

УДК 621.391.825

К. А. БОЧКОВ, доктор технических наук, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель; Д. В. КОМНАТНЫЙ, кандидат технических наук, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого, г. Гомель; И. О. ЖИГАЛИН, Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ МИКРОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ И ТЕЛЕМЕХАНИКИ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИМПУЛЬСАМ ПРЕДНАМЕРЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

На основе использования принципа подобия и энергетического представления электромагнитного импульса преднамеренного воздействия рассмотрены подходы к прогнозированию устойчивости микроэлектронных систем железнодорожной автоматики и телемеханики к новому виду угроз – электромагнитному терроризму.

Современные системы железнодорожной автоматики и телемеханики (СЖАТ) создаются на базе аппаратно-программных комплексов (АПК) с использованием быстродействующих микроэлектронных компонентов. При этом они становятся более уязвимыми по отношению к воздействию широкополосных импульсных помех.

Примерно два десятка лет назад появилось понятие электромагнитного терроризма, связанного с воздействием преднамеренных электромагнитных помех (ПЭМП) на микроэлектронную элементную базу. В настоящее время проблема борьбы с терроризмом становится всё более актуальной в связи с предпринимаемыми попытками атак на критическую инфраструктуру. Микроэлектронные СЖАТ относятся к критически важным объектам инфраструктуры (КВОИ) как непосредственно отвечающие за безопасность движения поездов.

Наибольшую опасность для микроэлектронных АПК СЖАТ представляют как одиночные, так и пачки электромагнитных импульсов преднамеренного воздействия (ЭИПВ) в наносекундном диапазоне, сопоставимые по длительности с тактовыми импульсами микропроцессоров и микроконтроллеров. Характерной особенностью СЖАТ является их территориальная рассредоточенность на станциях и перегонах и отсутствие периметров охраны, что увеличивает количество мест возможного преднамеренного воздействия электромагнитными импульсами на некотором расстоянии по свободному пространству. Поэтому прогнозирование устойчивости микроэлектронных СЖАТ к ЭИПВ является актуальным вопросом. Это особенно важно на этапах разработки и испытаний микроэлектронных СЖАТ.

Существуют два подхода к решению проблемы устойчивости микроэлектронных систем к ЭИПВ. Первый, наиболее распространенный, основан на физическом моделировании воздействия ЭИПВ на исследуемую систему (устройство) с помощью специальных, достаточно сложных и дорогостоящих, генераторов. Такие испытания приводят, как правило, к деструктивным последствиям для элементов. Анализ путей проникновения помех и способов защиты от ЭИПВ при этом становится очень сложным, а иногда и невозможным. Эта же проблема возникает и при прогнозировании устойчивости микроэлектронных систем в зависимости от размеров возможной зоны поражения и использовании различных способов и средств экранирования и геометрической ориентации наиболее ответственных плат в экранированных корпусах с неоднородностями.

Второй подход основан на использовании принципа подобия. Суть подхода заключается в использовании стандартного генератора наносекундных импульсов помех, характеристики которого по длительности фронта импульса близки к параметрам ЭИПВ за исключением энергии. Таким параметрам соответствуют генераторы электростатических разрядов (ЭСР) по ГОСТ 30804.4.2, ГОСТ Р 50607.

Тогда, используя генератор ЭСР и проводя испытания устройств микроэлектронных СЖАТ путем непосредственного воздействия на неоднородности (апертуры) корпусов этих устройств, можно при помощи методов аналитического анализа механизма проникновения ЭИПВ прогнозировать возможные результаты воздействия ЭИПВ исходя из мощности и расстояния применения используемого генератора. Это позволит также оценить адекватность (применимость) пакетов моделирования, используемых для прогнозирования последствий проникновения ПЭМП в корпуса аппаратуры микроэлектронных СЖАТ численными методами анализа электромагнитных полей, в частности, методом конечных элементов в программе Ansys ED.

Моделирование в пакете Ansys ED позволяет учесть наличие нескольких паразитных антенн и интерференцию их излучения (рисунок 1), что важно при сложной конструкции объекта испытаний. Используя моделирование, можно тестировать надежность средств защиты, не повреждая объект. На рисунке 1, а приведена 3D-модель корпуса объекта испытаний с апертурами и установленными в разных плоскостях платами, для которых оценивается воздействие импульса от источника вне корпуса. На платах отображается распределение электрического поля в конкретный момент времени. На рисунке 1, б приведен график тока испытательного импульса по ГОСТ 30804.4.2. На рисунке 1, в приведен график мощности, приходящейся на исследуемую плату внутри корпуса.

Тем не менее из-за большого объема вычислений методы моделирования не позволяют в полной мере решать задачи прогнозирования воздействия ЭИПВ, т. к. построение математической модели и расчёт характеристик для электродинамических систем сложной конфигурации часто является слишком трудоёмкой задачей.

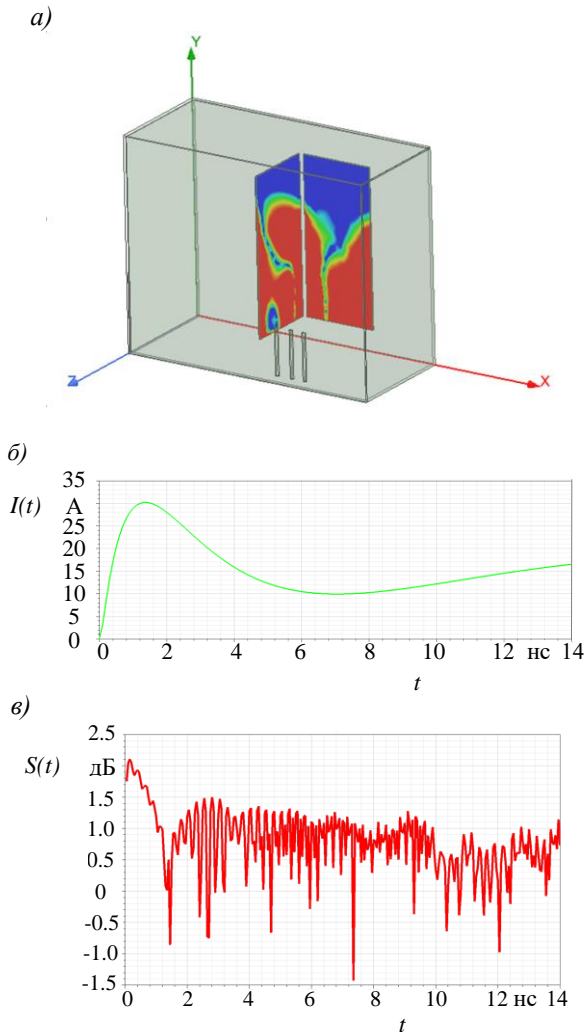


Рисунок 1 – Представление результатов моделирования: а – 3D-модель объекта испытаний; б – график испытательного импульса; в – график мощности сигнала на элементе внутри корпуса

Кроме того, методу конечных элементов присущи погрешности, которые могут негативно сказаться на адекватности результатов моделирования воздействия ЭИПВ на аппаратуру микроэлектронных СЖАТ. Указанные погрешности метода конечных элементов связаны:

- с ошибками дискретизации, являющимися результатом геометрических различий границы рассматриваемой области и ее модели;
- ошибками базисной функции, обусловленными разностью между точным решением и его представлением в виде комбинации базисных функций заданного вида;
- ошибками округления, связанными с конечной длиной разрядной сетки компьютера и большим числом операций, выполняемых при решении задачи методом конечных элементов.

Следовательно, необходимо осуществить оценку и анализ погрешности численных методов, реализованных в программах моделирования. Для такой оценки предлагается сравнить результаты, полученные при моделировании, с результатами, полученными при натуральных испытаниях с использованием принципа подобия.

Для решения проблемы устойчивости микроэлектронных СЖАТ к ЭИПВ требуется также осуществить анализ распространения преднамеренных помех от ге-

нератора помех к рецептору. Наиболее скрытым является воздействие по свободному пространству. В этом случае основным механизмом воздействия ЭИПВ является проникновение в корпуса аппаратуры СЖАТ через апертуры (неоднородности) в этих корпусах, которые ухудшают качество экранирования.

В статье предлагается осуществлять анализ и прогнозирование воздействия ЭИПВ энергетическим подходом. Основным расчетным соотношением этого подхода является выражение для частотного спектра ЭИПВ [1]

$$S(j\omega) = \frac{\sqrt{60PG}}{r} e^{-\gamma r} \int_{-\infty}^{+\infty} A_{\text{ЭИПВ}}(t) e^{-j\omega t} dt, \quad (1)$$

где S – спектральная функция, В·с; P – мощность генератора, Вт; G – коэффициент направленности антенны; r – расстояние, м; γ – коэффициент затухания, 1/м; $A_{\text{ЭИПВ}}(t)$ – временная функция импульса; ω – круговая частота, рад/с; t – время, с.

Для упрощения записи вводится параметр антенны, $FOM = \sqrt{60PG}$, численно равный амплитуде напряженности электрического поля антенны на расстоянии 1 метр в направлении максимального излучения. Тогда из (1) могут быть получены соотношения для расчета величин, необходимых для оценки вклада ЭИПВ в электромагнитную обстановку (ЭМО) на месте эксплуатации аппаратуры СЖАТ [1]:

- амплитуда напряженности поля принимаемого паразитной антенной импульса преднамеренного воздействия

$$E_{\text{мпр}} = \frac{FOM}{r} e^{-\gamma r}; \quad (2)$$

- интенсивность помех

$$I = \frac{FOM^2}{\pi r^2} e^{-\gamma r}; \quad (3)$$

- вносимая в систему энергия

$$W = I \int_{-\infty}^{+\infty} A_{\text{ЭИПВ}}(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (4)$$

Наибольший интерес для практических целей представляет выражение (2). Оно является аналогом уравнения радиоэлектронной борьбы [2]. С его помощью решаются две основные задачи анализа вклада генераторов ЭИПВ в электромагнитную обстановку (ЭМО).

Для оценки воздействия ЭИПВ и прогнозирования устойчивости микроэлектронных СЖАТ необходимо решение двух задач. Первая задача – определение мощности и коэффициента направленности антенны генератора ЭИПВ, необходимых для создания в месте расположения аппаратуры СЖАТ помех, превышающих порог восприимчивости этой аппаратуры. Вторая задача – определение радиуса поражения для данного генератора ЭИПВ и для данной аппаратуры СЖАТ.

Из (2) следует уравнение для радиуса поражения $r_{\text{пор}}$ по известной амплитуде принимаемого импульса, соответствующей порогу восприимчивости технических средств ЖАТ:

$$\frac{e^{-\gamma r_{\text{пор}}}}{r_{\text{пор}}} = \frac{FOM}{E_{\text{мпр}}}. \quad (5)$$

Уравнение (5) является трансцендентным по Эйлеру. Его решение возможно численными или графическими методами. Также принципиально возможно преобразовать его в алгебраическое путем разложения экспоненты в ряд Тейлора. Этим способом можно получить уравнения третьей или четвертой степени, решение которых возможно по замкнутым формулам.

Так как все перечисленные способы решения уравнения (5) являются в той или иной степени приближенными, то для инженерного анализа предложены упрощенные методы.

Метод, указанный в [3], базируется на понятии области потенциального электромагнитного взаимодействия. На основании известного соотношения для плотности потока энергии электромагнитного излучения [3, 4]

$$\Pi = \frac{PG}{4\pi r^2} = \frac{FOM^2}{240\pi r^2}, \quad (6)$$

где Π – плотность потока энергии, Дж/м², можно получить выражение для максимального радиуса поражения

$$R_{\max} = \frac{FOM}{2\sqrt{60\pi\Pi_{\min}}}, \quad (7)$$

где Π_{\min} – плотность потока энергии, соответствующая порогу восприимчивости ТС ЖАТ.

В [5] для оценки воздействия источников радиопомех на микроэлектронные рецепторы вводится параметр «степень влияния» K :

$$K = \frac{P_{\text{спк}}}{P_{\text{ист}}}, \quad P_{\text{спк}} = \frac{FOM^2}{240\pi r^2 \Delta f}, \quad (8)$$

где $P_{\text{спк}}$ – спектральная плотность энергии генератора на расстоянии r , Вт/Гц; $P_{\text{ист}}$ – мощность генератора помех, Вт; Δf – полоса частот генератора, Гц.

Оба метода основаны на пренебрежении явлениями затухания, поэтому дают завышенные оценки, которые допустимы для практики по принципу наихудших условий.

При анализе воздействия ЭИПВ на системы ЖАТ последний способ неудобен тем, что затруднительно установить спектральную плотность энергии помех, соответствующую порогу восприимчивости ТС ЖАТ. Поэтому для рассмотрения СЖАТ рационально использовать соотношение (7) либо уравнение-аналог уравнения радиоэлектронной борьбы (2).

В обоих подходах требуется определить величины, характеризующие порог восприимчивости ТС ЖАТ. Этот порог может быть определен косвенным способом путем моделирования на компьютере или путем непосредственного воздействия на паразитные антенны корпусов микроэлектронной аппаратуры СЖАТ импульсами генератора-имитатора помех, эквивалентными ЭИПВ известной формы. Импульсы испытательных генераторов чаще всего являются биэкспоненциальными. Импульсы преднамеренного воздействия имеют достаточно разнообразные формы. Параметры импульсов преднамеренного воздействия, эквивалентных воздействующим на паразитные антенны биэкспоненциальным импульсам, целесообразно

определять по спектрально-энергетическому способу вывода условий эквивалентности импульсов [6]. В этом способе эквивалентные импульсы имеют одинаковую энергию, которая определяет последствия воздействия импульса на рецепторы, и одинаковую полосу частот, которая определяет проникающую способность импульсов через каналы проникновения. Таким способом определяется амплитуда напряжения ЭИПВ, излучаемого внутрь корпуса микроэлектронного ТС ЖАТ.

Амплитуда напряжения импульса и амплитуда напряженности поля в раскрыве паразитной антенны связаны геометрическим параметром антенны x [6, 7]

$$E_{\text{мизл}} = \frac{U_{\text{мизл}}}{x}. \quad (9)$$

Векторы Пойнтинга принимаемого паразитной антенной импульса и импульса, излучаемого антенной в корпус ТС ЖАТ связаны соотношением

$$\Pi_{\text{пр}} A_{\text{эф}} = \Pi_{\text{изл}} A_{\text{геом}}, \quad (10)$$

где $\Pi_{\text{пр}}$, $\Pi_{\text{изл}}$ – модули векторов Пойнтинга, Вт/м², $A_{\text{эф}}$ – эффективная площадь антенны, м²; $A_{\text{геом}}$ – геометрическая площадь антенны, м².

Тогда

$$\Pi_{\text{пр}} = \Pi_{\text{изл}} \frac{A_{\text{геом}}}{A_{\text{эф}}} = \frac{E_{\text{мизл}} A_{\text{геом}}}{240\pi A_{\text{эф}}} = \frac{E_{\text{мизл}}}{240\pi K_{\text{и}}}, \quad (11)$$

где $K_{\text{и}}$ – коэффициент использования антенны.

Из (10) и (11) следует, что

$$E_{\text{мпр}} = \frac{E_{\text{мизл}}}{\sqrt{K_{\text{и}}}}. \quad (12)$$

Если известна амплитуда напряжения излучаемого импульса (импульса генератора-имитатора помех, эквивалентного ЭИПВ), соответствующая порогу восприимчивости ТС ЖАТ, то выражения (9), (11) и (12) позволяют вычислить параметры принимаемого паразитной антенной импульса преднамеренного воздействия, поступающего от генератора ЭИПВ и соответствующего порогу восприимчивости. Эти параметры являются исходными данными для выполнения расчетов по (5) и (7).

Достоинство описанного в статье косвенного метода определения порога чувствительности ТС ЖАТ с помощью генератора-имитатора импульсных помех заключается в том, что исходные данные для прогнозирования воздействия генераторов ЭИПВ и решения указанных выше возникающих при этом задач получаются без проведения разрушающих испытаний ТС ЖАТ на уникальных испытательных установках, которыми зачастую являются испытательные генераторы ЭИПВ.

Таким образом допустим вывод, что энергетический подход дает возможность выполнить анализ и прогнозирование воздействия ЭИПВ на микроэлектронные и микропроцессорные СЖАТ и получить адекватные результаты, отражающие особенности указанных систем как критически важных объектов информатизации с высокими требованиями по функциональной безопасности.

Также можно сделать вывод, что использование принципа подобия при испытаниях устойчивости микроэлектронных СЖАТ к ЭИПВ позволяет получить информацию, необходимую для оценки результатов компьютерных расчетов, и для определения порога восприимчивости СЖАТ. Поэтому принцип подобия может быть внедрен в практику работы испытательных центров и лабораторий.

Список литературы

1 **Иванов, В. А.** Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств / В. А. Иванов, Л. Я. Ильницкий, М. И. Фужик. – Киев : Техника, 1983. – 189 с.

2 Радиозлектронная борьба. Силовое подавление радиоэлектронных систем / В. Д. Добыкин [и др.] ; под ред. А. И. Куприянова. – М. : Вузовская книга, 2007. – 468 с.

3 **Мордачев, В. И.** Системная экология сотовой радиосвязи / В. И. Мордачев. – Минск : Изд. центр БГУ, 2009. – 319 с.

4 **Аполлонский, С. М.** Расчеты электромагнитных полей / С. М. Аполлонский, А. Н. Горский. – М. : Маршрут, 2006. – 992 с.

5 **Пименов, П. М.** Метод оценки помехоустойчивости средств широкополосного радиодоступа к воздействию сверхкоротких электромагнитных импульсов : дис. ... канд. техн. наук : 05.12.13 / П. М. Пименов ; Московский научно-исследовательский радиотехнический институт. – М., 2015. – 133 с.

6 **Бочков, К. А.** Элементы моделирования электромагнитной совместимости устройств железнодорожной автоматики и телемеханики / К. А. Бочков, Д. В. Комнатный. – Гомель : БелГУТ, 2013. – 185 с.

7 **Фальковский, О. И.** Техническая электродинамика / О. И. Фальковский. – М. : Связь, 1978. – 432 с.

Получено 28.10.2022

К. А. Bochkov, D. V. Komnatny, I. O. Zhigalin. Prediction of the stability of railway automatics and telemechanics microelectronic systems to electromagnetic impulses of intentional impact.

Based on the use of the principle of similarity and the energy representation of an electromagnetic impulse of intentional impact, approaches to predicting the stability of microelectronic systems of railway automatics and telemechanics to a new type of threat – electromagnetic terrorism are considered.