теории информации, в которой был изложен общий теоретический подход к получению значения V_{ng} , основанный на концепции информационной

энтропии. Замена детерминированной периодически повторяющейся импульсной помехи $V(t)$ эквивалентным гауссовским шумом производится с условием равенства энергий этих помех. Согласно схеме декодирования, реализованной в сетевых интерфейсах, для принятия решения о сопоставлении электрическому сигналу последовательности информационных символов в микросхеме-детекторе рассчитывается среднеквадратичное напряжение на каждом символьном интервале. Таким образом, ключевой величиной является энергия, а не амплитуда.

Стоит также отметить, что периодически повторяющаяся импульсная помеха заменяется эквивалентным гауссовым шумом не полностью, а лишь на участке, равном длительности импульса.

Начнем оценку значения V_{ng} с усреднения формулы (1).

$$V_{ng} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} = V_m \cdot \sqrt{f \cdot K}$$

(1)

V_{ng} — среднеквадратичное значение амплитуды гауссового шума;

V_m — амплитуда импульса помехи;

f — частота следования импульсов помехи;

$$K = \int_0^{\tau_p} g^2(t) dt$$

K — энергия импульса;

τ_p — длительность импульса помехи;

$$g(t) = \frac{V(t)}{V_m}$$

$g(t)$ — форма импульса помехи;

$V(t)$ — амплитуда импульса помехи в момент времени t .

$$V_{ng} = V_m \sqrt{f \tau_p}$$

Вероятность искажения единичного элемента сопоставима с устоявшимся параметром BER (bit error ratio) — коэффициентом ошибок по символам, который используется для характеристики цифровых потоков плезиохронной (PDH) и синхронной (SDH) иерархии.

Основным отличием сетей Ethernet от сетей SDH и PDH является асинхронный пакетный режим передачи данных. Большинство устройств канального уровня отбрасывают принимаемые кадры при несовпадении рассчитанной контрольной суммы с данными в поле FCS или при искажении служебных полей кадра. Это означает, что один-единственный ошибочный бит при передаче кадра приводит к отбрасыванию всего кадра. По этой причине основной критерий качества услуг SONET/SDH — BER не подходит для Ethernet, так как используются схемы избыточного кодирования и скремблирования, поэтому далее будем оценивать вероятность неправильной передачи кадра данных P_{loss} .

Наличие скремблера учитывается через предположение о том, что исходная (некодированная) последовательность бит является псевдослучайной с вероятностями появления нуля или единицы $1/2$.

Пусть кадр передаваемых данных состоит из N битов, а номинальная скорость передачи данных равна R .

Обозначим m — число символов в пакете длиной N , подверженных воздействию, $\frac{\tau}{1/R}$ — количество символов в кадре, искаженных в пределах длительности одного импульса помехи. Очевидно,

$$m = f \frac{N}{R} \cdot \frac{\tau}{1/R} = f \tau N = DN = \frac{N}{S}, \quad (2)$$

где D — коэффициент заполнения импульса, S — скважность.

Из выражения (2) следует, что число символов, подверженных воздействию, не зависит от символьной скорости R .

Вероятность того, что подверженный воздействию бит информации будет воспринят правильно, равна $Q = 1 - P_e$, а вероятность неправильной передачи кадра данных в результате единичного сбоя будет равна:

$$P_{loss} = 1 - \left(1 - P_e \left(V_{ng} \right) \right)^m, \quad (3)$$

где P_e — вероятность единичного сбоя; m — число символов в кадре, подвергаемых воздействию.

Из соотношения (3) видно, что вероятность неправильной передачи кадра данных возрастает при увеличении вероятности единичного сбоя, которая, в свою очередь, растет с уменьшением отношения «сигнал — шум», то есть с увеличением V_{ng} . Вероятность P_{loss} также возрастает с увеличением частоты повторения импульсной помехи.

Изложенный выше подход применен к случаю двоичных методов кодирования (например манчестерского), и получены формулы для соответствующих вероятностных оценок. В настоящей работе предлагается обобщение расчетного аппарата на случай более сложных методов кодирования, используемых в современных высокоскоростных сетях Ethernet.

3. Вероятностная модель потерь кадров в сетях Fast Ethernet при воздействии СК ЭМИ

В качестве иллюстрации возможных случаев искажения единичных элементов рассмотрим модель кодирования MLT-3-кода (рисунок 4).

Имеется последовательность символов, каждый элемент которой — это один из трех символов: «-1», «0», «1», что соответствует уровням напряжения — 1 В, 0 В, +1 В. Также заданы уровни $-v$ и v , соответствующие пороговому уровню напряжений, используемых при определении каждого символа соответственно при наличии шумов в линии связи. Фактически эти уровни устанавливаются производителями сетевого оборудования.

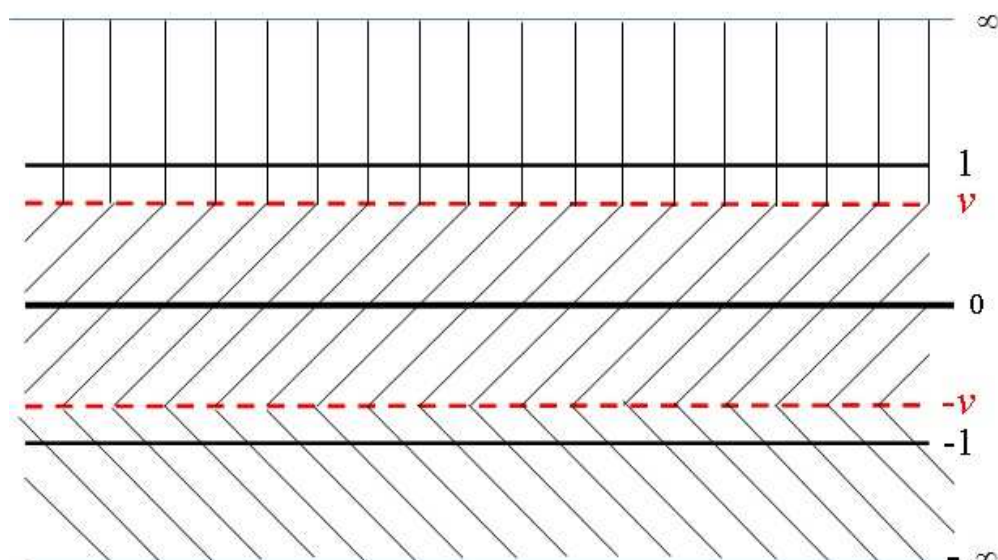


Рис. 4. Модель кодирования MLT-3

В контроллере Ethernet сетевого интерфейса декодирование принятого уровня напряжения осуществляется по следующему алгоритму:

«-1»: если напряжение U (В) лежит в интервале $-v > U > -\infty$;

«0»: если напряжение U (В) лежит в интервале $v > U > -v$;

«1»: если напряжение U (В) лежит в интервале $v > U > \infty$.

При воздействии СК ЭМИ по линиям связи исходный сигнал подвергается искажающему воздействию аддитивной помехи в виде центрированного гауссова шума z , вследствие чего, согласно модели MLT-3-кодирования (рисунок 3), возможны следующие комбинации искажения исходной последовательности символов, представленные ниже:

"1" может принять значения $\begin{cases} 1 \rightarrow -1: 1-v < z < 1+v \\ 1 \rightarrow 0: z < -1-v \end{cases}$

"0" может принять значения $\begin{cases} 0 \rightarrow -1: z < -v \\ 0 \rightarrow 1: z > v \end{cases}$

"-1" может принять значения $\begin{cases} -1 \rightarrow 1: 1+v > z > 1-v \\ -1 \rightarrow 0: z > 1+v \end{cases}$

Воспользуемся формулой полной вероятности для вычисления вероятности искажения произвольно выбранного символа $Pe(z)$. Обозначим $\mu\{a < z < b\}$ —

вероятность того, что мгновенное значение помехи z лежит в пределах заданного интервала (a, b) .

Для решения поставленной задачи необходимо задать вероятности появления символов «-1», «0», «1». Обозначим их $p(-1)$, $p(0)$, $p(1)$ соответственно. Вероятность их появления определялась с помощью экспериментальных методов. В результате проведенных экспериментов на цифровом осциллографе были записаны образы сигналов в линии связи при передаче различных типов трафика. Полученные осциллограммы были обработаны с помощью пакета MATLAB 2009b, для удобства идентификации уровней сигналов «-1», «0», «1», и подсчитаны частоты появления каждого символа (рисунок 5).

Полученные значения частоты появления символов выразим через вероятности $p(-1) = 0,2355 \approx 0,24$; $p(0) = 0,4947 \approx 0,49$; $p(1) = 0,2698 \approx 0,27$. Данные значения подобны значениям, полученным исследовательской группой в университете Беркли.

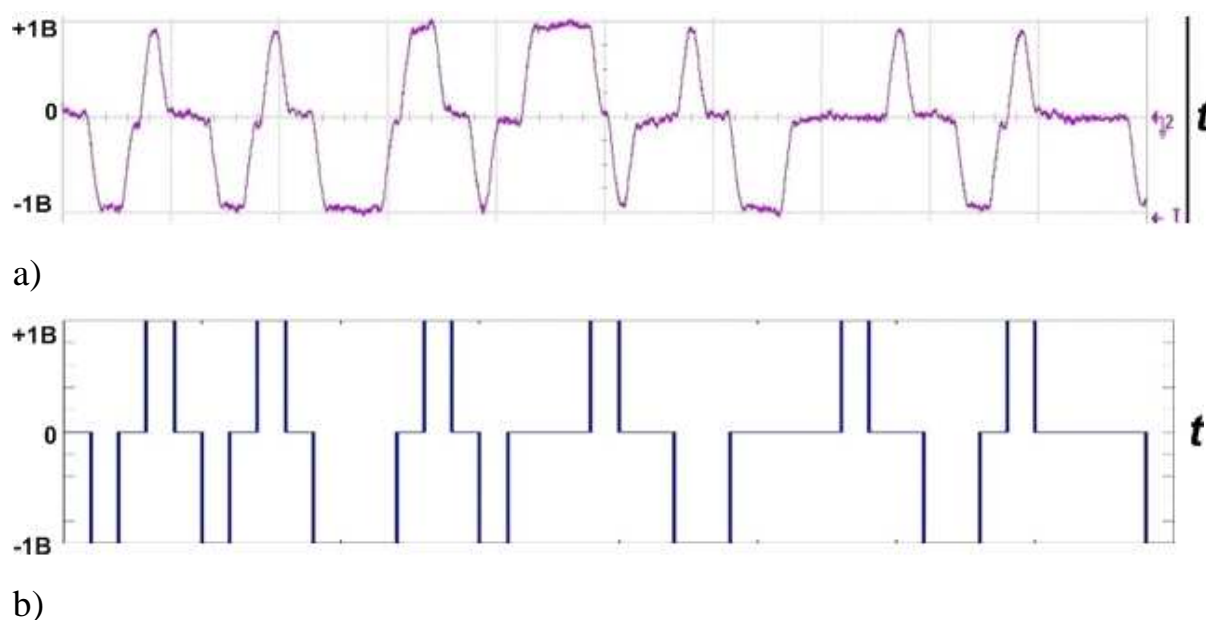


Рис. 5. Результат обработки фрагмента осциллограммы в пакете Matlab для спецификации 100Base-TX: осциллограмма сигнала в линии связи (a); представление сигнала после обработки в пакете Matlab (b)

Рассмотрим полную группу несовместных событий «-1», «0», «1», вероятности появления которых $p(-1)$, $p(0)$, $p(1)$. Событие z может произойти только вместе с появлением каким-либо из символов «-1», «0», «1», которые будем называть гипотезами. Тогда по формуле полной вероятности вероятность искажения единичного символа равна:

$$P_e(z) = p_{(-1)}\mu\{z > 1+v\} + p_{(-1)}\mu\{1+v > z > 1-v\} + p_{(0)}\mu\{z < -v\} + p_{(0)}\mu\{z > v\} + p_{(1)}\mu\{z < -1-v\} + p_{(1)}\mu\{1+v > z > 1-v\}$$

$$P_e(z) = p_{(-1)}\mu\{z > 1-v\} + 2p_{(0)}\mu\{z > v\} + p_{(1)}\mu\{z > 1-v\}$$

$$P_e(z) = p_{(1)} + p_{(-1)} + 2p_{(0)} - (p_{(1)} + p_{(-1)})\mu(z < 1-v) - (p_{(1)} + p_{(-1)} + 2p_{(0)})\mu(z > 1+v)$$

Подставляя значения $p(-1)$, $p(0)$, $p(1)$ и упрощая, получаем:

$$P_e(z) = 1,5 - 0,5\mu(z > 1+v) - 1,5\mu(z < 1-v)$$

Исходя из представления повторяющейся импульсной помехи в виде эквивалентного гауссова шума, предлагается рассчитывать вероятность того, что мгновенная амплитуда гауссова шума z примет значение, меньшее V , по соотношению

$$\mu\{z \leq V\} = \frac{1}{2} \left(1 + \operatorname{erf} \left(\frac{V}{\sqrt{2}V_g} \right) \right), \quad (4)$$

где $\operatorname{erf}(x)$ — функция ошибок.

$$\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$$

Тогда вероятность искажения единичного символа равна:

$$P_e(V_{ng}) = 0,5 + 0,25\operatorname{erf} \left(\frac{1+v}{\sqrt{2}V_{ng}} \right) - 0,75\operatorname{erf} \left(\frac{1-v}{\sqrt{2}V_{ng}} \right)$$

Здесь V_{ng} — среднеквадратичное напряжение эквивалентного гауссовского шума.

После подстановки значения $v = 0,7$ В, окончательно получаем вероятность искажения единичного символа:

$$P_e(V_{ng}) = 0,5 + 0,25 \operatorname{erf} \left(\frac{1,202}{V_{ng}} \right) - 0,75 \operatorname{erf} \left(\frac{0,2121}{V_{ng}} \right) \quad (5)$$

Используя (5), получим окончательную формулу вероятности того, что принимаемый кадр будет потерян:

$$P_{loss} = 1 - \left(0,5 - 0,25 \operatorname{erf} \left(\frac{1,202}{V_m \sqrt{f \tau_p}} \right) + 0,75 \operatorname{erf} \left(\frac{1,2121}{V_m \sqrt{f \tau_p}} \right) \right)^m \quad (6)$$

Заключение

В статье предложен новый подход к созданию интеллектуальной системы анализа устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ, позволяющей проводить интеллектуальный анализ и оценку параметров искажений информационного потока в системе для предотвращения деструктивного действия ЭМИ на БЦВК.

Литература

1. Михайлов В.А., Мырова Л.О., Царегородцев А.В. Структура интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – М.: Изд-во ОАО "ЭКОС", 2012. - № 1, 2. – С. 116-120.
2. Михайлов В.А., Мырова Л.О., Царегородцев А.В. Модель интеллектуальной системы анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. – М.: Изд-во ОАО "ЭКОС", 2012. - № 1, 2. – С. 124-128.
3. Михайлов В.А., Мырова Л.О., Царегородцев А.В. Интеллектуальная система анализа и оценки устойчивости БЦВК к деструктивному воздействию ЭМИ // Электросвязь. – М.: Изд-во "Инфо-Электросвязь", 2012. - № 8.- С. 36-40.
4. Киричек Р.В. Исследование влияния сверхкоротких ЭМИ на процесс передачи данных в сетях ETHERNET. Диссертация, 2011г.