

А.И.КОРОБКО, канд. техн. наук, зав. отделом, НТУ «ХПИ»;
З.И.КОРОБКО, науч. сотр., НТУ «ХПИ»

ОЦЕНКА УРОВНЕЙ СТОЙКОСТИ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ КОМПОНЕНТОВ К ПОРАЖАЮЩЕМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ, ХАРАКТЕРНОГО ДЛЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ТЕРРОРИЗМА

В статті наведено опис методики оцінки рівнів стійкості радіоелектронних компонентів до вражаючої дії імпульсного електромагнітного випромінювання. Дано обґрунтування визначення типу функції відгуку елементів радіоелектронної апаратури.

Method of estimation of radio electronic components firmness levels to the striking action impulsive electromagnetic radiation is descript in the article. The substantiation of definition function type of the response is given for the electronic equipments elements.

Введение. Определение уровней стойкости элементов радиоэлектронной аппаратуры (РЕА) для обеспечения их бесперебойной работы в кризисных ситуациях (проявление электромагнитного терроризма) является на сегодняшний день крайне актуальной задачей [1,2,3] и направлено в первую очередь на уменьшения ущерба вооружению, военной технике, а также критическим объектам государственного значения в случае появления электромагнитной угрозы. Принимая во внимание крайнюю сложность определения уровней стойкости радиоэлектронных компонентов к поражающему воздействию сверхмощного электромагнитного излучения (ЭМИ) теоретическим путем, ниже приведена разработанная и практически реализованная методика оценки уровней стойкости элементов РЭА при воздействии на них ЭМИ с различными значениями амплитудно-временных параметров (АВП).

Отказы, возникающие в РЭА как результат воздействия различных ЭМИ, можно разделить на обратимые и необратимые. В настоящей работе было исследовано явление необратимого выхода из строя элементов РЭА, возникающее в результате действия на него импульсов тока и напряжения через схему подключения под действием ЭМИ.

Явление необратимого отказа было выбрано по следующим причинам. Явление обратимого отказа не имеет четких однозначных критериев определения, возникает в момент воздействия импульсного ЭМИ и исчезает после окончания воздействия. Регистрация обратимых отказов является сложной технической задачей, сложность которой увеличивается из-за резкого возрастания ошибок эксперимента, обусловленных взаимодействием измерительных средств с импульсными ЭМИ [4,5].

Целью настоящей работы является разработка методики оценки уровней стойкости типовых элементов РЭА к поражающему воздействию различных ЭМИ путем определения функции отклика элемента РЭА.

Описание методики. Для достоверного определения уровней стойкости конкретных типовых элементов РЭА был выбран экспериментальный метод.

В рамках данной работы невозможно оценить все многообразие факторов электромагнитного воздействия приводящих к необратимым отказам элементов РЭА, поэтому на данном этапе было рассмотрено влияние следующих параметров воздействующего импульсного ЭМИ:

- длительность фронта;
- длительность импульса;
- полярность.

Для определения уровней стойкости проводились экспериментальные исследования воздействия на типовые элементы РЭА импульсного ЭМИ с различными параметрами (опыты № 1 – № 4), результаты которых приведены в таблице. Как видно, значения величин, описывающих АВП выбранных видов воздействий, изменяются по максимальным значениям в 10 раз, по величинам длительности фронта – в 40 раз, по величинам длительности импульса на уровне 0,5 максимального значения – в 20 раз. При этом погрешности инструментального воспроизведения АВП импульсного ЭМИ не превышали +10 % для величин максимальных значений электрической и магнитной составляющих; +30 % для величин длительностей фронта; +20 % для величин длительности импульса. Такой широкий диапазон изменения параметров позволяет получить экспериментальные данные, достаточные для построения математической модели поведения.

Нормированные амплитудно-временные параметры ЭМИ

Наименование характеристики	Опыт № 1	Опыт № 2	Опыт № 3	Опыт № 4
Максимальное значение импульса электрической составляющей, отн. ед.	1	1	2	10
Максимальное значение импульса магнитной составляющей, отн. ед.	1	1	2	10
Длительность фронта импульса на уровнях 0,1 – 0,9 максимального значения, отн. ед.	1,6	1	0,2	0,04
Длительность импульса на уровне 0,5 максимального значения, отн. ед.	1	1	0,5	0,05

Нелинейный характер изменения величин факторов воздействия не позволяет применять известные стандартные методы планирования экспери-

мента, заключающиеся в представлении уравнения регрессии в виде полинома, учитывающего влияние, как отдельных факторов воздействия, так и их перекрестное сочетание. Проведение эксперимента с учетом перекрестных сочетаний факторов воздействия, требует создания дополнительных генераторов импульсного ЭМИ (с перекрестными значениями факторов воздействия), что резко усложняет решение поставленной задачи. Данная проблема была решена путем выбора специального типа математического вида функции отклика.

Функция отклика (отказа) элемента РЭА – это зависимость математического ожидания величин максимальных значений электрической (или магнитной) составляющей импульсного ЭМИ, соответствующего необратимому отказу от указанных выше параметров.

В общем виде функция отклика для электрической составляющей может быть представлена в виде [6]:

$$E_{om} = f(X_i + h_j) + S, \quad (1)$$

где E_{om} – математическое ожидание отклика; X_i – контролируемые и управляемые факторы воздействия; h_j – контролируемые, но неуправляемые факторы воздействия; S – ошибка эксперимента.

Аналогичный вид имеет функция отклика для магнитной составляющей.

Определяющее значение для достоверности и представления полученных результатов в компактной и удобной форме имеет вид выбранной функции $f(X_i + h_j)$ (часто ее представляют в виде полинома по степеням влияния факторов [6]) и минимизация ошибки эксперимента в уравнении (1).

Для выбранных факторов воздействия имеет смысл представить функцию отклика с максимальным учетом физических аспектов электромагнитных процессов, сопровождающих явления необратимого отказа элементов РЭА под действием импульсного наносекундного ЭМИ. На сегодняшний день имеются два основных физических механизма необратимых отказов РЭА – электрический пробой и тепловой пробой полупроводниковых структур, входящих в состав элемента РЭА [1] под действием импульсов тока и напряжения, наводимых на внешней части электродов элементов под действием электрической и магнитной составляющих ЭМИ. В диапазоне изменения АВП импульсного ЭМИ, приведенном в таблице, вероятность наступления необратимых отказов элементов РЭА, не подсоединенных к другим элементам и проводникам, играющим роль магнитных и электрических антенн («голый» элемент), достаточно мала [4].

Данный факт позволяет допустить, что максимальные значения импульсов тока и напряжения, наведенных во внешних цепях, подсоединенных к радиоэлементам, пропорциональны скорости нарастания импульсного ЭМИ и обратно пропорциональны величине длительности фронта импульса ЭМИ [7]. Энергия же этих импульсов прямо пропорциональна величине длительности импульса ЭМИ.

Эти допущения позволяют на основе общих физических представлений о механизмах необратимых отказов элементов РЭА учесть влияния длительности фронта и длительности импульса в чистом виде. Перекрестное влияние этих факторов позволяет учесть предположение о том, что на процессы развития необратимых отказов элементов РЭА влияет скорость ввода энергии импульсным ЭМИ, величина которой прямо пропорциональна длительности импульса и обратно пропорциональна длительности фронта импульса.

Следовательно, эти допущения позволяют учесть как сами факторы воздействия, так и их перекрестные взаимодействия.

Ограничиваясь степенью влияния факторов не выше второй и считая, что $h_j = 0$, функцию отклика можно представить в следующем виде:

$$f(X_i) = A X_1 + B / X_2 + C X_1 / X_2 + D, \quad (2)$$

где X_1 – величина длительности фронта ЭМИ; X_2 – величина длительности импульса ЭМИ; A, B, C, D – неизвестные коэффициенты, подлежащие определению.

Влияние полярности векторов ЭМИ как фактора воздействия в данном виде учтено не может быть, так как количество неизвестных в уравнении (2) равно количеству опытов одной полярности ЭМИ с АВП, приведенными в таблице. Учет полярности может быть проведен чисто экспериментально, путем проведения еще одной серии из четырех опытов. С учетом вышесказанного, получаем систему уравнений следующего вида:

$$E_{omj} = A X_{1j} + B / X_{2j} + C X_{1j} / X_{2j} + D, \quad (3)$$

где: E_{omj} – максимальная величина электрической составляющей импульсного ЭМИ, соответствующего наступлению необратимого отказа данного элемента РЭА, полученная в результате обработки экспериментальных данных в соответствии с методикой, указанной в [8]; j – номер опыта.

Так как данная система является замкнутой, то ее решение не составляет трудностей и может быть найдено любым удобным способом. В данном конкретном случае система уравнений (3) решалась с помощью пакета программ математического обеспечения «Evrika».

В итоге появилась возможность, имея экспериментальные данные по уровням стойкости элементов РЭА к воздействиям импульсного ЭМИ с различными дискретными амплитудно-временными параметрами и рассчитав неизвестные коэффициенты A, B, C, D , построить прогнозную математическую модель поведения элементов РЭА для всех промежуточных значений АВП без дополнительных экспериментальных исследований.

Выводы. По результатам исследований можно сделать следующие выводы.

- 1 Разработана методика оценки уровней стойкости радиоэлектронных компонентов к поражающему воздействию ЭМИ путем разработки соответствующей прогнозной математической модели поведения

элементов РЭА. При расширении базы экспериментальных данных на последующих этапах возможен учет более высоких степеней влияния данных факторов воздействия, а также расширение перечня учитываемых факторов. Следует отметить, что более углубленное исследование влияния факторов воздействия на элементы РЭА требует создания генераторов ЭМИ с другими сочетаниями АВП излучения.

- 2 Данная методика применима как для задач защиты объектов вооружения, военной техники и критических гражданских объектов от поражающего воздействия ЭМИ, характерного для проявлений электромагнитного терроризма, так и для защиты от любых других видов ЭМИ естественного и искусственного происхождения.

Список литературы: 1. *Рикетс Л.У., Бриджес Дж.Э., Майлетта Дж.* Электромагнитный импульс и методы защиты. Пер. с англ. – М.: Атомиизат, 1979. – 327 с. 2. *Белоус В.* Угроза использования ЭМИ-оружия в военных и террористических целях // *Ядерный контроль.* – № 1 (75), Том 11. – 2005. – С. 133-140. 3. *Коробко А.И., Коробко З.И.* Реальные уровни стойкости различной радиоэлектронной аппаратуры к воздействию импульсного электромагнитного излучения СВЧ-диапазона // Сборник научных трудов 2-го Международного радиотехнического форума «Прикладная радиоэлектроника. Состояние и перспективы развития». Харьков: НТУ «ХПИ». – 2005. – Т. 6. – С. 96. 4. *Мырова Л.О., Чепыженко А.З.* Обеспечение стойкости аппаратуры связи к ионизирующим и электромагнитным излучениям. – 2-е изд. – М.: Радио и связь, 1988. – 296 с. 5. *Кравченко В.И., Болотов Е.А., Летунова Н.И.* Радиоэлектронные средства и мощные электромагнитные помехи. – Под ред. *Кравченко В.И.* – М.: Радио и связь, 1987. – 256 с. 6. *Спирин Н.А., Лаеров В.В.* Методы планирования и обработки инженерного эксперимента. Конспект лекций. – Под общ. ред. *Спирина Н.А.* – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. – 257 с. 7. *Коробко А.И., Коробко З.И.* Математическое статистическое моделирование поведения элементов радиоэлектронной аппаратуры при воздействии сверхмощного электромагнитного излучения // Материали XVI міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я», 4-6 червня 2008 р. – Харків: у 2 ч. – Ч. 2. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2008. – С. 351. 8. *Коробко А.И., Коробко З.И.* Методика обработки результатов экспериментальных исследований по определению стойкости радиоэлектронных компонентов к поражающему воздействию электромагнитного излучения, свойственного проявлениям электромагнитного терроризма // Вестник Национального технического университета «ХПИ». Сборник научных трудов. Тематический выпуск: «Техника и электрофизика высоких напряжений». – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2009. – № 39. – С. 100-105.

Поступила в редколлегию 17.03.2010