

УДК 51-74

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ СБОЕВ ЦИФРОВЫХ УСТРОЙСТВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ СВЕРХКОРОТКИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИМПУЛЬСОВ

Л. Н. Здухов, А. П. Исаев, Ю. В. Парфёнов, Б. А. Титов

Учреждение Российской академии наук Объединённый институт высоких температур

Получена 4 мая 2011 г.

Аннотация. Предложена методика оценки стойкости цифровых устройств к воздействию периодически повторяющихся сверхкоротких электромагнитных импульсов, позволяющая выбрать оптимальные характеристики излучаемых импульсов, дать прогноз последствий воздействия импульсов с произвольными параметрами на цифровые приборы и т.п.

Ключевые слова: сверхкороткий электромагнитный импульс, цифровое устройство, стойкость.

Abstract. The technique of estimation of immunity of digital devices to influence of periodically repeating ultrashort electromagnetic pulses is proposed. It allows choosing optimum parameters of radiated pulses, to forecast consequences of influence of any pulses on digital devices, etc.

Key words: ultrashort electromagnetic pulse, digital device, immunity.

Введение

В связи с тем, что сбои в работе современных электронных систем могут привести к крупномасштабным негативным последствиям, ведётся непрерывный мониторинг за появлением новых источников потенциальных угроз для нормального функционирования этих систем. К числу подобных источников относятся излучатели сверхкоротких электромагнитных импульсов (СКЭМИ) [1-4]. По этой причине актуальным является получение ответа на вопрос: «Что произойдёт с цифровым устройством, если оно будет подвергнуто воздействию периодически повторяющихся СКЭМИ?».

Напрашивается очевидный способ получения искомого ответа:

необходимо провести испытания данного устройства с использованием источника СКЭМИ. Однако эти испытания не позволят спрогнозировать последствия электромагнитного воздействия, осуществляемого с помощью другого источника, формирующего импульсы с иными амплитудно-временными и частотными характеристиками. В настоящей статье предложена методика решения подобных задач.

1. Математическая модель формирования сбойных эффектов в цифровых устройствах

В процессе функционирования цифровых устройств между их отдельными блоками происходит обмен информацией, которая передается по шинам данных в виде пакета битов. Если на информационный сигнал накладывается импульсная помеха, то может произойти ошибка бита.

Вероятность ошибки бита $P_e(z)$ можно вычислить с помощью следующего соотношения:

$$P_e(z) = 0,5 \cdot \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{z}{\sqrt{2}}\right)\right).$$

Здесь $z = \frac{U_{\text{сигн}}}{U_{\text{ном}}} \sqrt{\frac{T_{\text{сигн}}}{T_{\text{ном}}}}$; $U_{\text{сигн}}$ - амплитуда импульсного сигнала (информационного бита); $T_{\text{сигн}}$ - длительность бита; $U_{\text{ном}}$ - амплитуда импульсной помехи; $T_{\text{ном}} = (U_{\text{ном}})^{-2} \int (U_{\text{ном}}(t))^2 dt$ - длительность импульсной помехи.

Вероятность неправильной передачи пакета данных (т.е. вероятность того, что, по крайней мере, один из битов будет ошибочным) равна [5, 6]:

$$P_{\text{ош}} = 1 - \left(1 - P_e(z)\right)^{f \cdot \frac{\mathcal{N}}{\mathcal{R}}} \quad (1)$$

Здесь: f - частота повторения импульсной помехи; \mathcal{N} - количество битов в пакете; \mathcal{R} - скорость передачи данных, причём $\mathcal{R} = 1 / T_{\text{сигн}}$.

Исходными данными, необходимыми для проведения расчётов по

формуле (1), являются характеристики информационных сигналов, а также характеристики импульсных помех, индуцируемых в элементах монтажа электронных приборов при воздействии на них СШП ЭМИ. Если первые можно найти в технических описаниях интересующих приборов, то для определения вторых необходимо выполнить расчётные оценки. Для этого разработана программа расчёта, которая базируется на численном методе решения интегральных уравнений. Сущность данного метода заключается в следующем [7, 8].

Пусть на произвольную проволочную структуру, моделирующую интересующий элемент монтажа устройства, действует стороннее переменное электрическое поле. Ток, наведённый в проводниках, является решением интегрального уравнения, эквивалентного уравнению Поклингтона:

$$\left\{ \frac{i}{\omega \epsilon} (\text{grad div} + k^2) \int_L I(p) \tau(p) \frac{\exp[-ikR(p,s)]}{4\pi R(p,s)} dp \right\} \tau(s) = E^0(s) \tau(s), \quad (2)$$

где $E^0(s)$ — вектор стороннего электрического поля в точке s , $\tau(s)$ — вектор касательной к металлоконструкции в точке s .

Для определения параметров воздействия каждый проводник проволочной структуры разбивается на N взаимодействующих диполей с кусочно-синусоидальным распределением тока (базисные функции). Каждый диполь состоит из двух плеч различной длины и различной ориентации, и на концах диполя ток обращается в нуль. В качестве весовых функций использованы функции, комплексно-сопряженные базисным, т.е. в качестве метода решения используется метод согласования реакций, эквивалентный методу Галеркина. Систему линейных алгебраических уравнений в этом случае можно записать в виде:

$$\sum_{n=1}^N Z_{mn} I_n = V_m, m = 1 \dots N, \quad (3)$$

где I_n - ток в n -ом диполе или ток в месте сочленения сегментов, образующих

n -ый диполь. Правая часть системы уравнений характеризует стороннее действующее поле и может быть вычислена следующим образом:

$$V_m = - \int_{l_{m-1}}^{l_m} \frac{\sin[k^*(l-l_{m-1})]}{\sin(k^*d_{m-1})} \tau_{m-1}(l) E_{m-1}^0(l) dl - \int_{l_m}^{l_{m+1}} \frac{\sin[k^*(l_{m+1}-l)]}{\sin(k^*d_m)} \tau_m(l) E_m^0(l) dl, \quad (4)$$

Здесь $\tau_{m-1}(l), \tau_m(l)$ - единичные векторы сегментов, образующих m -ый диполь; d_{m-1}, d_m - их длины; $E_{m-1}^0(l), E_m^0(l)$ - электрические компоненты напряженности стороннего поля в месте расположения сегментов диполей; l - текущая координата сегментов; k - постоянная распространения в окружающей среде; k^* - число, комплексно-сопряженное k .

Элементы матрицы Z_{mn} характеризуют взаимодействие m -го и n -го диполей и могут быть найдены следующим образом:

$$Z_{mn} = \int_{l_{n-1}}^{l_n} \frac{\sin[k^*(l-l_{n-1})]}{\sin(k^*d_{n-1})} \tau_{n-1}(l) E_m(l) dl + \int_{l_n}^{l_{n+1}} \frac{\sin[k^*(l_{n+1}-l)]}{\sin(k^*d_n)} \tau_n(l) E_m(l) dl, \quad (5)$$

где $E_m(l)$ - электрическое поле, создаваемое m -ым диполем в месте расположения n -го диполя, а $\tau_{n-1} E_m(l), \tau_n E_m(l)$ - касательные составляющие электрического поля m -го диполя к сегментам, образующим n -ый диполь.

Учёт нагрузки Z_n проводится добавлением её к соответствующему диагональному элементу, т.е. при расчете диагональных элементов Z'_{nn} следует использовать следующую формулу: $Z'_{nn} = Z_{nn} + Z_n$.

Таким образом, определены все выражения, входящие в матрицу системы (3). Обращение матрицы и решение системы линейных алгебраических уравнений осуществляются с помощью стандартных программ на основе быстродействующих алгоритмов. В результате вычисляются характеристики (амплитуда и длительность) импульсной помехи, индуцируемой в элементах монтажа. Исходными данными, необходимыми для этих вычислений, являются характеристики воздействующего на рассматриваемый

прибор СКЭМИ и параметры интересующего элемента монтажа.

2. Исходные данные для расчёта импульсной электрической помехи в элементах монтажа персональных компьютеров

2.1. Типовые характеристики СКЭМИ

В настоящее время в разных странах создано большое количество излучателей СКЭМИ, амплитудно-временные характеристики которых варьируются в широком диапазоне. При решении ряда задач по оценке стойкости технических систем к их воздействию оказалось удобным использовать типовую форму СКЭМИ, показанную на рисунке 1 (указанные на рисунке амплитудно-временные характеристики приведены в качестве примера).

Изображённый на данном рисунке импульс характеризуется амплитудой (E_1) и длительностью на полувысоте первого полупериода (T_1), а также соотношением между аналогичными характеристиками первого и второго полупериодов (E_1/E_2 , T_1/T_2). Существенно, что $E_1/E_2 = T_2/T_1$. Помимо амплитудно-временных характеристик важным параметром является частота следования импульсов ($f_{ном}$). С учётом возможностей современных излучателей при проведении расчётов имеет смысл рассматривать следующие характеристики типового СКЭМИ: $E_1 = 0,5 \div 100$ кВ/м; $T_1 = 0,1 \div 1,0$ нс; $E_1/E_2 = 1 \div 4$; $T_1/T_2 = 1 \div 0,25$; $f_{ном} = 0 \div 1$ МГц [9–11].

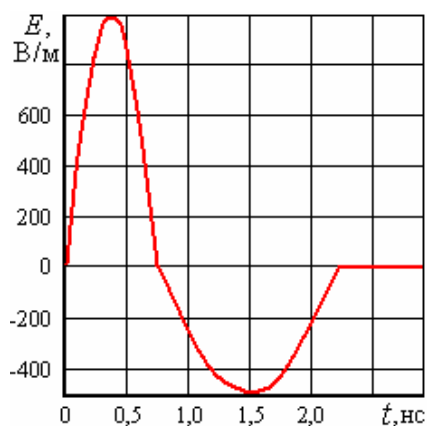


Рисунок 1 – Типовая форма СКЭМИ

2.2. Модели токопроводящих дорожек печатных плат

Вычисление характеристик импульсных помех, индуцируемых в токопроводящих дорожках реальной печатной платы, весьма сложная задача. В связи с этим построены три расчётных модели, отражающих принципиальные особенности токопроводящих дорожек реальных плат с точки зрения формирования наводок от СКЭМИ [12]. Эти модели показаны на рисунке 2. Модель 1 имитирует симметричную двухпроводную линию, расположенную над проводящей плоскостью платы. Модель 2 имитирует несимметричную двухпроводную линию, один из проводов которой соединён с проводящей плоскостью платы. И, наконец, модель 3 имитирует однопроводную линию, расположенную над проводящей плоскостью платы.

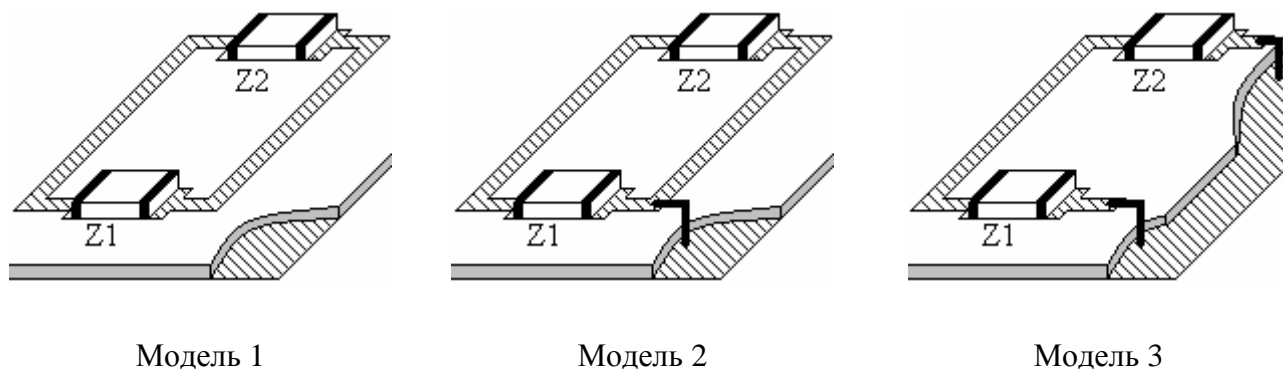


Рисунок 2 – Расчётные модели токопроводящих дорожек печатных плат, подверженных воздействию СКЭМИ

На печатных платах конкретных приборов располагается множество токопроводящих дорожек названных выше типов.

2.3. Характеристики информационных сигналов персональных компьютеров

Передаваемые по сети сообщения разбиваются в исходном узле на сравнительно небольшие части, называемые пакетами (страницами). Сообщения могут иметь произвольную длину, от нескольких байт до единиц мегабайт [13]. Пакеты также могут иметь переменную длину \mathcal{N} , как правило, от нескольких десятков бит до единиц килобит.

Скорость передачи данных \mathcal{R} между цифровыми устройствами может изменяться в широких пределах от единиц до сотен Мбит/с.

Для проведения расчётных оценок вероятности ошибок при передаче информации в цифровых устройствах выбраны следующие диапазоны изменения характеристик информационных сигналов: $\mathcal{N}=100\dots1000$ бит; $\mathcal{R}=10^6\dots10^8$ бит/с. Амплитудные значения информационных сигналов могут варьироваться в диапазоне $U_{сигн} = 0,5\div5$ В.

3. Оценка стойкости персонального компьютера к действию СКЭМИ

В качестве примера с помощью описанной выше расчётной методики и предложенных моделей токопроводящих дорожек печатных плат рассчитаны характеристики (амплитуды и энергии) импульсных электрических наводок. При проведении расчётов были приняты следующие исходные данные по геометрическим и электрическим параметрам упомянутых дорожек, а также по характеристикам информационного сигнала: длина дорожки 10 см; ширина дорожки 1 мм; расстояние между соседними дорожками 1мм; толщина печатной платы 2 мм; относительная диэлектрическая проницаемость материала платы 4,7; сопротивления нагрузок сигнальных линий 120 Ом; амплитуда сигнала 1 В; длина пакета данных 1000 бит; скорость передачи данных 10 Мбит/с. Результаты расчётов представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость характеристик импульсной помехи от типа токопроводящей дорожки

| Исходные данные по характеристикам СКЭМИ: $E_1 = 5$ кВ/м; $T_1 = 0,5$ нс; $E_1/E_2 = T_2/T_1 = 1$; $f_{ном} = 1$ кГц | | | |
|---|----------|---------------------|---------------------|
| Характеристики помехи | Модель 1 | Модель 2 | Модель 3 |
| $U_{ном}$, В | ~ 0 | 20 | 26 |
| $W_{ном}$, Дж | ~ 0 | $2,8 \cdot 10^{-9}$ | $3,6 \cdot 10^{-9}$ |
| $\mathcal{P}_{ош}$, % | ~ 0 | 3,4 | 3,7 |

Нетрудно видеть, что импульсные наводки в модели 1 практически отсутствуют, а в моделях 2 и 3 примерно одинаковы и достигают 20 – 26 В. Для определённости при проведении последующих расчётов, демонстрирующих возможности предлагаемой методики, будем использовать модель 3.

Таким образом, разработанная расчётная методика даёт возможность оценить вероятность возникновения ошибки при передаче или обработке информации в цифровом устройстве в результате воздействия периодически повторяющихся СКЭМИ. Однако возникает закономерный вопрос: «Каким образом эта величина характеризует реальные последствия электромагнитного воздействия на конкретное цифровое устройство, например, на компьютер?». Для ответа на данный вопрос был выполнен цикл экспериментов, схема проведения которых показана на рисунке 3.

Методика проведения этих экспериментов заключалась в следующем. Воздействию периодически повторяющихся СКЭМИ подвергался один из двух персональных компьютеров (ПК) типа PENTIUM III с операционной системой Windows XP, входящих в состав локальной компьютерной сети. Второй ПК располагался в экранированной комнате и электромагнитному воздействию не подвергался. В экспериментах были использованы два излучателя.

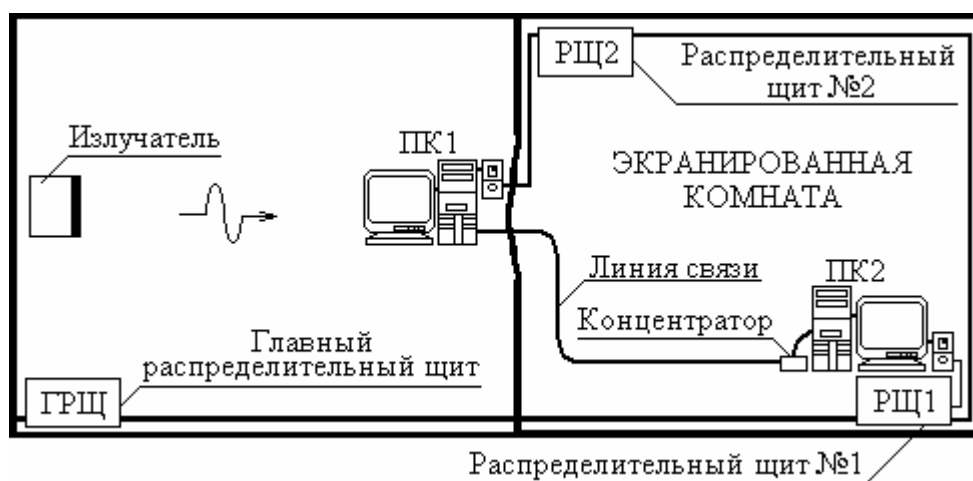


Рисунок 3 – Схема проведения экспериментов

Характеристики формируемых ими импульсных полей представлены на рисунках 4 и 5.

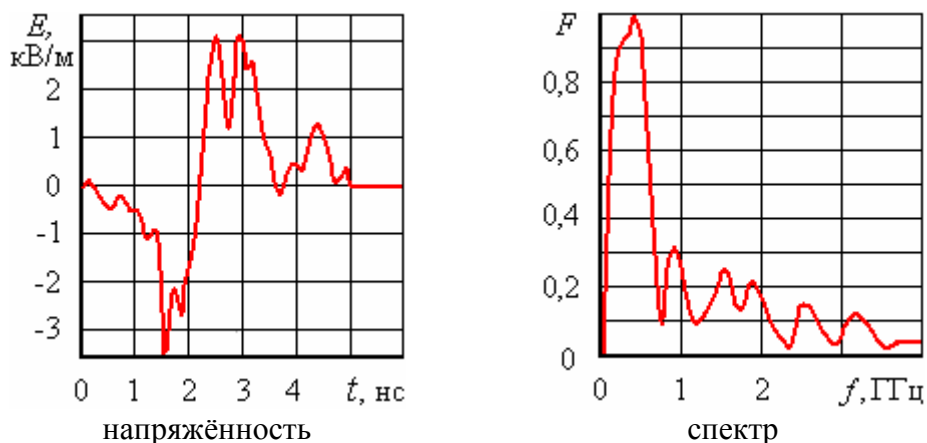


Рисунок 4 – Импульсное электрическое поле, создаваемое излучателем № 1 на расстоянии 3,6 м

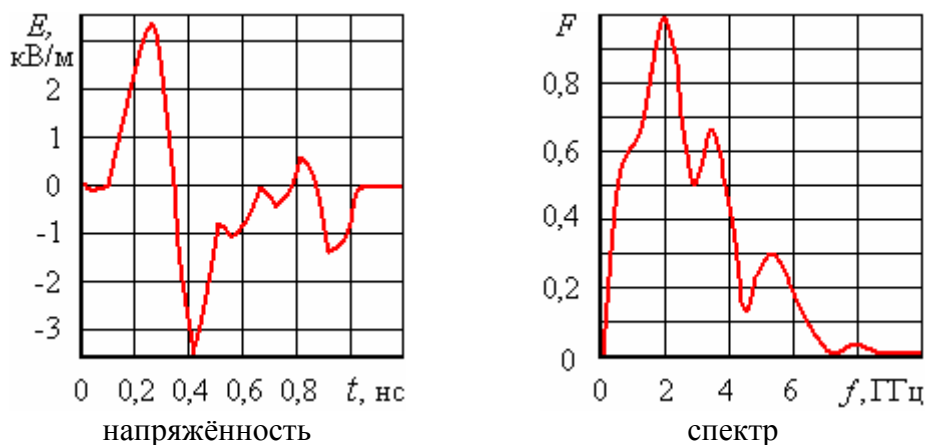


Рисунок 5 - Импульсное электрическое поле, создаваемое излучателем № 2 на расстоянии 6,3 м

В процессе проведения экспериментов характеристики СКЭМИ, воздействующих на ПК1, варьировались в широком диапазоне. При этом для каждого сочетания значений E и $f_{новт}$ производились расчёты вероятности $P_{ош}$. В качестве расчётной схемы принималась модель 3 (см. рисунок 2). Фактически, данная схема имитировала материнскую плату ПК1. Конечно, это далеко от истины, в связи с чем в дальнейшем планируется рассмотреть модель платы, более близкую к реальной конструкции. Однако сейчас стоит другая задача, а именно, продемонстрировать существо предлагаемого подхода к оценке стойкости цифровых устройств.

С целью выявления последствий воздействия СКЭМИ на компьютер в процессе его облучения с помощью программы Net Limiter Pro 2.0

осуществлялось измерение скорости передачи информации (R) по локальной сети, образованной двумя ПК. В качестве примера на рисунке 6 показаны результаты измерения параметра R при облучении ПК1 с помощью излучателя № 1 импульсами, имеющими амплитуду 2 кВ/м. При этом частота повторения воздействующих импульсов варьировалась в диапазоне 0,5÷10 кГц. Нетрудно видеть, что в результате воздействия СКЭМИ происходит снижение скорости передачи данных в сети вплоть до нуля, т.е. отказа в обслуживании (DoS). Время наступления данного события (T_{DoS}) уменьшается по мере повышения частоты повторения воздействующих импульсов.

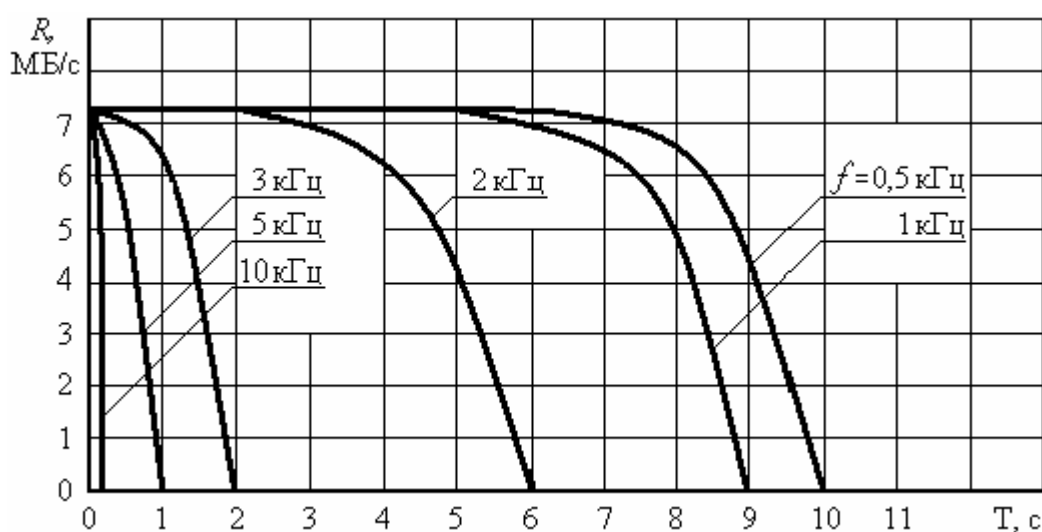


Рисунок 6 – Изменение скорости передачи данных при воздействии СКЭМИ, формируемых излучателем № 1: $E = 2,0$ кВ/м

В результате выполнения экспериментов и расчётов были получены исходные данные, необходимые для построения зависимости параметра T_{DoS} от вероятности $P_{oш}$. Данная зависимость показана на рисунке 7.

Полученная зависимость в сочетании с методикой расчёта вероятности $P_{oш}$ позволяет получить ответ на поставленный в начале настоящей статьи вопрос о последствиях воздействия на рассматриваемое цифровое устройство периодически повторяющихся СКЭМИ с произвольными характеристиками.

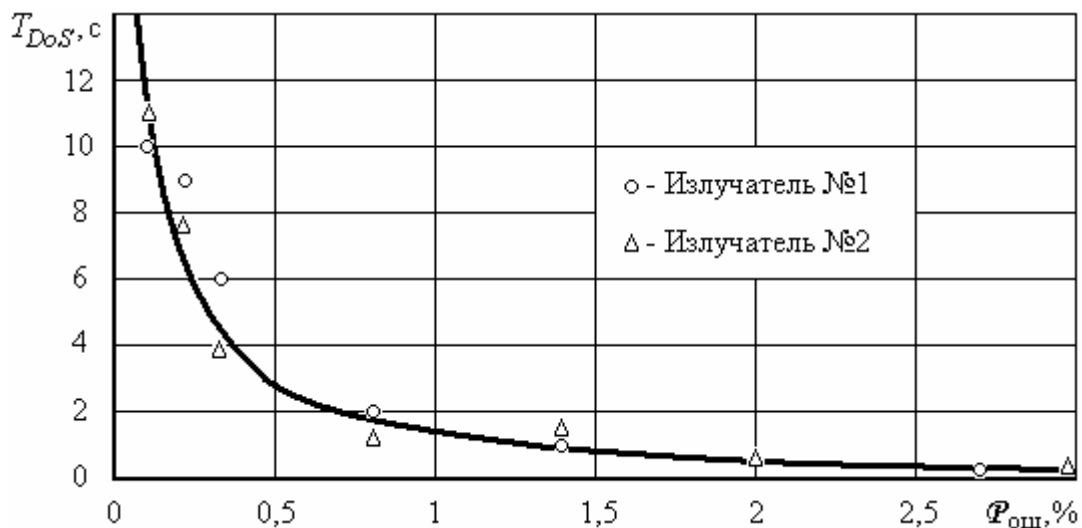


Рисунок 7 – Время наступления отказа в обслуживании в зависимости от вероятности неправильной передачи пакета данных

В качестве примера практического применения предложенного методического подхода рассмотрим следующую задачу.

Предположим, необходимо сконструировать излучатель, создающий на заданном расстоянии СКЭМИ с амплитудой 5 кВ/м и обеспечивающий максимальную эффективность воздействия на ПК, аналогичный рассмотренному выше. Очевидно, что данная задача сводится к нахождению такого сочетания временных и частотных параметров излучаемых импульсов, при которых достигается максимальное значение параметра $P_{ош}$. Для определённости примем, что излучаемые импульсы имеют форму, показанную на рисунке 1. Помимо этого учтём, что повышение эффективности излучателя за счёт увеличения средней мощности излучения влечёт за собой соответствующее увеличение габаритов и веса. В связи с этим введём ограничение на величину параметра $T_1 \cdot f_{новм}$, что при фиксированной амплитуде излучаемых импульсов эквивалентно ограничению средней мощности излучения. Как показывает опыт, в случае необходимости создания компактного излучателя значение упомянутого параметра целесообразно ограничить на уровне порядка $5 \cdot 10^{-7}$.

Таким образом, необходимо решить задачу по нахождению максимума функции $P_{ош}(T_1, E_1/E_2, f_{новм})$ при следующих ограничениях: $E_{макс} = 5$ кВ/м; $T_1 \cdot f_{новм} = 5 \cdot 10^{-7}$. Результаты её решения представлены на рисунке 8.

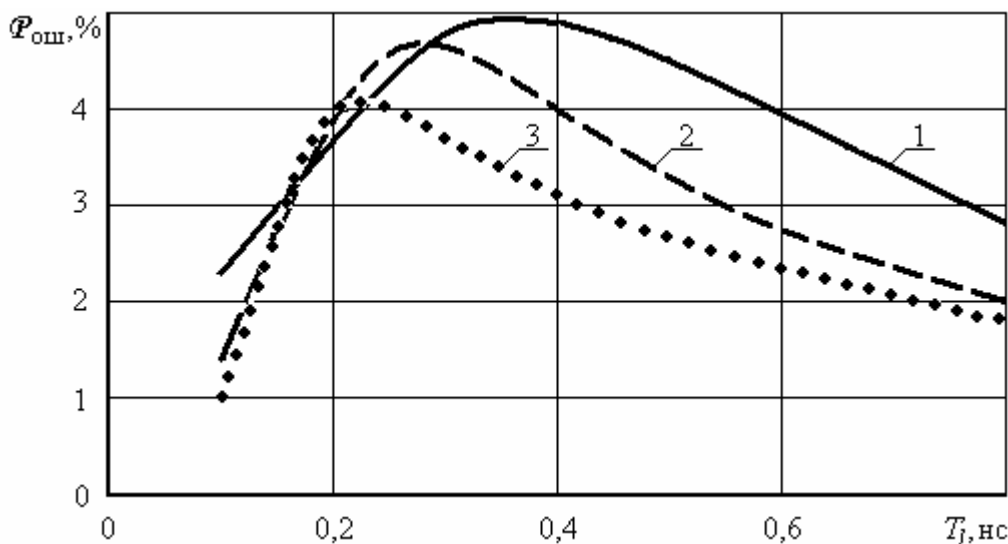


Рисунок 8 – Вероятность неправильной передачи пакета данных в зависимости от параметра T_1 при $E_{\text{макс}} = 5 \text{ кВ/м}$; $T_1 \cdot f_{\text{новт}} = 5 \cdot 10^{-7}$:

1) $E_1/E_2 = 1$; 2) $E_1/E_2 = 2$; 3) $E_1/E_2 = 3$

Из рисунка видно, что максимальная эффективность воздействия достигается при $E_1/E_2 = 1$. Отсюда следует, что при проектировании излучателей необходимо стремиться именно к такому значению данного параметра. Однако это далеко не простая задача. На практике наиболее распространены излучатели, у которых параметр $E_1/E_2 \sim 2 - 3$. Нетрудно видеть, что в этом случае максимальное значение вероятности неправильной передачи пакета данных достигается при $T_1 \sim 0,25 \text{ нс}$ (соответственно, при $f_{\text{новт}} \sim 2 \text{ кГц}$) и составляет примерно 4 - 5 %. Возвратившись к рисунку 7, нетрудно определить, что последствием воздействия СКЭМИ с такими характеристиками будет практически мгновенный отказ компьютерной сети от обслуживания.

В заключение рассмотрим ещё одну задачу, которая может быть решена с использованием предложенной методики. Путём варьирования амплитуды воздействующих импульсов, определим её минимальное значение, при котором происходит отказ в обслуживании, а также максимальное значение, при котором ещё сохраняется нормальное функционирование данного ПК (т.е., уровень стойкости). Результаты расчётов представлены на рисунке 9. Нетрудно видеть, что уровень отказа в обслуживании составляет около 4 кВ/м, а уровень стойкости компьютера равен примерно 2 кВ/м.

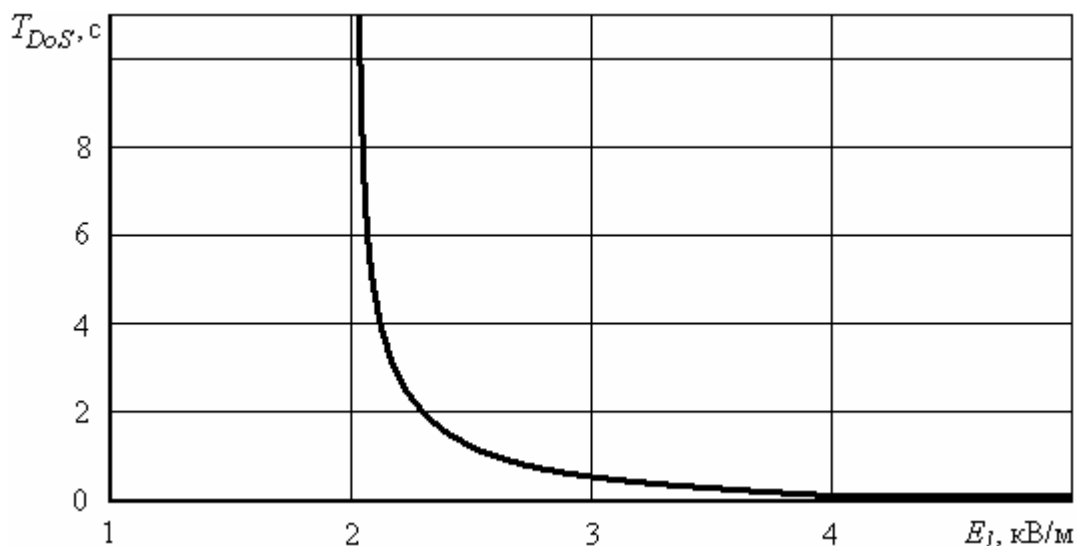


Рисунок 9 – Время наступления отказа в обслуживании
в зависимости от амплитуды СВЭМИ:

$$E_1/E_2 = 3; T_1 = 0,25 \text{ нс}; f_{повт} = 2 \text{ кГц}$$

Заключение

1. Предложена методика оценки стойкости цифровых устройств к воздействию периодически повторяющихся сверхкоротких электромагнитных импульсов (СВЭМИ). Данная методика предполагает выполнение процедуры, включающей в себя следующие этапы:

- проведение испытаний устройства с использованием имеющегося излучателя СВЭМИ. При этом варьируются амплитуда и частота повторения воздействующих импульсов и одновременно регистрируются последствия их воздействия, например, степень уменьшения скорости передачи данных, момент наступления отказа в обслуживании и т.п.;
- построение расчётной модели токопроводящих дорожек печатных плат рассматриваемого устройства и, с учётом характеристик информационного сигнала, расчёт вероятности ошибки при передаче пакета данных для каждого сочетания амплитуды и частоты повторения воздействующих импульсов;
- построение зависимости параметра, характеризующего последствия электромагнитного воздействия на устройство, от вероятности ошибки при передаче пакета данных.

В результате выполнения изложенной выше процедуры появляется возможность решения следующих задач: нахождение сочетания амплитудно-временных и частотных характеристик излучателя СКЭМИ, обеспечивающего наиболее эффективный режим воздействия излучаемых импульсов на цифровые приборы; прогноз последствий воздействия на подобные приборы электромагнитных импульсов с произвольными характеристиками и т.п.

2. Для иллюстрации возможностей предложенной методики выполнена оценка стойкости конкретного персонального компьютера к действию СКЭМИ с произвольными амплитудно-временными и частотными характеристиками при условии соблюдения ограничения $T_1 \cdot f_{повт} = 5 \cdot 10^{-7}$, где T_1 – длительность максимального пика, а $f_{повт}$ – частота повторения импульсов. Показано, что максимальная эффективность электромагнитного воздействия достигается при следующих временных и частотных характеристиках воздействующих импульсов: $T_1 \sim 0,25$ нс; $f_{повт} \sim 2$ кГц. Также показано, что фактический уровень стойкости данного компьютера к воздействию импульсов, имеющих подобные временные и частотные характеристики, составляет примерно 2 кВ/м, а уровень отказа в обслуживании около 4 кВ/м.

Литература

1. *Mojert C., Nitsch D., Friedhoff H., Maack J., Sabath F., Camp M., Garbe H.* UWB and EMP susceptibility of microprocessors and networks // 14th International Zurich Symposium and Technical Exhibition on EMC, February 2001.

2. *Nitsch D., Bausen A., Maack J., Krzikalla R.* The Effects of HEMP and UWB Pulses on Complex Computer Systems // International Symposium on EMC, Zurich, 2005.

3. *Зиглин С.Л., Ренецкая Л.В., Черепенин В.А.* Воздействие мощных электромагнитных колебаний на импульсные устройства // Электромагнитные волны и электронные системы, 2008, т.13, №6, с.16-17.

4. *Вдовин В.А., Кулагин В.В., Черепенин В.А.* Помехи и сбои при нетепловом воздействии короткого электромагнитного импульса на

радиоэлектронные устройства // Электромагнитные волны и электронные системы, 2003, т. 8, №1, с.64-73.

5. *Kohlberg I., Carter R.* Some theoretical considerations regarding the susceptibility of information systems to unwanted electromagnetic signals // 14th Int. Zurich Symposium on EMC, February 2001.

6. *Здухов Л., Парфенов Ю., Титов Б.* Вероятностный анализ устойчивости канала передачи данных к действию периодически повторяющейся импульсной помехи // Технологии ЭМС, Издательский дом «Технологии», №1 (28), 2009.

7. Вычислительные методы в электродинамике // Под ред. Р. Митры, М.: Мир, 1977.

8. *Лавров Г.А.* Взаимное влияние линейных вибраторных антенн // М.: Связь, 1975.

9. IEEE P1642 D5 Draft. Recommended Practice for Protecting Public Accessible Computer Systems from Intentional EMI, 22 July 2010.

10. IEC 61000-2-13: Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-13: Environment – High-power electromagnetic (HPEM) environments – radiated and conducted, 2005.

11. IEC/TR 61000-1-5: Electromagnetic compatibility – Part 1-5: General – High power electromagnetic effects on civil systems, 2004.

12. *Кечиев Л.Н.* Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры // М., ООО «Группа ИДТ», 2007.

13. *Таненбаум Э.* Архитектура компьютера // 4 – е изд., С^ПШТЕР, 2003.